بيئة المحاصيل الحقلية

الجزء النظري

Damascus University

السنة: الرابعة

القسم: المحاصيل الحقلية

منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الزراعية

بيئة المحاصيل الحقلية

الجزء النظري

الدكتور	الدكتور	الدكتورة
أيمن الشحاذة العودة	حسين المحاسنة	ريما رباح نصر
أستاذ في قسم المحاصيل الحقلية	مدرس في قسم المحاصيل الحقلية	مدرسة في قسم المحاصيل الحقلية

جامعة دمشق

2013 – 2014 م

1434 – 1435 هـ

Damascus University

فهرس المحتويات

الموضوع	الصفحة
تمهيد	7
الفصل الأول: بيئة النباتات والعوامل اللاأحيائية المكونة للنظم البيئية الزراعية	9
الفصل الثاني: تأثير العوامل البيئية في نمو النباتات وتطورها وإنتاجيتها	31
الفصل الثالث: استعمال العناصر المعدنية المغذية	65
الفصل الرابع: استعمالات الكربون وإنتاج المادة الجافة	83
الفصل الخامس: العلاقات المائية في النبات	131
الفصل السادس: تأثير الإجهادات اللاأحيائية في نمو النباتات وتطورها وإنتاجيتها	169
الفصل السابع: آليات تكيف الأنواع المحصولية مع العوامل البيئية	223
الفصل الثامن: تأثير العوامل البيئة في كفاءة استعمال المياه (إنتاجية المياه) في المحاصيل الحقلية	249
الفصل التاسع: تأثير المنافسة بين النوعية وضمنها في إنتاجية الأنواع المحصولية	279
الفصل العاشر: دور الزراعة الحافظة في تحسين العوامل البيئية وإنتاجية المياه والأرض والمحصول	293
الفصل الحادي عشر: التغيرات المناخية وتأثيرها في الإنتاج الزراعي	335

الفصل الثاني عشر: تأثيرات التبدلات المناخية في استدامة إنتاجية النظم البيئية الزراعية	359
قائمة بالمصطلحات الواردة في الكتاب باللغتين العربية والإنكليزية	389
الوحدات الدولية وتحويلاتها	397
المراجع	401

Damascus University

تمهيد

يتناول علم بيئة المحاصيل الحقلية وفيسيولوجيتها دراسة علم حياة النبات ووظائفه تحت تأثير العوامل الأحيائية واللاأحيائية. وينضوي علم بيئة المحاصيل الحقلية على الدراسة الشمولية للأنظمة البيئية الزراعية التي تضم كافة عناصرها البيئية والبشرية، مركزةً على شكل العناصر وحركتها ووظائفها والعلاقات المتبادلة بينها، والعمليات التي تشترك فيها. ويهدف هذا العلم إلى كشف النقاب عن الآليات الشكلية، والفسيولوجية، والبيوكيميائية التي تعكس أداء الأنواع النباتية المختلفة ضمن بيئاتها الحقيقية، بما يضمن ليس فقط البقاء على قيد الحياة بل يتعداه إلى بلوغ كامل الطاقة الإنتاجية الكامنة ضمن تلك البيئات المستهدفة. إنّ الأنظمة البيئية الزراعية عبارة عن تجمعات من النبات والحيوان والكائنات الحية الدقيقة، والعوامل الفيزيائية المحيطة بها، التي يعمل الإنسان على تحويرها واستثمار مكنوناتها على أسسٍ مستدامة لإنتاج الغذاء، والأعلاف، والكساء، والوقود وغيرها من المنتجات لتأمين كامل الاحتياجات السكانية والحيوانية المتزايدة. يتضمن هذا الكتاب استعراضاً دقيقاً لأهم العوامل البيئية الفيزيائية والحيوية المحيطة بالمجتمعات النباتية ضمن نظم بيئية طبيعية وزراعية مختلفة. ونحاول من خلاله تسليط الضوء على ماهية العلاقات التفاعلية بين النبات ومعقد العوامل البيئية، وآليات تأثيرها في العمليات الحيوية المختلفة، ولاسيما عمليتي التمثيل الضوئي والتنفس، والسبل التكيفية التي يطورها النبات للتخفيف من وطأة تلك العوامل البيئية، وذلك عند انحرافها زيادةً ونقصاناً عن معدلاتها الطبيعية المثلى. ويمكن أن تسبب التغيرات البيئية القصيرة أو الطويلة الأمد اختلالاً في التوازن المعدني، والهرموني، والمائي على مستوى الخلية والنبات ككل، لذلك كان لا بدّ من التعريج على تأثير العوامل البيئية في التغذية المعدنية، وأسس تحسين كفاءة استعمالها، والسلوك التنافسي الذي تبديه النباتات فيما بينها في ظل شح متطلبات النمو الأرضية والجوية (الماء، والعناصر المعدنية المغذية، والضوء، وغاز الفحم)، وتأثير العوامل البيئية في المقدرة التنافسية. ونظراً إلى كون الماء المركب الكيميائي الأعلى نسبةً في النبات، كان لزاماً علينا توضيح علاقات النبات المائية، والتبدلات التي يمكن أن تطرأ

عليها في النظم البيئية، وأهمية المحافظة على ميزان العلاقات المائية لضمان استمرار عملية إنتاج المادة الجافة وتراكمها. وانطلاقاً من أهمية التقانات الزراعية، ودورها في تحسين الإنتاجية، فقد أفردنا فصلاً كاملاً عن موضوع الزراعة الحافظة Conservation Agriculture، باعتبارها أحد النظم الزراعية المهمة في إعادة تأهيل النظم البيئية الزراعية المتدهورة، والمحافظة على الموارد الطبيعية، واستثمارها بشكلٍ مستدام، ووقاية الترب الزراعية من الانجرافين الريحي والمائي، وتحسين كفاءة استعمال المياه (إنتاجية المياه)، من خلال تقليل الفواقد المائية غير المنتجة (التبخر، والجريان السطحي، والصرف العميق)، وزيادة نسبة الفواقد المائي المنتجة (النتح)، وتحويل كل قطرة ماء إلى مادة جافة "More crop per drop"، بما يضمن تقليل تكاليف الإنتاج الزراعي، وزيادة هامش الربح الاقتصادي للمزارع، لتحسين مستوى معيشته. نتمنى أن نكون قد وفقنا في تقديم مادة علمية مفيدة وسهلة الفهم، تكون معيناً ثراً لكل طلاب العلم والمعرفة بكل فئاتهم. ونسأل الله عزّ وجل أن يكون هذا العمل صدقةً جاريةً لنا في حياتنا وبعد مماتنا.

والله من وراء القصد

المؤلفون

أ. د. أيمن الشحاذة العودة **د. حسين المحاسنة** **د. ريما رباح نصر**

الفصل الأول

بيئة النباتات والعوامل اللاأحيائية المكونة للنظم البيئية الزراعية

Plants Environment and A biotic Factors in Agro-ecosystems

يتعلق نمو نباتات المحاصيل وتطورها بشكلٍ رئيس بالظروف البيئية المحيطة، بما فيها العوامل المناخية والتربة، ويرتبط نجاح المحصول أو فشله بعوامل الطقس Weather factors خلال فترة نمو المحصول. إنّ تعديل الطقس لحدٍ ما هو أمر صعب وغير مجدٍ اقتصادياً. عموماً، من الممكن الحصول على غلة محصول عالية عن طريق ضبط النظم المحصولية Cropping patterns، واتباع الممارسات الزراعية المناسبة للتخفيف من وطأة العوامل البيئية غير المناسبة. ويُعرّف الطقس بأنّه تعبير عن الحالة الجوية في مكانٍ ما خلال فترة زمنية قصيرة، قد تكون يوماً أو جزءاً من يوم، وقد تصل إلى عدة أيامٍ وحتى أسبوع فأكثر. وللطقس أهمية ملحوظة في مجال الزراعة، لما تخلفه الحالات الجوية اللحظية من تأثيرات مباشرة، قد تكون سبباً في فشل هذا المحصول الزراعي أو ذاك. أما المناخ فيعبِّر عن الحالة المتوسطة للجو في مكانٍ ما خلال فترة زمنية طويلة تُقارب 30 أو 35 سنة. فالمناخ في أية منطقة ما هو إلا مركب لطقوس متعددة متعاقبة ومتمازجة مع بعضها البعض خلال فترةٍ زمنيةٍ طويلةٍ، تتكرر خلالها أشكال الطقوس كافةً المنتظمة وغير المنتظمة. وبصورةٍ عامة، فإنّ الحالة الجوية في مكانٍ ما لا يُعبّر عنها بظاهرةٍ فردية، وإنّما هي وليدة تفاعل عناصر عدة متمثلة في درجة الحرارة، والرطوبة الجوية، والضغط الجوي والرياح، والهطولات المطرية Rainfall. وهنا تتجلى أهمية المناخ الزراعي Agro-climate كأحد أهم الفروع التطبيقية لعلم المناخ الذي يهتم بالكشف عن العلاقة بين عناصر المناخ المختلفة والنباتات المزروعة، وما يترتب على ذلك من تأثير للمناخ في الإنتاج الزراعي، كما ويهتم بتحديد البيئات المناخية ومدى ملاءمتها للزراعات المختلفة، وبالتالي إمكانية نقل النباتات من مكانٍ إلى آخر، وإدخال المزروعات الجديدة على أسسٍ علمية سليمة.

محيط النباتات The surroundings of plants

1- الغلاف الجوي Atmosphere: هو الغلاف الغازي أو الهوائي المحيط بالكرة الأرضية من جميع جوانبها. ويمتد اعتباراً من سطح الأرض وحتى الارتفاع الذي تنعدم فيه الجاذبية الأرضية على مكونات هذا الغلاف، أي على مسافة 100 ألف كم. ولكن المثبت علمياً أنه اعتباراً من سطح الأرض وحتى 1000 كم تقريباً، تتجلى العديد من الظواهر الجوية المرئية من على سطح الأرض كالشفق والنيازك والشهب ما دعا إلى تحديد سماكة الغلاف الجوي بهذا الارتفاع. ومن الناحية الزراعية، من المهم دراسة

الغلاف الجوي ضمن الارتفاع الذي يمتد من سطح الأرض وحتى 12 كم تقريباً، حيث تتمثل فيه العديد من الظواهر الجوية كالغيوم، والأمطار، والتكاثف.

أهمية الغلاف الجوي: يمكن القول إنّه لولا الغلاف الجوي لانعدمت الحياة على سطح الكرة الأرضية، ويعود ذلك للأسباب التالية:

1. حماية كل أشكال الحياة على سطح الكرة الأرضية من مخاطر التعرض للأشعة الشمسية الضارة (كالأشعة فوق البنفسجية، وأشعة إكس)، حيث يعمل بمكوناته الغازية على استقطابها وفلترتها.

2. الوقاية من التبريد السريع خلال الليل، والتسخين الشديد خلال النهار.

3. يُسهم بفضل مكوناته (غازات الدفيئة (Greenhouse gases) في جعل متوسط حرارة الهواء على سطح الكرة الأرضية بحدود 15°م بدلاً من -18 °م في حال غياب الغلاف الجوي.

4. ينقل الطاقة الحرارية من المناطق الاستوائية إلى خطوط العرض الوسطى والعليا من الكرة الأرضية.

5. يحدد عبر الحركة العامة للجو كميات الهطول المطري فوق سطح الأرض.

6. يختزن كمياتٍ ضخمة من الآزوت، وهو مستودع لغاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) والأوكسجين (O_2).

7. يبدد ويحلل العديد من الانبعاثات الغازية الناتجة عن النشاطات الإنسانية أو الطبيعية عبر العديد من عمليات الأكسدة والتحلل الضوئي.

8. يؤمن الحماية من النيازك والشهب الصغيرة، التي تحترق نتيجة احتكاكها بالغلاف الجوي، وضمن تلاشيها قبل الوصول إلى سطح الأرض.

مكونات الغلاف الجوي: يتألف الهواء الجوي من مكونين رئيسين، الأول يمثل المكونات الغازية الثابتة في حجمها تقريباً في جميع أنحاء الكرة الأرضية، ويمثل المكون الثاني الغازات المتغيرة عبر الزمان والمكان، (الجدول، 1). بالإضافة إلى هذه الغازات، يوجد في الغلاف الجوي العديد من الدقائق والجزيئات المعلقة، مثل الغبار البركاني، والدخان،

والملح البحري، وبلورات الجليد وغيرها. وهذه المكونات أقل مقدرة على البقاء في الهواء الجوي بالمقارنة مع الغازات.

الجدول رقم (1): تركيب الهواء الجوي الجاف النظيف.

المكونات الثابتة للهواء	
الغاز	**المحتوى من الحجم (%)**
الآزوت (N_2)	78.08
الأكسجين (O_2)	20.95
الأرغون (Ar)	0.93
النيون، الهيليوم، الكريبتون	0.0001
المكونات غير الثابتة للهواء	
الغاز	**المحتوى من الحجم (%)**
ثاني أكسيد الكربون (CO_2)	0.033
بخار الماء (H_2O)	4-0
الميتان (CH_4)	آثار
ثاني أكسيد الكبريت (SO_2)	-
الأوزون (O_3)	-
أكاسيد الآزوت (NO, NO_2)	-

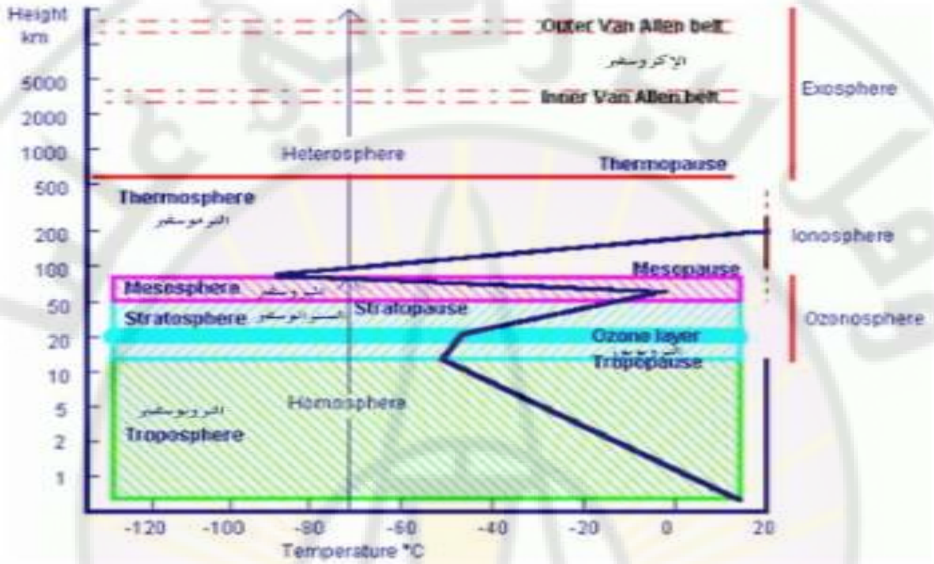
خصائص الغازات الرئيسة المكونة للغلاف الجوي وأهميتها: يُلاحظ من الجدول السابق أنّ كلاً من الأكسجين والآزوت يشكلان قرابة 99% من حجم الهواء الجاف، حيث إنّ غاز الأكسجين ضروري لتنفس الكائنات الحية على سطح الكرة الأرضية، بالإضافة إلى دوره الفعّال في الاحتراق وعمليات التحلل والأكسدة. يتم الحصول على الآزوت من الغلاف الجوي بوساطة بكتيريا متخصصة في تثبيت الآزوت الحر من الغلاف الجوي وتحويله إلى مركبات آزوتية قابلة للامتصاص من قبل النباتات الراقية. ويمكن أن تصل إلى سطح التربة عن طريق مياه الأمطار كمية من المركبات الآزوتية تقدر بنحو 3-5 كغ لكل هكتار سنوياً بتأثير البرق وتأكسد الآزوت، ثمّ يعود الآزوت إلى الغلاف الجوي بشكلٍ رئيس من خلال عمليات الاحتراق والتحولات الكيميائية في التربة. وبالرغم من النسب

الضئيلة التي تشغلها بقية الغازات من حجم الهواء إلا أنّ لها دوراً مهماً في التوازن الإشعاعي وامتصاص الأشعة الحرارية، ويأتي في مقدمتها غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، الذي ينتج عن عمليات التنفس Respiration للكائنات الحية والاحتراق وفوهات البراكين، والنباتات التي تمتص الأكسجين في الليل وتطلق غاز الفحم. ويتجمع غاز ثاني أكسيد الكربون في الأقسام السفلى من طبقة التروبوسفير في مجال ملامستها لسطح الأرض، فهو أثقل غازات الجو الأخرى، ويمتص الأشعة تحت الحمراء ولكن بصورة أقل مما يمتصه بخار الماء، وفي حال نقصان بخار الماء يمتص غاز الفحم الإشعاعات الأرضية ما يضيف له أهمية بوصفه عازلاً حرارياً يقوم بحماية سطح الأرض من فقدان حرارتها بالإشعاع الأرضي، ويمنعها من الضياع في الفضاء الخارجي. يؤدي بخار الماء Water vapor دوراً أساسياً في امتصاص الأشعة الطويلة الموجة (تحت الحمراء)، لذلك يعمل على نشر الحرارة في الجو، ولو لم يكن بخار الماء في طبقة التروبوسفير لانخفضت درجة الحرارة على سطح الأرض بشكلٍ كبير نتيجة الإشعاع الليلي. ويُعد بخار الماء الأساس في تشكل الغيوم والأمطار والثلوج، وعادةً ما يكون الهواء الرطب المحمل ببخار الماء أقل كثافة من الهواء الجاف عند درجة حرارة واحدة وضغط جوي واحد. أمّا الأوزون (O_3) فهو الصورة التي يتحول فيها الأكسجين من ذرتين إلى ثلاث ذرات، ونسبته غير ثابتة فهو يتغير بتغير الأحوال الجوية. وهو ينتشر من سطح الأرض وحتى ارتفاع 100 كم، ولكن يوجد 90% منه تحت مستوى 35 كم، ويصل أقصى تركيز له عند ارتفاع 25 كم من سطح الأرض، ويمكن تخيل الأوزون على هيئة طبقة رقيقة سمكها بالمتوسط نحو 4 مليمترات تغلف الكرة الأرضية على ارتفاع 25 كم تقريباً. وتشكل هذه الكمية على الرغم من صغرها درعاً واقياً وحماية هائلة للحياة على سطح الأرض، نظراً إلى أنّها تقوم بامتصاص جزء من الأشعة الشمسية فوق البنفسجية التي يتراوح أطوال موجاتها بين 200-300 نانومتر، ويمتص الأوزون ما يعادل 4% من كامل الطاقة الشمسية الواصلة إلى سطح الأرض. ويؤدي تناقص الأوزون إلى حدوث تغيرات جوية كبيرة أهمها زيادة المتوسط المناخي العالمي لدرجة الحرارة.

بنية الغلاف الجوي: قُسم الغلاف الجوي تبعاً للتغير في خصائصه الحرارية والتركيب الكيميائي والحركية والكثافة إلى خمس طبقات جوية (الشكل، 1).

الطبقة الجوية الأولى Troposphere: تبدأ هذه الطبقة اعتباراً من سطح الأرض وحتى ارتفاع يتراوح بين 8-14.5 كم، ويحدها من الأعلى سطح افتراضي يمثل المستوى الذي ينتهي عنده فيض الحرارة المنسابة من سطح الأرض إلى الجو، ويُسمى هذا السطح

بالتروبوبوز، الذي يتغير ارتفاعه تبعاً لاختلاف خطوط العرض والفصول، وقابلة للتمدد والتقلص ما بين 18 كم في خط الاستواء إلى 9 كم في القطبين.



الشكل رقم (1): طبقات الغلاف الجوي وتغيرات الحرارة رأسياً.

تنخفض درجة الحرارة مع الارتفاع عن سطح الأرض بمعدل 6.5 درجة مئوية للهواء المشبع, و10 درجات للهواء الجاف لكل 1 كم. وتنخفض درجة الحرارة بمقادير متباينة بين الرقمين السابقين تبعاً لنسبة الرطوبة الجوية (%) Relative humidity. تشتمل هذه الطبقة على 80% من كتلة الغلاف الجوي تقريباً، وتحتوي على 70-75% من بخار الماء الجوي، ما يفسر نشوء الظواهر المائية المختلفة وكل أنواع التكاثف، ويندر وجود بخار الماء فوقها. يتركز عند قاع هذه الطبقة كل النشاطات وتعمل المباني والأشجار والنباتات على خلط الهواء أثناء حركته ما يؤدي إلى انتشار الملوثات وتبعثرها، وعدم وصولها إلى القيم المهلكة بالقرب من مصادرها، كما تعمل على رفع نسبة بخار الماء والإسراع من عمليات التبخر فيزيد ما يحتويه الهواء من بخار وتزداد بالتالي احتمالات الهطول المطري.

الطبقة الجوية الثانية Stratosphere: تمتد هذه الطبقة من مستوى التروبوبوز وحتى ارتفاع 50-55 كم، هذه الطبقة خالية من الغيوم لعدم وجود بخار الماء فيها، تكون درجة الحرارة ثابتة في الجزء السفلي من هذه الطبقة ثم ترتفع الحرارة مع زيادة الارتفاع عن سطح الأرض بسبب ازدياد تركيز غاز الأوزون الجوي. ويبلغ معدل زيادة درجة

الحرارة بنحو 5 درجات لكل 1 كم. ويطلق على الطبقة التي يزداد فيها تركيز الأوزون اسم طبقة الأوزونوسفير، وتمتد من ارتفاع 20 كم وحتى 45 كم في المتوسط. وتصل درجة الحرارة إلى أقصى قيمة لها عند ارتفاع 35 كم تقريباً، ثمّ تتناقص تدريجياً مع تناقص الأوزون كلما ارتفعنا إلى أن نصل إلى ارتفاع 80 كم، حيث يندر وجود الأوزون، وينتهي تأثيره الحراري، فيتحدد السطح العلوي لهذه الطبقة وهو سطح افتراضي يطلق عليه اسم ستراتوبوز.

الطبقة الجوية الثالثة Mesosphere: تتوضع فوق طبقة الستراتوسفير، وتصل حدودها العليا حتى 80 - 90 كم، تنخفض الحرارة مع الارتفاع حتى تصل عند نهايتها إلى (-70حتى -80 مْ) وتكون كثافة الهواء قليلة وتتناقص لتصل حتى 0.02 غ/م^3 عند مستوى الميزوبوز.

الطبقة الجوية الرابعة Thermosphere: يطلق على هذه الطبقة أيضاً اسم ايونوسفير Ionosphere وتشتمل على طبقات داخلية يزداد فيها تركيز الأيونات حيث يوجد طبقة سمكها 25 كم بدءاً من ارتفاع 115 كم، وطبقة أخرى تمتد حتى ارتفاع 225 كم. وهذه الطبقات تعكس موجات الإذاعة واللاسلكي إلى سطح الأرض ما يجعلها مسموعة على نطاقات واسعة. وتمتد طبقة الثيرموسفير حتى ارتفاع 600 كم، وتزداد درجة الحرارة كلما ارتفعنا، إلا أنّ المحتوى الحراري لهذه الطبقة صغير بسبب صغر كثافة الهواء. ويرجع ارتفاع الحرارة فيها إلى امتصاص الإشعاع الشمسي الكثيف العالي الطاقة من قبل جزيئات الأكسجين الموجودة بكمياتٍ محدودة في هذه الطبقة، بالإضافة إلى سرعة حركة الجزيئات.

الطبقة الجوية الخامسة Exosphere: وفيها يندر وجود غازات الغلاف الهوائي، وتقدر درجة حرارتها حسابياً على أساس متوسط سرعة حركة جزيئات الهواء هناك، أما من الناحية الفعلية فإنّ درجة الحرارة في أعالي الإكسوسفير تقترب من الصفر المطلق، ولا تؤثر هذه الطبقة من الناحية الحرارية في جو الأرض.

2- الغلاف الأرضي Lithosphere: تُعد التربة الزراعية من أهم العوامل المؤثرة في نوعية الإنتاج الزراعي وكميته، وهي المهد الذي يمكن للبذور أن تنبت فيه، وللجذور أن تنمو وتنتشر فيه، وتمتص منه الماء والعناصر الغذائية المنحلة، الضرورية لنمو النباتات خلال مراحل النمو المختلفة. وتُعرّف التربة الزراعية Soil من وجهة نظر زراعة النباتات وإنتاجيتها بأنّها الطبقة السطحية من القشرة الأرضية الناتجة عن تحلل الصخور وتفتتها، أو من انحلال المواد العضوية الأرضية أو منهما معاً، على أن تكون هذه الطبقة

قادرة على تثبيت النباتات ومدّها بالماء والعناصر المعدنية المغذية Nutrients والهواء لتنفس الجذور. وهذه الطبقة مستمرة التحلل والتحول تبعا لتأثير العوامل الجوية والحيوية وغيرها. ويمكن التحكم بالتربة وذلك بتغير خواصها بعمليات الخدمة المختلفة، كالتسميد Fertilization، والرّي، وغيرها من العمليات التي تُحسّن من خواصها لتصبح صالحة لنمو النباتات وتطورها. وتقسم الأراضي الزراعية حسب نشأتها إلى قسمين:

أ- أراضٍ غير منقولة ثابتة Residual soils: وهي الأراضي التي تكونت من تفتت الصخور وتحللها بالعوامل الطبيعية المختلفة والكيميائية، وبقيت في مكانها وكونت التربة الزراعية. وعادةً ما تكون هذه الأراضي غير عميقة ومختلفة في محتواها الغذائي حسب طبيعة الصخر الأصلي التي تشكلت منه.

ب- أراضٍ منقولة Transported soils: وهي الأراضي التي تكونت من انتقال الصخور المتفتتة من مكانها الأصلي إلى مكان آخر بوساطة عوامل الطبيعة المختلفة كالرياح والثلوج ومياه الأمطار وغيرها.

وتتكون معظم الأراضي من ثلاث طبقات مميزة، تُسمى الأولى طبقة التربة السطحية، ويتراوح عمقها بين 20- 30 سم، تليها طبقة تحت التربة، والطبقة الثالثة وهي الأعمق قد تكون هي التربة الأم. تتشكل التربة بعمليات التجوية الميكانيكية والكيميائية، وبعملية تحلل البقايا النباتية والكائنات الحية الدقيقة الميتة في التربة. تقوم المياه أو الرياح أو الجليد أثناء عملية التجوية الميكانيكية بتحطيم الصخور الأم إلى قطع صغيرة، وتتحرر خلال عملية التجوية الكيميائية الأملاح المنحلة، ويتم حلمهة الكربونات والفيلدسبار والميكا، في حين تتم أكسدة المعادن الغنية بالحديد أو المنغنيز. وفي الترب التي تعيش فيها الكائنات الحية يتم تحفيز عملية التجوية باختراق جذور النباتات لشقوق الصخور، ومن خلال إفرازات النباتات والأحياء الدقيقة. تؤدي جميع هذه العمليات إلى توليد العناصر المعدنية الثانوية للتربة التي تتميز بسطوح داخلية كبيرة ذات شحنة سالبة وقدرة عالية على الادمصاص Adsorption، مثل الأكاسيد ومعادن الطين التي من أهمها (Kaolin, montmorillonite, Vermiculite, Illite). يتم تشكيل الدبال Humus نتيجة تحطم بقايا النباتات، وهو مادة عضوية ثابتة كيميائياً ذات لون غامق يتألف بشكلٍ أساسي من الكربون (44-58%)، والآزوت (0.5-4%)، والأكسجين (42-46%)، والهيدروجين (6-8%). تتحول البقايا النباتية إلى ليغنين وكيوتين ومواد دبالية بشكلٍ أساسي من حمض الفولفيك والهيوميك وذلك ضمن خطوات متتالية، ويعتمد معدل التحلل لهذه البقايا على عوامل كثيرة منها نوع النبات، والغطاء النباتي، ودرجة الحموضة، والعوامل المناخية.

تُعد التربة نظاماً متعدد الأطوار، حيث تتألف من الطور الصلب، والسائل، والغازي. وتتميز بمقدرة عالية على الامتصاص والاحتفاظ بالماء، وذات تأثير فيزيائي وكيميائي كبير. وتؤثر غرويات التربة في مقدرة التربة على الاحتفاظ بالماء Water holding capacity (WHC). ويؤثر مناخ التربة بشكلٍ كبير في أجزاء النبات الأرضية Roots.

عوامل المناخ Climate factors

أولاً- الإشعاع الشمسي Solar radiation: يُعرّف الإشعاع الشمسي بأنّه انتقال الطاقة الإشعاعية المنتشرة في الفضاء أو عبر وسط مادي بشكل موجات كهرطيسية تعادل سرعة الضوء (300 ألف كم . ثا$^{-1}$). وتُعد الشمس المصدر الرئيس لتزويد سطح الكرة الأرضية بالطاقة على شكل موجات كهرطيسية تنتشر في الفضاء بسرعة تعادل سرعة الضوء. ويُعبّر عن الطاقة الشمسية الواصلة عمودياً على مستوى الحد الخارجي للجو الأرضي بالثابت الشمسي، الذي يُستعمل قياساً لشدة الإشعاع الشمسي في الحدود الخارجية للغلاف الجوي بمعزل عن تأثيرات الجو الغازي والأرض، فهو إذاً عبارة عن كمية الطاقة الشمسية الواردة عمودياً من الشمس على وحدة المساحة من الأرض خلال وحدة زمنية معينة عندما تكون الشمس في بعدها الوسطي عن الأرض. وشدة الإشعاع الشمسي عبارة عن الطاقة الإشعاعية التي تصل إلى وحدة المساحة في وحدة معينة من الزمن. ويتألف الإشعاع الشمسي من موجات كهرمغنطيسية مختلفة الأطوال، ويقاس طول الموجة بالميكرون أو بالميليمتر أو بالأنغستروم .

التركيب الطيفي للإشعاع الشمسي: يتألف الإشعاع الشمسي من الأنواع التالية:

1) الأشعة المرئية: يتراوح طول موجاتها بين 0.4-0.76 ميكرون، وتبلغ نسبة الأشعة المرئية من الطيف في الحد الأعلى من الجو 46% من مجموع الأشعة الشمسية الواردة. وتتحلل هذه الأشعة إلى الألوان التالية: أحمر، برتقالي، أصفر، أخضر، أزرق فاتح، أزرق غامق، بنفسجي. ويعطي الجزء المرئي من الطيف الضوء، وبالتالي فإنّ الأشعة المرئية هي مصدر الضوء، وتجعلنا نرى الأشياء، وهي ضرورية للقيام بعملية التركيب الضوئي Photosynthesis من قبل النباتات الخضراء.

2) الأشعة تحت الحمراء: طول موجاتها بين 0.76-100 ميكرون، وتؤلف نسبة 47% من الطيف الشمسي، وهي غير مرئية، وتحدث أثراً حرارياً، لذلك يُطلق عليا بالأشعة الحرارية، لأنّها المصدر الرئيس الذي يزود الهواء والتربة والمياه بالحرارة اللازمة.

3) الأشعة فوق البنفسجية: طول موجاتها أقل من 0.4 ميكرون، وهي أشعة قصيرة الموجة، وتشكل 7% من الطيف الشمسي. والأشعة فوق البنفسجية ذات طول الموجة الأقل من 0.29 ميكرون لا تصل إلى سطح الأرض، إذْ يمتصها الأوزون بصورة كاملة.

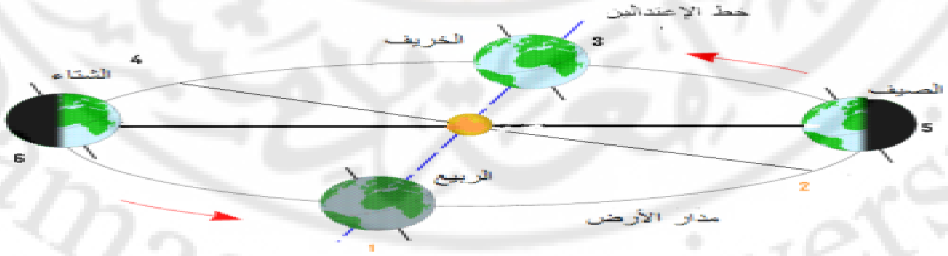
وهناك الأشعة السينية وأشعة غاما والأشعة الدقيقة الكهرطيسية واللاسلكية، بالإضافة إلى كمية قليلة من الجزيئات على شكل الكترونات وأيونات أخرى تنطلق من الشمس.

تُقسم العوامل الرئيسة المحددة لكمية الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض إلى عوامل فلكية وعوامل جوية وعوامل خاصة بالموقع.

أ- العوامل الفلكية: وتتضمن ما يلي:

1) **زاوية ورود أشعة الشمس:** كلما زاد ميل أشعة الشمس عن الوضع العمودي ضعف تأثيرها، بسبب انتشار الأشعة على مسافة أكبر من سطح الأرض، وازدياد المسافة التي تقطعها الأشعة في الجو، لذلك الأشعة الساقطة عمودياً أكثر شدةً وتركيز (منتصف النهار)

2) **طول النهار:** كلما زاد طول النهار زادت كمية الأشعة الشمسية التي تتلقاها الأرض، ونتيجة لانحراف محور الأرض وللحركة الظاهرية للشمس حول الأرض، فإنّ الفترة التي تبقى فيها الشمس ظاهرة في الأفق يختلف طولها من مكانٍ لآخر حسب موقع الأرض من الشمس، ففي فترة الانقلاب الصيفي في نصف الكرة الشمالي، فإنّ طول النهار يتزايد كلما اقتربنا من القطب الشمالي، ويحدث العكس في حالة الانقلاب الشتوي (الشكل، 2). وبسبب ثبات طول النهار في المنطقة الاستوائية فهو قريب باستمرار من 12 ساعة، لذا فإنّ كمية الأشعة التي تتلقاها تلك المنطقة ثابتة على مدار السنة، ويزداد الاختلاف بين طول الليل والنهار مع ازدياد درجات العرض أو البعد عن خط الاستواء.



الشكل رقم (2): الفصول في نصف الكرة الشمالي.

(21 آذار: الاعتدال الربيعي، 21 حزيران: الانقلاب الصيفي، 23 أيلول: الاعتدال الخريفي، 22 كانون أول: الانقلاب الشتوي)

ب- العوامل الجوية: وتتمثل بالعمليات الجوية الثلاث، وهي الانتثار، والانعكاس، والامتصاص.

1) الانتثار: المقصود بانتثار الأشعة هو تبعثرها أو تشتتها في اتجاهات مختلفة عند اصطدامها ببعض المركبات الجوية، ما يجعلها تصل إلى سطح الأرض من اتجاهات مغايرة للاتجاه الأصلي للأشعة. وتمارس المركبات الجوية (الغازية، والسائلة، والصلبة) مثل هذا التأثير في الأشعة الشمسية. ويتوقف انتثار الأشعة على النسبة بين نصف قطر الجسيمات في الجو وطول الموجات الإشعاعية، فعندما تكون أقطار الجسيمات أقل من أطوال الموجات الإشعاعية يحدث عندها انتثاراً انتقائياً للأشعة يتناسب مع نسبة نصف قطر الجسيمات إلى طول الموجات الإشعاعية. وهذا ما يحدث بشكل واضح في أواسط النهار عندما يكون الجو خالياً من المواد الصلبة كبيرة الحجم ومحتوياً على جزيئات يقل نصف قطرها عن 0.01 ميكرون، ما يجعل الأشعة الزرقاء من الطيف المرئي تتبعثر باتجاه الخلف مانحةً السماء لونها الأزرق المعتاد. أما إذا كان نصف قطر الجزيئات يتراوح بين 0.1 و 0.7 ميكرون، فإنّ الأشعة الحمراء تنتثر، ما يجعل السماء تبدو مشوبةً بالحمرة وهذا ما يحدث عند شروق الشمس وغروبها.

2) الانعكاس: في حال كون الجزيئات العالقة في الجو ذات أنصاف أقطار أكبر من طول موجات الأشعة القادمة من الشمس فإنّ الأشعة تتعرض لانعكاس عام وشامل لأنواعها كافة. وهكذا تنعكس الأشعة على سطوح الغيوم والجزيئات العالقة في الجو والمسطحات المائية واليابسة. وتتوقف نسبة المنعكس من الأشعة الشمسية على عاملين، هما طبيعة السطح العاكس، وزاوية سقوط الإشعاع الشمسي.

عموماً، تؤدي طبيعة الأرض ولونها ورطوبة التربة واستعمالات الأرض دوراً بارزاً في اختلاف انعكاس الأشعة الشمسية Reflection، وعادةً ما تكون كمية الأشعة المنعكسة من السطوح الملساء أكبر من السطوح الخشنة، وتعكس السطوح ذات الألوان الفاتحة كمية أكبر من الأشعة من السطوح ذات الألوان القاتمة/الداكنة. وتختلف نسبة الأشعة الشمسية المنعكسة تبعاً لاختلاف زاوية سقوط الأشعة، فكلما كانت الأشعة أشد ميلاً كانت نسبة الانعكاس أكبر. ولهذا نسبة الأشعة المنعكسة في ساعات الصباح أكبر منها في ساعات المساء، وفي خطوط العرض العليا والوسطى أكبر من السفلى. وتسمى الظاهرة اصطلاحاً بالألبيدو.

3) الامتصاص: تمتص بعض مركبات الجو والمواد العالقة فيه جزءاً كبيراً من الأشعة الشمسية غير أنّها ذات امتصاصية كبيرة للأشعة الأرضية، ويتوقف الجزء الممتص على

طول الموجة الإشعاعية من جهة وعلى نوعية المواد العالقة في الجو من جهة أخرى. فغاز الأوزون يقوم بامتصاص الجزء الأكبر من الأشعة فوق البنفسجية، ويمتص بخار الماء بشكلٍ كبير الإشعاع الأرضي وبشكلٍ أقل جزءاً من الطاقة الشمسية.

ج- العوامل المتعلقة بالموقع: يتغير الإشعاع الشمسي تبعاً للعوامل التالية:

1. درجة العرض للمكان: يزداد طول النهار في فصل الصيف ويقصر في الشتاء كلما ابتعدنا عن خط الاستواء في نصف الكرة الشمالي.

2. تغيرات الإشعاع مع الغطاء النباتي: تحجز الأوراق الخضراء الموجودة في الأجزاء العليا من النباتات كمية كبيرة من الأشعة التي تتلقاها، وهذا يتعلق بمسطح هذه الأوراق Leaf area، وترتيبها وزاوية توضعها على الساق، إذْ أنّ هذه الأوراق لا تسمح بمرور أكثر من 2-4 % من الأشعة الساقطة عليها.

3. تأثير طبقة المياه: يؤدي سطح المياه دوراً مهماً في امتصاص القسم الأكبر من الأشعة الواردة، وينعكس الباقي نحو الجو. وتؤدي سماكة المياه دوراً مهماً في هذا الانعكاس، وقد تصل الأشعة الحرارية حتى عمق 40 م.

4. تغيرات الإشعاع الشمسي مع الارتفاع: يزداد سطوع الأشعة الشمسية بزيادة الارتفاع عن مستوى سطح البحر، فشدة الإشعاع في مستوى سطح البحر تعادل 107000 لوكس. وتبلغ شدة الإشعاع على ارتفاع 3200 م عن سطح البحر 129000 لوكس، وهكذا يُلاحظ أنّ المناخ الجاف يمتاز بسطوع شمسي قوي وأكثر شدة من المناخ الرطب.

الإشعاع الأرضي: يتوقف هذا الإشعاع على طبيعة السطح ونوعيته (مسطحات مائية أو ترابية، منحدرات جبلية، أم سهول ووديان). وتعكس الأرض قسماً من الإشعاع الشمسي المباشر بمجرد تلقيها له وبذلك تصدر الأشعة الحرارية والضوئية. وبما أنّ حرارة الأرض أقل بكثير من حرارة الشمس، فإنّ الأرض تكون آخذة بصورة مستمرة، خصوصاً في الأيام الصافية لتصدر الإشعاع الأرضي ليل نهار بصورة دائمة.

الطاقة الحرارية المكتسبة في النهار (التسخين الحراري): يكتسب الهواء في النهار طاقة حرارية كبيرة إذْ ترتفع درجة حرارته ويسخن نتيجة امتصاص الأشعة الحرارية الواردة من الإشعاع الشمسي والإشعاع الأرضي. ويعمل الإشعاع الأرضي على رفع درجة حرارة الهواء، ويعود ذلك إلى عدم شفافية الجو تجاه هذا الإشعاع، حيث يحجزه ويمتصه ما يؤدي لارتفاع حرارة الهواء الملامس لسطح الأرض بالإضافة إلى التسخين من الإشعاع الشمسي المباشر، إذْ يمتص الغبار الجوي وبخار الماء الأشعة طويلة الموجة

وتبعثرها وتنشرها في كل الاتجاهات، ما يزيد الطاقة الحرارية المكتسبة. وتتناسب درجة حرارة سطح التربة عكسياً مع زاوية الورود للإشعاع الشمسي، وتتغير هذه الزاوية من الشروق إلى الغروب، إذْ تتناقص من الصباح وحتى الظهيرة، ثمّ تتزايد من الظهيرة وحتى المساء. وعليه فهي أعظمية عند الظهيرة، وبما أنّ الأرض تحتاج بعض الوقت لتشع حرارتها، لذلك فإنّ درجة الحرارة الأعظمية للهواء الملامس لها يكون نحو الساعة 14 أو 15 بعد الظهر.

الطاقة الحرارية المفقودة في الليل (التبريد الليلي): يعتمد الجو الأرضي على كسب حرارته في غياب الشمس من الإشعاع الأرضي، وهكذا تصبح الأرض جسماً مشعاً. ويتوقف هذا الفقدان الحراري على حال الطقس الخارجية والتباين الحراري بين الوسطين، الأرض باعتبارها جسماً مشعاً، والهواء الملامس لها. وبعبارةٍ أخرى، فإنّ محصلة الحرارة تكون سالبة في الليل، وهذا ما نسميه بالتبريد الحراري الذي يستمر حتى انبلاج النهار. ويُطلق على صافي الإشعاع الذي تفقده بالإشعاع الليلي.

الإشعاع الجوي: تصل إلى الغلاف الجوي الأشعة الصادرة من الإشعاع الأرضي، وهي أشعة حرارية طويلة الموجة غير مرئية، فترتفع درجة حرارة الجو عن طريق الإشعاع الشمسي الوارد من الفضاء الخارجي، والإشعاع الأرضي، والنشاطات الحرارية الأخرى التي تتم في الجو، وهذا يؤدي إلى سخونته، وبالتالي إلى إشعاعه إشعاعاً جوياً ذاتياً مصدره الجو نفسه. وهو يعتمد على الغازات المكونة له، وتبعاً لحالة غطاء الغيوم، تزداد هذه الحالة أو تنقص. ويقوم الجو في حالة زيادة غطاء الغيوم الذي يحجب الأشعة الشمسية بإصدار الأشعة ذاتياً على شكل جسم أسود مشع يرسل الأشعة الجوية غير المرئية طويلة الموجة إلى الأرض 70%، وإلى الفضاء الخارجي 30%. ويعود الدور الكبير في هذا الإشعاع إلى بخار الماء وغاز الفحم.

التوازن الإشعاعي في الجو:

الموازنة الإشعاعية = الإشعاع الشمسي المباشر+ الإشعاع الجوي+ الإشعاع التناثري - الإشعاع الفاقد.

الإشعاع الفاقد= الإشعاع الأرضي + الإشعاع المنعكس.

إذاً الموازنة الإشعاعية = إشعاع شمسي مباشر+ تناثري+ جوي - منعكس - أرضي.

وفي حالة الجو الغائم تصبح الموازنة كالآتي:

الموازنة الإشعاعية = إشعاع تناثري + جوي - منعكس - أرضي.

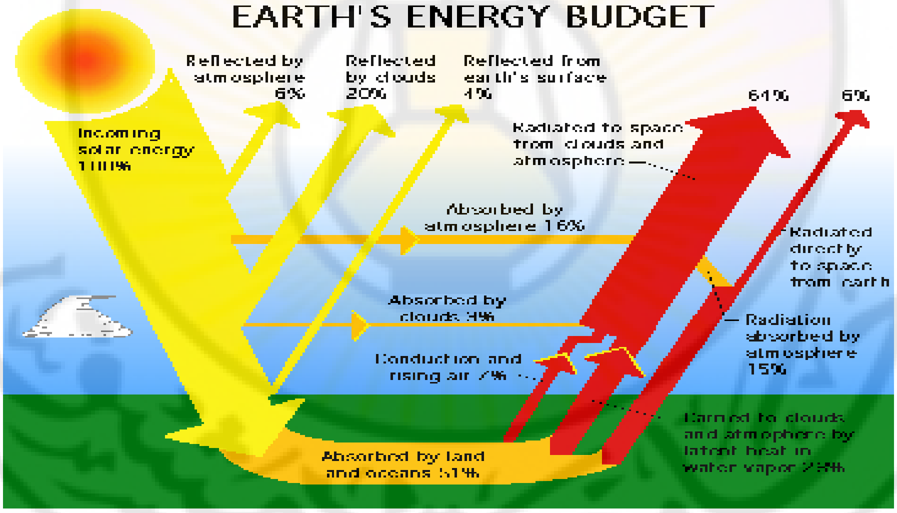
الموازنة الإشعاعية أثناء الليل = إشعاع جوي - إشعاع أرضي.

ويمكن تصوير الموازنة الإشعاعية كالآتي:

الإشعاع الصافي= الإشعاع الشمسي على الأرض – الإشعاع الأرضي.

الإشعاع الفعّال= (1- العاكسية) (الإشعاع الكلي) - (الإشعاع الأرضي+ الإشعاع الجوي).

ويتوقف هذا الإشعاع على النسبة (1- العاكسية) (الإشعاع الكلي)، فإذا كانت موجبة كان لدينا كسب حراري والعكس صحيح.



الشكل رقم (3): الموازنة الإشعاعية للأرض.

ثانياً- الحرارة Temperature

تُعد الشمس المصدر الرئيس للحرارة التي ترسل أشعتها المختلفة بموجات عبر الغلاف الجوي إلى سطح الأرض. والحرارة عبارة عن الأثر الذي تنتجه الأشعة الشمسية وبالذات الحرارية منها التي تزود الهواء الجوي والأرض بالحرارة اللازمة. وهي عبارة

Damascus University

عن القدرة الحرارية التي تنتقل من الجسم الساخن إلى الجسم البارد. وتؤثر الحرارة بصورة مباشرة أو غير مباشرة في العناصر الجوية الأخرى مثل التكاثف والتبخر وتشكل الضباب وهطول الأمطار والصقيع وغيرها، فتتحكم بذلك في توزيع المناخات، وبالتالي توزيع الغطاء النباتي الطبيعي والنباتات المزروعة على سطح الأرض. إنّ حرارة الهواء الجوي هي حصيلة الإشعاع الشمسي المباشر، والإشعاع الشمسي التناثري، والإشعاع الجوي الذاتي، والأشعة المنعكسة عن سطح الأرض، والإشعاع الأرضي، والحرارة الكامنة الناتجة عن التبخر.

طرق انتقال الحرارة: يتم التسخين الحراري، ولاسيما التسخين الجوي والأرضي بإحدى الطرق التالية:

1- **التماس أو التوصيل الحراري:** تنتقل الحرارة بالتلامس أو بالتوصيل. ويتمثل الشرط الأساسي لانتقالها بهذه الطريقة وجود الوسط المادي لتنتقل الحرارة في أجزاء المادة من ذرة إلى أخرى. وهكذا يسخن الهواء الملامس لسطح الأرض بالتوصيل، ففي حال ارتفاع درجة حرارة التربة عن الهواء الملامس لها تفقد جزءاً من هذه الحرارة بالتماس لتسخنه، وبالعكس في حال شدة سخونة الهواء الجوي بالمقارنة مع سطح التربة فإنّ الحرارة تنتقل من الهواء إلى التربة. ونظراً إلى أنّ الهواء ذو ناقلية رديئة، لذلك فإنّ التوصيل الحراري في الهواء بطيء يتم لعدة أقدام فقط خلال النهار أو ليلة واحدة.

2- **الحمل أو الإزاحة:** بما أنّ الهواء الدافئ أقل كثافة من الهواء البارد لذلك يتصاعد فوقه لخفته، ويتمدد مصطحباً معه الحرارة التي اكتسبها من الأرض إلى الأعلى ليحل محله الهواء البارد وهكذا دواليك. وهذا النوع من الانتقال الحراري مهم في الهواء والسوائل لأهميته في نشوء الظواهر الجوية.

3- **الإشعاع:** تنتقل الحرارة بهذه الطريقة على شكل موجات دون الحاجة إلى وسط ليتم الانتقال فيه كما في انتقال أشعة الشمس التي تصل إلى سطح الأرض عبر الفراغ المحيط، وكذلك الإشعاع الأرضي طويل الموجة الذي يُسهم في زيادة درجة حرارة الجو.

تغيرات درجة الحرارة: تتغير درجة الحرارة بتأثير عدة عوامل أهمها:

1- **التغيرات اليومية:** تتأثر درجة الحرارة بساعات النهار المختلفة اعتباراً من الشروق وحتى الغروب، حيث يبدأ الميزان الحراري اليومي بالارتفاع مع شروق الشمس، وتبدأ التربة بتخزين الحرارة بدلاً من فقدها، فتبدأ درجة حرارة الهواء الجوي بالارتفاع إلى أن يحصل شبه اتزان بين المدخر من الأشعة الواردة والفاقد منها بالإشعاع الأرضي، وبعد الظهيرة يتغير الميزان الحراري، حيث تبدأ أشعة الشمس بالاتجاه نحو المغيب فتقل

الحرارة المكتسبة، وتنخفض بالتالي درجة الحرارة. ويجدر الانتباه إلى أنّ معدل تناقص درجة حرارة الهواء الجوي أثناء النهار تتعلق إلى حدٍ كبير بالإشعاع الأرضي، وبذلك تكون محصلة درجة حرارة الهواء ناتجة من الإشعاع الشمسي والأرضي، حيث يبلغ الإشعاع الشمسي أقصى حد له وقت الظهيرة أثناء النهار، في جين يبلغ الإشعاع الأرضي أقصى حد له بعد الظهيرة بساعتين إلى ثلاث ساعات.

2- الارتفاع عن سطح الأرض: تتناقص درجة الحرارة بالارتفاع خصوصاً في الطبقة الجوية الأولى، إلاّ أن معدل التناقص بالارتفاع يتعلق بعوامل عديدة أهمها سرعة الرياح والرطوبة النسبية في الهواء المحيط وحجم الغيوم المتكونة. وبذلك يكون التناقص في الجو الملبد بالغيوم أقل مما هو عليه في الجو الصافي، وفي فصل الشتاء أقل مما هو في الصيف، وفي الليل أبطأ منه في النهار. ويكون التناقص الحراري بالارتفاع أبطأ على الهضاب منه على الجبال، وفي المناطق الرطبة أقل مما هو عليه في المناطق الجافة. ويعود السبب الرئيس لهذا التناقص إلى قلة كثافة الهواء وانخفاض الضغط.

3- تغيرات الحرارة بحسب الموقع: تتغير درجة الحرارة حسب الموقع نتيجة لما يلي:

أ- تأثير درجة العرض للمكان: من الملاحظ تناقص درجة الحرارة كلما ابتعدنا عن خط الاستواء باتجاه القطبين الشمالي والجنوبي، ويعود ذلك إلى أنّ الأشعة الشمسية الواردة إلى القطبين تصل بصورة مائلة وتخترق طبقات سميكة من الغلاف الجوي، وبذلك تفقد قسماً من طاقتها بالامتصاص بينما تسقط فيه الأشعة عمودياً على خط الاستواء.

ب- التضاريس واتجاهها: يؤدي اتجاه التضاريس دوراً بارزاً في التأثير في درجة الحرارة، فالسفوح المعرّضة مباشرةً لأشعة الشمس تكون أكثر تلقياً للطاقة الشمسية، وبالتالي أكثر حرارة من السفوح المعاكسة للشمس، أي تتلقى السفوح الجنوبية والغربية حرارة أكثر من السفوح الشرقية والشمالية.

ج- الجو القريب من التربة: بما أنّ درجة الحرارة تختلف من مكانٍ لآخر مع ساعات النهار من الشروق وحتى الغروب وخلال الليل أيضاً، لذلك فالجو الأرضي القريب من سطح التربة والملامس لها يؤدي إلى وجود تباين في درجات الحرارة اليومية فوق سطح التربة. ويُلاحظ أنّ التباين الحراري كبير بجوار التربة ويزداد أكثر كلما اقترب من سطح التربة ولامسه، ويقل كلما ابتعدنا عن سطح التربة.

د- سطح الأرض والسطوح المائية: إنّ امتصاص سطح الأرض للأشعة الشمسية الواردة واللازمة لتسخين الطبقة السطحية من التربة أكبر مما هي عليه في السطوح المائية

كالمحيطات والبحار التي تستهلك طاقة حرارية في عملية التبخر، بسبب ارتفاع قيمة الحرارة الكامنة للماء.

هـ- الغطاء النباتي: يؤثر الغطاء النباتي بأنواعه المختلفة من المروج والأعشاب والحشائش إلى الشجيرات والأشجار في تعديل درجة حرارة الهواء المحيط في مناطق انتشار نباتات هذا الغطاء، ولاسيما أنّ عملية النتح Transpiration (T) تعمل على تلطيف الجو بزيادة نسبة الرطوبة الجوية، واستهلاكها مع التبخر Evaporation (E) كمية لا بأس بها من الأشعة الحرارية الواردة للأرض. وبذلك يكون جو مناطق التشجير المثمر والحراجي أكثر اعتدالاً من المناطق الأخرى كالمراعي أو الأراضي المكشوفة.

4- التغيرات الفصلية والسنوية: يتغير طول النهار بتغير فصول السنة، ويختلف تبعاً لهذا التغير التخزين الحراري للأرض، وبما أنّ طول النهار يتوقف على درجة عرض المكان فيزداد طول النهار على حساب الليل في الصيف والعكس في الشتاء، ما يعني تأثر درجة الحرارة بفصول السنة الأربع التي تنجم عن دوران الأرض حول الشمس. ونظراً إلى ميلان الأرض على مسارها فإنّ زاوية الورود تختلف من مكان لآخر، ما يؤدي إلى زيادة درجة الحرارة في بعض المناطق ونقصانها في المناطق الأخرى على مدار السنة.

5- الرياح: تتأثر درجة الحرارة بالرياح الموجودة التي تعدلها تبعاً لدرجة حرارتها ومناطق هبوبها. تؤدي الرياح القادمة من المناطق الحارة إلى رفع درجة الحرارة وزيادة الدفء، وتؤدي الرياح الواردة من المناطق القطبية إلى خفض درجة الحرارة والبرودة.

أهمية الحرارة في النشاط الحيوي للنباتات الزراعية:

تحدث جميع العمليات الفيسيولوجية في النبات من تركيب ضوئي وتنفس Respiration في نطاق محدد من درجات الحرارة، حيث يوجد حد أدنى بيولوجي يبدأ عنده نشاط النبات، ثمّ يزداد حتى يبلغ أشده في الظروف الحرارية المثالية والمناسبة لنموه. وتختلف الشروط الحرارية من نبات لآخر، فمثلاً الحد الأدنى الحيوي (الصفر البيولوجي) لنمو معظم المحاصيل الشتوية يقع بين 3-5ْم، في حين يقع في المحاصيل الصيفية بين 12-15ْم. وتبدي درجة حرارة التربة تأثيراً كبيراً في نمو المجموع الجذري، ونشاط الكائنات الحية الدقيقة، ويسبب انخفاض حرارة التربة بشكلٍ كبير تجمد المجموع الجذري وموت خلاياه، وبالتالي موت النبات بالكامل. وكذلك تؤدي حرارة التربة المرتفعة إلى فساد الجذور الدرنية لبعض المحاصيل، مثل البطاطا والشوندر السكري على سبيل المثال، وانتشار الآفات الزراعية المحبة للدفء. وبالمقابل فإنّ ارتفاع حرارة الهواء المحيط بالنبات تزيد من معدل فقد المياه بالنتح نتيجة زيادة فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط، فتتعرض النباتات للجفاف والذبول، ما يؤدي إلى انخفاض الإنتاج الزراعي كماً ونوعاً.

ثالثاً- الضغط الجوي Atmospheric pressure

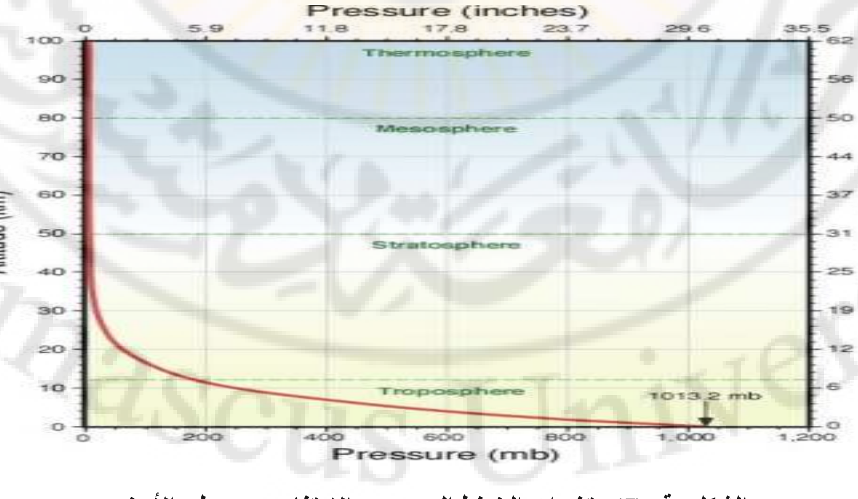
يُعرّف بأنّه عبارة عن وزن الجو في وحدة المساحة، أي عبارة عن القوة المؤثرة في وحدة مساحة السطح المعرّض للضغط نتيجة تصادم جزيئات الهواء بصورة عمودية عليه. وتتوقف القوة التي يضغط بها الهواء الجوي على الموقع على طول عمود الهواء الذي يتناقص مع الارتفاع فتتناقص معه هذه القوة، والهواء الجوي بما فيه من غازات قابلة للتمدد والانتشار يحاول بضغطه الحصول على أكبر مساحة ليشغلها في الغلاف الجوي.

تغيرات الضغط الجوي: تؤثر في الضغط الجوي مجموعة من العوامل تجعله متغيراً، ولولاها لبقي الضغط واحداً ومتساوياً، ولما حدثت الرياح المتباينة في الشدة والاتجاه والزمن، ولبقي الجو ساكناً، أهم هذه العوامل:

1- تغيرات الضغط الجوي مع الارتفاع: يتناقص الضغط الجوي مع الارتفاع فوق سطح الأرض، ويُلاحظ أنّ معدل تناقص الضغط الجوي مع الارتفاع غير ثابت، ويتوقف على درجة الحرارة والرياح وكثافة الهواء.

2- تغيرات الضغط الجوي مع الحرارة: يمتاز الهواء البارد بازدياد ضغطه الجوي، في حين يمتاز الهواء الدافئ بانخفاض ضغطه الجوي، لأنّ الهواء البارد ينقص حجمه، ويزداد ثقله، وتزداد كثافته مع انخفاض حرارته، ويحدث العكس في حالة الهواء الدافئ.

3- تغيرات الضغط الجوي مع الرطوبة: يزداد الضغط الجوي في الجو الجاف، ويقل في الجو المشبع بالرطوبة، لأنّ كثافة الهواء الجاف أكبر من كثافة الهواء الرطب. وكلما زادت نسبة بخار الماء في الهواء قلَّ ضغطه.



الشكل رقم (5): تغيرات الضغط الجوي مع الارتفاع عن سطح الأرض.

4- اليابسة والمحيطات: يزداد الضغط الجوي فوق سطح اليابسة في الشتاء، وينخفض في الصيف، في حين يزداد فوق المسطحات المائية في الصيف، وينخفض في الشتاء.

5- التغيرات اليومية: تخضع التغيرات اليومية للضغط الجوي للتأثيرات المحلية في الضغط مثل المرتفعات أو المنخفضات الجوية. وأكثر ما تكون هذه التغيرات الجوية واضحة في المناطق الاستوائية تليها خطوط العروض المتوسطة، وتنعدم في القطبين. ويتوقف التغير اليومي للضغط على الأيام الصاحية والأيام المضطربة، ويتوقف كذلك على درجة العرض للمكان وفصول السنة، وبصورة عامة يمكن القول إنّ الحد الأدنى للضغط الجوي يكون في الساعة 14 بعد الظهر، والحد الأقصى في الساعة 4 صباحاً.

اختلاف الضغط الجوي: للمكان تأثير كبير في الضغط الجوي فنجد بعض الأماكن ضغطها مرتفع وأماكن أخرى ضغطها منخفض تبعاً للظروف المتوافرة، وبشكلٍ خاص الظروف الحرارية. ومن الملاحظ أنّ اختلافات الضغط الجوي السنوي تكون قليلة جداً قرب خط الاستواء وتباين الضغوط يزداد كلما اتجهنا نحو القطبين. ففي فصل الشتاء يوجد في نصف الكرة الشمالي ضغط جوي مرتفع فوق سيبيريا وأمريكا الشمالية وضغط جوي منخفض فوق بعض جزر المحيط الهادي، وفي فصل الصيف يوجد في نصف الكرة الشمالي ضغط جوي منخفض في شمال الهند وفي أمريكا الشمالية، وضغط جوي مرتفع فوق المحيط الأطلسي والهادي، ويمكن تمييز ثلاث مجموعات من الضغوط الجوية:

- القارية: ويكون فيها الضغط المرتفع في الشتاء، والمنخفض في الصيف.

- المحيطية: ويكون فيها الضغط المرتفع في الصيف، والمنخفض في الخريف.

- القطبية وفوق القطبية: ويكون فيها الضغط المرتفع في الربيع، والمنخفض في الشتاء.

رابعاً- الرياح Wind

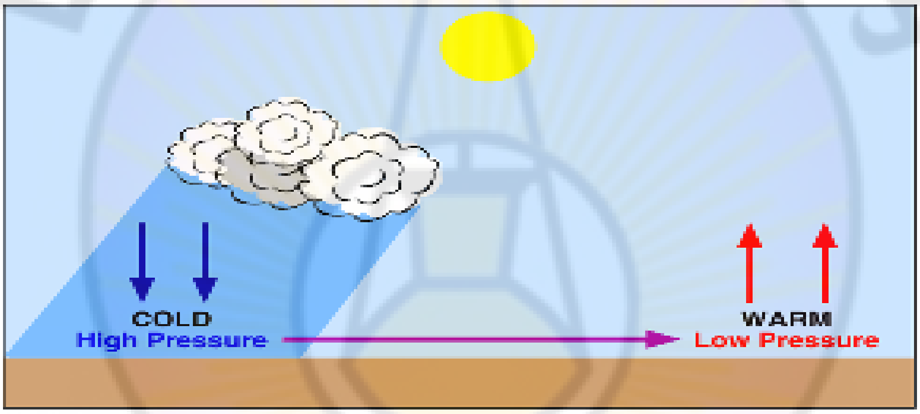
يختلف الضغط الجوي من مكانٍ لآخر ومن منطقة لأخرى، كما وتؤثر درجة الحرارة تأثيراً كبيراً في توزيع الضغط الجوي على سطح الأرض، ومن الملاحظ أنّ الهواء الجوي الملامس للأرض عندما يسخن يتمدد ويرتفع للأعلى في الجو مشكلاً تيارات صاعدة، في حين يبرد هذا الهواء الصاعد فيهبط نتيجة لزيادة كثافته مشكلاً تيارات هوائية هابطة. وتُعاد العملية من جديد مشكلة حركة للهواء بملامسة سطح الأرض ابتداءً من المنطقة الباردة نحو المنطقة الحارة فتشكل بذلك دورة هوائية تتجه من المنطقة الباردة إلى

المنطقة الحارة (الشكل، 4). فالرياح إذاً عبارة عن الحركة الأفقية للهواء ما بين مكانين مختلفين في الضغط الجوي، والرياح غير مرئية إنما يستدل عليها من الظواهر والآثار التي تحدثها وتكون على نوعين:

1- الرياح العلوية: وتوجد في أعالي الجو.

2- الرياح السطحية: وتوجد بالقرب من سطح الأرض.

وتُعبِّر الجهة التي تصدر منها الرياح عن اتجاهها فيطلق على الرياح التي تهب من الغرب الرياح الغربية، والتي تهب من الشرق الرياح الشرقية.



الشكل رقم (4): حركة الهواء في الجو.

العوامل المؤثرة في الرياح: تؤثر عفي حركة الرياح مجموعة من العوامل أهمها:

1- التغيرات اليومية: من الملاحظ أنّ سرعة الرياح تكون عالية في النهار أكثر من الليل.

2- التغيرات الفصلية: وتأخذ هذه التغيرات طابعاً موسمياً كما في الهند، حيث تهب عليها الرياح الجنوبية الغربية في الصيف، والرياح الشمالية الشرقية في الشتاء.

3- التغيرات مع الارتفاع: تزداد سرعة الرياح مع الارتفاع عن سطح البحر.

4- تغيرات الرياح مع التضاريس: نلاحظ في مناطق السفوح والهضاب أو المرتفعات التي تتفاوت في ارتفاعها وانحدارها نشوء رياح محلية خاصة.

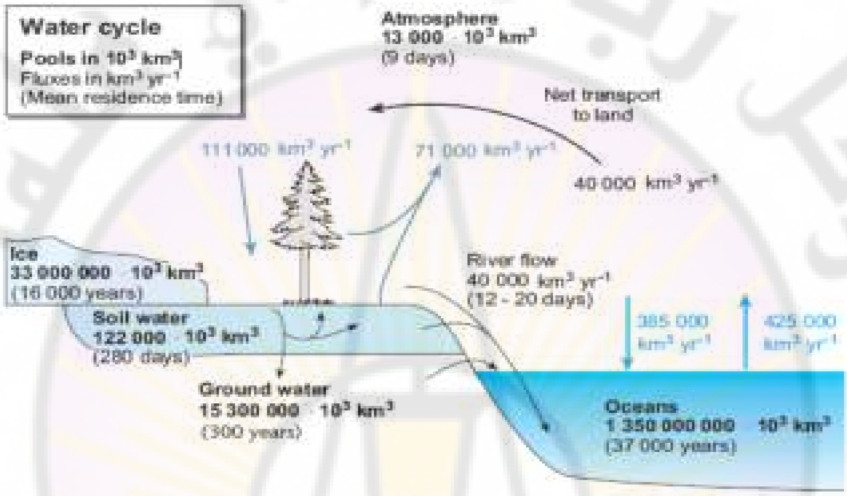
تأثير الكتل الهوائية في الأحوال الجوية: يتحدد مسار الأحوال الجوية وطبيعتها في مكان ما من خلال حالات الضغط الجوي المرتفع والمنخفض، التي تنشأ وتتطور ثمّ تنتقل أو تبقى في مكانها فترة طويلة مستقرة، كذلك الحال بالنسبة إلى لكتل الهوائية التي تحمل صفاتها الحرارية والرطوبية إلى المناطق التي تتجه نحوها، حيث غالباً ما تسيطر الكتلة الهوائية نفسها، وعلى مدى عدة أيام على حالة الطقس في منطقة ما. يحصل التبدل في الأحوال الجوية نتيجة تبدل الكتل الهوائية التي تأخذ صفات مناطق نشوئها، إضافة لتأثير السطوح التي تمر فوقها وخط العرض الجغرافي، وهذا يعني أنّ منطقة مصدر الكتل الهوائية ومسارها يعطينا صورة واضحة عن صفات الطقس المتوقع وطابعه. وهناك مناطق تتأثر بنوع واحد من الكتل الهوائية كما هو الحال في الأجزاء الجنوبية من الصحراء الكبرى التي تتأثر بالكتلة المدارية القارية مسببةً استمرار الطقس الحار الجاف، في حين نجد أنّ مناطق عديدة في العالم تتأثر بأكثر من نوع من الكتل الهوائية كما هو الحال في سورية التي تخضع لسيطرة الكتل القطبية في فصل والمدارية في فصل آخر. وكثيراً ما تتداخل الكتل القطبية في العروض الوسطى بالكتل المدارية مؤدية لحدوث اضطرابات جوية تبدو واضحة التأثير في الأحوال الجوية في نصف السنة الشتوي.

خامساً- الرطوبة الجوية والهطولات المطرية Humidity and precipitation

يُعد الماء من أهم العوامل المناخية التي تؤثر في العمليات الرئيسة في الكائنات الحية، فهوا لعنصر المهم الذي يساعد على تزويد النبات بالعناصر المعدنية، ويؤثر في صفات النبات وفيسيولوجيته، وفي توزع الغطاء النباتي عامةً. يُدعى بخار الماء الموجود في وحدة الحجم من الهواء بالرطوبة المطلقة Absolute humidity، ويُعبّر عنها كنسبة مئوية من بخار الماء الموجود في وحدة الحجم من الهواء عند درجة حرارة معينة. وإنّ كمية بخار الماء المطلوبة لإشباع وحدة الحجم نفسها من الهواء تحت ظروف فيزيائية ثابتة تدعى الرطوبة النسبية (Relative humidity (RH%.

يصل الماء من الغلاف الجوي إلى سطح الأرض من خلال الهطول المطري Precipitation، ويعود من سطح الأرض إلى الغلاف الجوي من خلال التبخر والنتح، لذلك فإنّ دورة المياه Water cycle مستمرة من الأرض إلى الغلاف الجوي (الشكل،5). لقد قدر بأنّه قرابة 80000 ميل مكعب من الماء من المحيطات، و1500 ميل مكعب من الماء من البحيرات، وسطح الأرض يتبخر سنوياً. إنّ التبخر الكلي يعادل الهطول المطري

الكلي ومن هذا المجموع نحو24000 ميل مكعب من الماء يسقط على سطح الأرض سنوياً. تؤثر الرطوبة الجوية والهطولات المطرية بشكلٍ مباشر في نمو النباتات وتطوره، وفي توزع المزروعات والغطاء النباتي بشكلٍ عام.



الشكل رقم (7): دورة الماء في الطبيعة.

هناك ترابط وثيق بين نوعية الغطاء النباتي السائد في منطقة ما وكثافته وما بين كمية الأمطار الهاطلة سنوياً وتوزعها الفصلي، حيث تسود الغابات في المناطق وفيرة الأمطار، التي يزيد معدل أمطارها السنوية عن 800 مم، في حين تسود الحشائش والأعشاب في المناطق من العالم التي تتراوح أمطارها بين 250-800 مم، التي تشكل مناطق زراعة المحاصيل الحقلية الرئيسة كالحبوب Cereals بأنواعها المختلفة، في حين نجد أنّ المناطق التي تقل أمطارها عن 250 مم تشكل بوجه عام الصحارى في العالم ذات النباتات المحدودة المتمثلة ببعض الأعشاب الحولية Ephemerals، وبعض أنواع الشجيرات المتكيفة مع ظروف المناخ الجاف. وإنّ لكمية الأمطار السنوية أهمية كبرى في توفير المياه الضرورية اللازمة للزراعة، فهي تزود التربة بالرطوبة التي يحتاجها النبات في نموه وتطوره، لذا فإنّه باختلاف كمية الأمطار السنوية تختلف كمية مياه التربة المتوافرة للنبات وتختلف بالتالي نوعيته وإنتاجيته، وبما أنّ لكل محصول من المحاصيل الزراعية متطلباته المائية التي تتوافر له بالدرجة الأولى وبشكل مباشر عن طريق الأمطار الهاطلة (الجدول، 2)، لذا يمكن على ضوء ذلك تحديد المناطق الزراعية النوعية

المناسبة لكل نوع محصولي. وكلما ازدادت كمية الأمطار الهاطلة، ازدادت كمية المياه المخزنة في التربة والمتاحة للنبات، التي يمكن الحفاظ على قسم كبير منها ببعض العمليات الزراعية، مثل عدم الحراثة، والتغطية المستمرة لسطح التربة بالبقايا النباتية، بحيث تكفي لتأمين الاحتياجات النائية لنباتات بعض المحاصيل الزراعية تحت ظروف الزراعة المطرية (البعلية) Rainfed conditions.

الجدول رقم (2): كمية الهطول اللازمة لإنتاج محصول اقتصادي لأهم الأنواع المحصولية.

المحصول	الهطول المطري (مم)	
	للإنتاج الأدنى	للإنتاج الأعلى
الشعير	185	500
القمح	200	500
العدس	300	600
القطن	375	800
الحمص	400	700
عباد الشمس	400	800
الفول	450	1000
فول الصويا	500	1000
التبغ	400	1000
الفصة	600	1200
البطاطا	550	1000
الشوندر السكري	550	1000
الذرة الصفراء	800	1400

Damascus University

الفصل الثاني

تأثير العوامل البيئية في نمو النباتات وتطورها وإنتاجيتها

Effect of environmental factors on plants growth, development and productivity

يُعد علم البيئة Ecology أحد أهم العلوم الحيوية الذي يختص بدراسة العلاقة بين الكائنات الحية والعوامل الموجودة في البيئة، ويدرس علم البيئة العلاقة بين الإنتاج الزراعي والعوامل البيئية، حيث يتأثر الإنتاج الزراعي في منطقة ما بالظروف البيئية السائدة في المنطقة. تُقسم العوامل البيئية المؤثرة في النباتات إلى عوامل مناخية Climatic factors، وعوامل التربة Soil factors، وعوامل حيوية Biological factors، وهي تمثل مجموعة العوامل البيئية على المدى الطويل؛ أي تأثير المناخ مثل الشتاء البارد والصيف الحار، بحيث تحدد المحاصيل الممكن نجاحها في أو فشلها منطقةٍ معينة، أما عوامل البيئة على المدى القصير، فتعرف بعوامل الطقس Weather factors. عموماً تؤثر العوامل البيئية في نمو النباتات وتطورها وإنتاجيتها حسب شدتها وفترة بقائها في الحقل أو خلال موسم النمو.

أولاً- العوامل المناخية Climatic factors

من أهم العوامل المناخية التي تؤثر في النباتات الضوء، والحرارة، والرطوبة، والرياح، والهواء.

1- الضوء Light: تُعد الشمس المصدر الرئيس للطاقة على الأرض، ويخترق الإشعاع الشمسي الكون الخارجي على شكل موجات كهرومغناطيسية، وتقوم طبقة الأوزون المغلّفة للكرة الأرضية بامتصاص الإشعاعات الضارة للنبات والإنسان، وتمتص السحب جزءاً من الإشعاعات ليصل الباقي إلى النبات الذي يستفيد منه بنحو1 – 5% فقط من كامل الطاقة الشمسية (الشعة الفعّالة في عملية التمثيل الضوئي) للقيام بعملياته الحيوية التي تحتاج إلى ضوء، وخاصةً عملية التمثيل الضوئي. إنّ الضوء الذي يمتصه النبات هو الضوء المرئي، وهو الجزء من الإشعاع الشمسي الذي تدركه الأبصار، الذي يتراوح طول موجاته بين 400 – 700 نانومتر. وتحوّل النباتات هذه الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية محزونة في روابط المركبات العضوية، أثناء عملية التمثيل الضوئي. ويمتص كلوروفيل النبات الألوان الزرقاء (Chlorophyll a) والحمراء (Chlorophyll b) (Chlorophyll)

وتعكس باقي الألوان ولا يستفيد النبات إلاّ من جزء ضئيل من هذه الألوان، وللضوء تأثيرات عديدة في النبات نوجزها فيما يلي:

1- يؤدي الضوء دوراً مهماً في تطور البلاستيدات الخضراء وإنتاج اليخضور Chlorophyll.

2- يدخل في عملية التمثيل الضوئي مصدراً للطاقة.

3- يتزايد نمو النباتات نتيجة للضوء الأزرق والأحمر.

4- تؤثر الموجات الضوئية في توزيع الأوكسينات، ومن ثمّ يؤثر ذلك في عملية النمو والانتحاء وتكوين هرمونات الإزهار.

5- يؤثر الضوء في فتح المسامات Stomata وإغلاقها، وبالتالي في عملية فقد المياه بالنتح.

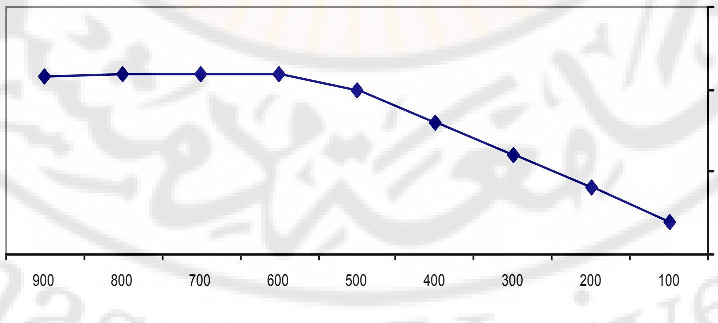
6- يتأثر التركيب التشريحي للنبات باختلاف شدة الضوء، فالنباتات المحبة للشمس تتميز بوجود طبقات من النسيج العمادي وطبقة بشرة سميكة Thick epiderm مع وجود شعيرات أو زغب على السطح الخارجي بالمقارنة مع النباتات المحبة للظل.

يختلف تأثير الضوء من حيث نوعية الضوء Light quality، وشدة الإضاءة Light intensity وفترة الإضاءة Light duration.

أ- نوعية الضوء Light quality: يختلف تأثير الضوء في نباتات المحاصيل حسب نوعية الضوء، أي مكوناته من الألوان المختلفة وطول الموجة الضوئية. وتختلف نوعية الضوء من حيث الموسم والموقع الجغرافي، اللذان يؤثران في زاوية سقوط الضوء على سطح الأرض، وعلى طول الموجة الضوئية. عموماً، الإشعاعات القصيرة من الضوء تُمتص من خلال طبقة الأوزون، والإشعاعات الطويلة تُمتص من خلال السحب وبخار الماء. كما تؤثر الأتربة والدخان في الجو في باقي الموجات الضوئية. إنّ الضوء ذا اللون الأزرق أو الأحمر من أهم الألوان التي تمتصها البلاستيدات الخضراء، في حين تنعكس الألوان الأخرى. تعكس النباتات الأشعة الضوئية الخضراء أو تنفذها، ولا تُستعمل كثيراً في عملية التمثيل الضوئي. ويلاحظ أنّ ألوان الضوء تؤثر في عمل الأكسينات، كذلك نجد أنّ الأشعة الزرقاء تساعد في تكوين اللون الأحمر في بعض الثمار (مثل التفاح)، أما بالنسبة إلى لنمو فالأشعة فوق البنفسجية تُعد ضارة، وتؤدي إلى تقزم النباتات، ولها تأثير سلبي في النباتات النامية على قمم الجبال، في حين تُسرع الأشعة الحمراء قصيرة الموجة

من إنبات بذور بعض الأنواع النباتية (بذور الخس مثلاً)، في حين تؤثر الشعة الحمراء طويلة الموجة سلباً في إنبات البذور.

ب- شدة الإضاءة Light intensity: وهي كمية الضوء الساقط على مساحة معينة خلال فترة زمنية معينة. وتُقاس بوحدات مختلفة أهمها الشمعة الضوئية، وهي تعادل كمية الضوء الساقط على السطح من شمعة قياسية على بعد 1 قدم. وهناك وحدات أخرى مثل اللكس Lux، وهو كمية الضوء المرئي الساقط على مساحة 1م^2 ويبعد 1م عن مصدر الضوء (1 لكس= 0.093 شمعة . قدم$^{-1}$). وتختلف شدة الضوء باختلاف الموقع وعلاقته بخطوط العرض على سطح الكرة الأرضية. فزاوية سقوط الإشعاع الشمسي رأسية على خط الاستواء، وتميل كل ما ابتعدنا شمالاً أو جنوباً، وبالتالي يتوزع الإشعاع على مساحة أكبر من سطح الأرض. كذلك توثر سماكة الغلاف الجوي في امتصاص الأشعة الضوئية وتشتتها، حيث تقل سماكة الغلاف فوق خط الاستواء وتزداد عند القطبين، لذا تكون المسافة خلال الكتلة الهوائية التي تخترقها الأشعة عند القطبين أطول بكثير من المسافة التي تقطعها الأشعة فوق المنطقة الاستوائية (45 مرة) ما يزيد الفقد. وتحتاج النباتات على الأقل من 100 – 200 شمعة . قدم$^{-1}$ لكي تنمو، ولهذا تزداد كمية المواد الكربوهيدراتية المتكونة في النباتات بزيادة شدة الضوء حتى تصل إلى حدها الأقصى (الشكل6). وتصل شدة الضوء إلى نحو 8000 – 10000 شمعة . قدم$^{-1}$ في فصل الصيف حسب المنطقة. ويُعرف هذا الحد الأقصى بنقطة تشبع الضوء Light saturation point، وهي كمية الضوء التي لا يحدث بعدها أي زيادة في كمية المواد الكربوهيدراتية، وتختلف نقطة التشبع الضوئي من نوع محصولي لآخر، وتتراوح بين 500– 10000 شمعة . قدم$^{-1}$.



الشكل رقم (6): يوضح العلاقة بين شدة الضوء وكمية الكربوهيدرات المصنعة.

Damascus University

ويمكن تقسيم النباتات من حيث استجابتها للشدة الضوئية إلى ما يلي:

(1)- نباتات محبة للضوء: وتحتاج على الأقل إلى 3000 شمعة ضوئية، وتنتمي معظم المحاصيل الحقلية الاقتصادية إلى هذه المجموعة.

(2)- نباتات محبة للظل: وتحتاج إلى كمية ضوء أقل من 500 شمعة ضوئية، ومن أمثلتها نباتات الزينة. وإذا قلّت شدة الإضاءة عن 100 – 200 شمعة يؤدي هذا إلى تقليل معدل التمثيل الضوئي، بحيث تقل نواتج التمثيل الضوئي عن الكمية المستهلكة بوساطة التنفس، ويصبح النبات شاحباً، فيستطيل النبات، ويقل سمك الساق، ويتحول لونه إلى اللون الأبيض.

وتؤثر أيضاً شدة الإضاءة في الانتحاء الضوئي، فتتحلل الأوكسينات المسببة للنمو، وتتحرك نحو الجزء المظلم، وبالتالي تؤدي إلى استطالة الخلايا البعيدة عن الضوء ما يؤدي إلى انتحاء النبات نحو الضوء، ويزيد الضوء من نسبة الإنبات في معظم نباتات المحاصيل الحقلية.

ج- فترة الإضاءة Light duration: وهي عدد ساعات الإضاءة في اليوم، وتختلف من موقع إلى آخر ومن موسمٍ إلى آخر. فعند خط الاستواء، فإنّ عدد ساعات النهار يكون 12 ساعة طول العام، أما عند خط عرض 25 ° مثلاً تتراوح عدد ساعات النهار من 10.5 ساعة شتاءً، إلى 13.5 ساعة صيفاً، وتتراوح عند خط عرض 45° بين 8 ساعات شتاءً إلى 16 ساعة صيفاً، وتتراوح عند القطب الشمالي بين صفر شتاءً إلى 24 ساعة صيفاً. ويطلق على ظاهرة اختلاف استجابة النباتات للطول النسبي لكل من الليل والنهار بظاهرة التأقت الضوئي Photoperiodism. ويؤثر اختلاف طول الفترة الضوئية بالنهار في النباتات عن طريق التأثير في العمليات الحيوية، مثل نشوء البراعم وسكونها وظهور الأزهار. وتنقسم النباتات من حيث استجابتها لمدة الإضاءة من حيث تأثيرها في الإزهار إلى:

1- نباتات النهار الطويل Long day plants: وهذه تحتاج لنشوء الأزهار إلى عدد ساعات إضاءة تزيد عن حدٍ معين (تزيد عن 13 ساعة)، مثل القمح، والشعير، والشيلم، والبرسيم، والكتان، والبطاطا.

2- نباتات النهار القصير Short day plants: وهذه تحتاج إلى ساعات إضاءة أقل من حدٍ معين (أقل من 12 ساعة) ويجب أن تتناقص ساعات النهار باستمرار حتى يتسرع الإزهار، مثل الرز، والذرة الصفراء، والذرة البيضاء، وفول الصويا. فإذا نقلنا نبات نهار قصير من المنطقة الاستوائية إلى المنطقة المعتدلة يؤدي هذا إلى عدم إزهار النباتات،

وتستمر في النمو الخضري. والعكس عند زراعة محاصيل النهار الطويل في موسم نهار قصير يؤدي هذا إلى تقصير فترة النمو الخضري.

3- نباتات محايدة Neutral Plants: وهذه النباتات لا تتأثر بعدد ساعات النهار مثل القطن، وزهرة الشمس، وبعض أصناف التبغ.

4- نباتات النهار المحدود Determinate day plants**:** تتهيأ هذه النباتات للإزهار إذا تعرّضت لفترة ضوئية بين حدين حرجين (حد أدنى وحد أعلى)، ولا تتهيأ هذه المحاصيل للإزهار إذا تعرّضت لفترة ضوئية تقل عن الحد الحرج الأدنى، أو تزيد عن الحد الحرج الأعلى، مثل بعض أصناف الرز المصري.

الضوء وعملية التمثيل الضوئي: الضوء ضروري ومهم في عملية التمثيل الضوئي. ومن نواتج عملية التمثيل الضوئي سكر الغلوكوز الذي يتحول إلى مركبات أخرى. ويُستهلك جزء من الغذاء المتكون بعملية التمثيل الضوئي في عملية التنفس، ويُعرف الفرق بين عملية التمثيل الضوئي والتنفس باسم صافي التمثيل الضوئي. وتتلخص عملية التمثيل الضوئي بالمعادلة الآتية:

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{\text{الضوء}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

وبالتالي، يمكن زيادة معدل عملية البناء بتقليل التنفس. والتنفس ضروري ومهم لتحرير الطاقة التي يستعملها النبات في عملياته الحيوية. وهناك نوعان من التنفس، هما التنفس الضوئي Photorespiration، والتنفس الظلامي Dark respiration. عموماً، وُجد أنّ النباتات تنقسم إلى ثلاثة أنواع من حيث مسار تثبيت الكربون في عملية التمثيل الضوئي:

أ- **نباتات ثلاثية الكربون** C_3: في هذا النوع من النباتات يكون المركب الأول المستقر المصنع في عملية التمثيل الضوئي (حلقة كالفن) هو مركب ثلاثي الكربون، وهو المركب فوسفوجليسير ألدهيد (PGA)، وم أمثلتها القمح، والشعير، والرز، وفول الصويا، والفول السوداني، والبطاطا، والشوندر السكري.

ب- **نباتات رباعية الكربون** C_4: تُنتج النباتات في هذا النوع أحماض وسطية رباعية الكربون هي حمض الماليك أوالأسبارتيك (Malic or Aspartic)، مثل الذرة الصفراء، والذرة البيضاء، والدخن، وقصب السكر.

ج- النباتات العصارية CAM: وهي نباتات تشابه في مسار تثبيت غاز CO_2 نباتات الـC_4 ولكن تختلف في وقت دخول CO_2 للقيام بعملية التمثيل الضوئي، فيكون دخول CO_2 في الليل، وتتم عملية التمثيل الضوئي في النهار، مثل الصبار، والتين الشوكي، والأناناس.

ويبين الجدول (3) مقارنة كفاءة التمثيل الضوئي لأنواع نباتات الـC_3 و الـC_4، حيث نجد أنّ كفاءة النباتات رباعية الكربون تفوق كفاءة النباتات ثلاثية الكربون. كما يبين الجدول (4) مقارنة كفاءة استعمال المياه Water Use Efficiency (WUE) عند النباتات رباعية وثلاثية الكربون.

الجدول رقم (3): الاختلافات في بعض الصفات بين النباتات رباعية وثلاثية الكربون.

الصفة	نباتات الـ C_3	نباتات الـ C_4
انتشار البلاستيدات الخضراء	في طبقة خلايا النسيج المتوسط Mesophyll cells في الورقة	في طبقة خلايا النسيج المتوسط Mesophyll cells في الورقة، وفي الحزم الوعائية في غمد الورقة
الأنزيم الذي يتوسط ضم CO_2 إلى المستقبل الأولي	أنزيم Rubisco (Ribulose-biphosphate carboxylase)	أنزيم PEPcase (Phosphenol pyruvate carboxylase)
المدى الحراري الممكن للنمو	15 –25 °م	30 –47 °م
درجة الحرارة المثلى للنمو	20 –25 °م	30 –35 °م
نقطة التشبع الضوئي	3000 شمعة . قدم$^{-1}$	6000 شمعة . قدم$^{-1}$
معدل التنفس الضوئي	يحدث	لا يحدث (نادر)
الكفاءة التمثيلية عند ارتفاع درجة الحرارة	منخفضة	مرتفعة
نسبة النتح/الكربون الممثل	مرتفعة	منخفضة

الجدول رقم (4): كفاءة استعمال المياه بالنسبة إلى نباتات الـ C_3 و الـC_4 (غ مادة جافة لكل 1 كغ من الماء).

نباتات C_4	WUE	نباتات C_3	WUE
الذرة البيضاء	4.01 - 6.10	الفول السوداني	1.80- 3.00
الذرة الصفراء	3.84 - 5.01	الأرز	2.09- 3.39

يُقدّر الفقد في المادة الجافة نتيجة التنفس الضوئي في نباتات الـC_3 بنحو 40%، في حين لايتعدى3 % في نباتات الـ C_4. ويؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى زيادة معدل التنفس الضوئي في نباتات الـC_3 بسرعة أكثر من معدل التمثيل الضوئي، ما يؤثر سلباً في معدل التمثيل الضوئي الصافي (NAR). ونظراً إلى أهمية المحاصيل رباعية الكربون، فقد أوضح بعض الباحثين أنّه إذا تمّ تحويل دورة التمثيل الضوئي من الـC_3 إلى الـC_4 لبعض النباتات مثل القمح وفول الصويا فإنّه من الممكن زيادة غلتها بمقدار 50%. وفي دراسة مقارنة محصول الذرة مع بعض المحاصيل الأخرى لمتوسط أربع سنوات في كندا، أشارت إلى الفرق الكبير بين إنتاجية محاصيل الـ C_4 و الـC_3 (الجدول، 5).

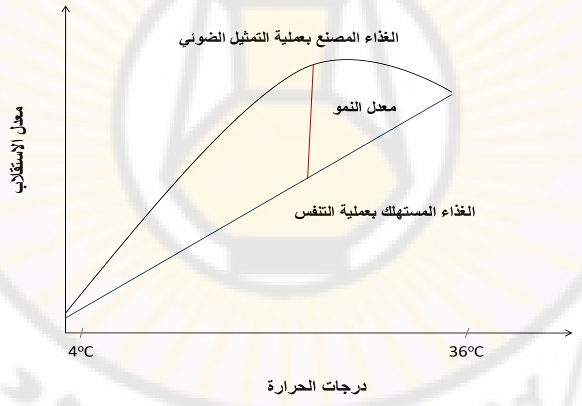
الجدول رقم (5): متوسط إنتاجية بعض المحاصيل ثلاثية ورباعية الكربون في كندا لمدة أربع سنوات.

المحصول	الغلة (كغ . هكتار$^{-1}$)
الذرة الصفراء Corn	5522
القمح الشتوي Winter wheat	3230
القمح الربيعي Spring wheat	1735
الشعير الربيعي Spring barley	2685
فول الصويا Soybean	2108

كيفية التغلب على شدة الإضاءة العالية: في حالة زيادة شدة الضوء عن الحد اللازم يمكن التغلب على ذلك عن طريق اختيار المحصول المناسب، وتعديل كثافة النباتات، وتقليم النباتات، وتحميل المحاصيل، واستعمال الشبك والتظليل، وإنتاج أصناف من

المحاصيل تتحمل شدة الإضاءة، وزراعة المحاصيل في البيوت المحمية، والاعتماد على الإضاءة الصناعية.

2- الحرارة Temperature: تُعد الحرارة من أهم العوامل البيئية التي تؤثر في الكائنات الحية عامةً، وفي النباتات خاصةً، وتؤدي الحرارة دوراً رئيساً في كثير من العمليات الطبيعية والكيميائية التي تؤثر بدورها في التفاعلات الحيوية. فتؤثر الحرارة في عملية التمثيل الضوئي وفي عملية التنفس (الشكل،7). وتؤثر في معدل فقد المياه بالنتح، وكذلك في عمليات إذابة الأملاح، كما تؤثر في التفاعلات الأنزيمية في الخلايا. تقاس درجات الحرارة بوساطة Thermocouples و Thermometers. وتقاس درجات الحرارة العظمى والصغرى يومياً ويحسب معدل درجة حرارة اليوم كمتوسط لدرجتي الحرارة. وتختلف درجات الحرارة من يومٍ إلى آخر حسب الموسم، ومن مكانٍ إلى آخر، وكذلك تختلف حسب الارتفاع عن سطح البحر، فتقل درجة الحرارة بمقدار 1°م لكل 200 م تقريباً.



الشكل رقم (7): يوضح العلاقة ما بين درجة الحرارة وكل من التمثيل الضوئي والتنفس.

ويمكن تعريف درجات الحرارة الأساسية Cardinal temperature بأنّها الدرجات التي تحدث عندها تغيرات حساسة في حيوية النبات وفي نموه وطاقته الإنتاجية، وقد حُدد لكل عملية حيوية ثلاث درجات حرارة مميزة، هي العظمى والصغرى والمثلى لحدوث التفاعلات البيوكيميائية. وتختلف الدرجات الأساسية من محصولٍ إلى آخر. ويمكن للنباتات عموماً أن تحيا بين درجة حرارة صفر مئوي إلى درجة حرارة 55°م، ولكن

عموماً لا تنمو النباتات إذا قلّت درجة الحرارة عن 5 °م. ويمكن تقسيم النباتات من حيث استجابتها للحرارة إلى:

1) محاصيل المناطق المعتدلة (المحاصيل الشتوية): وهي المحاصيل التي يلزم لنموها الجيد في المراحل الأولى، أن تتعرض لدرجات حرارة منخفضة، وهذه تنمو بين درجات حرارة 5 – 30 °م، وتتراوح درجة الحرارة المثلى لها بين 15 – 25 °م مثل القمح، والشعير، والشيلم، والشوفان.

2) **محاصيل المناطق الدافئة (المحاصيل الصيفية)**: وهذه تنمو بين درجة حرارة 10 – 40 °م والمثلى بين 30 – 38 °م، ولا تنمو إذا قلّت درجة الحرارة عن 10°م. وأهم هذه المحاصيل الذرة الصفراء، والذرة البيضاء، والقطن، والرز، وفول الصويا، والفول السوداني، والدخن.

الوحدات الحرارية التراكمية Accumulative heat units: بالنسبة إلى المحاصيل المحايدة لطول النهار فإنّ العامل المحدد لاكتمال النضج هي درجات الحرارة التي يتعرض لها هذا المحصول، ولكل محصول حد أدنى من درجات الحرارة – إذا قلت عنه – لا ينمو هذا المحصول، ويعرف الحد الأدنى باسم صفر النمو zero growth (T_{zero}) وهي أقل درجة حرارة لازمة لنمو المحصول. أما درجات الحرارة التراكمية (أو الوحدات الحرارية اللازمة للنمو)، فهي عبارة عن مجموع درجات الحرارة التي تزيد عن صفر النمو، التي يحتاجها المحصول من الزراعة وحتى النضج. وتساوي متوسط درجة حرارة اليوم (Ta) مطروحاً منها صفر النمو للمحصول، (الجدول، 6).

$$\text{Accumulative heat units} = \Sigma\,(T_a - T_{zero})$$

$$T_a=(T_{max}+T_{min})/2$$

الجدول رقم (6): يبين صفر النمو لمجموعة من المحاصيل.

المحصول	صفر النمو
القمح	3 °م
الذرة الصفراء	13 °م
القطن	16 °م
الأرز	10 °م

مثال: إذا زرع نبات الذرة الصفراء في أول شهر آذار، وحصد في العاشر من تموز، وكانت درجات الحرارة العظمى والصغرى كما يلي:

الصفة	آذار	نيسان	أيار	حزيران	تموز
عدد الأيام	31	30	31	30	10 أيام منه
درجة الحرارة العظمى	27	32	39	42	44
درجة الحرارة الصغرى	13	18	23	25	27
المتوسط	20	25	31	33.5	35.5
الحرارة التراكمية لليوم	20- **13**=7	12	18	20.5	22.5

الحرارة التراكمية للنمو = (7 × 31) + (12 × 30)+(18× 31) + (20.5 × 30) + (10 × 22.5) = 2010 °م درجة متراكمة.

وكلما ارتفعت درجة الحرارة زادت عدد الوحدات الحرارية التراكمية وقل موسم النضج، ويفيد حساب عدد درجات الحرارة التراكمية في الآتي:

أ- تحديد أنواع المحاصيل وأصنافها التي يمكن زراعتها وتحديد موعد الزراعة المناسب لها.

ب- تحديد موسم النمو وبالتالي موعد النضج بدقة وسهولة، وذلك لتجهيز الحصاد في الوقت المناسب وخصوصاً للمحاصيل الحقلية.

ج- تحديد مواعيد الزراعة إذا زرع في الحقل أكثر من صنف ويراد التهجين بينهما (التوافق بينهما في مواعيد التلقيح) كما في حالة إنتاج الذرة الهجين.

الإجهادات الحرارية Chilling and Heat stresses: يؤدي ارتفاع درجات الحرارة عن الحرارة المثلى إلى حدوث بعض الإجهادات، وهذه الأضرار تنشأ إما نتيجة ارتفاع الحرارة عن الحرارة القصوى، أو انخفاضها عن الحرارة الدنيا.

أضرار ارتفاع الحرارة High temperature injury

1- قتل البروتوبلازم: يتلف البروتوبلازم إذا ارتفعت درجة الحرارة عن 54 °م ويبدأ فقد صفاته الطبيعية.

Damascus University

2- حدوث ضربة الشمس Sun scold: وتنشأ عن موت خلايا الكامبيوم المواجهة لأشعة الشمس، وتحدث في النباتات الفتية حيث تكون خلايا القلف رقيقة، فيموت نسيج الكامبيوم، ويتلف نسيج الخشب.

3- تأثير التجفيف Desiccating effect: يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى تزايد معدل النتح، وكذلك يقل نشاط الجذور ويقل امتصاصها للماء، ويبدأ النبات في الذبول، وقد ينتهي بالموت نتيجة التجفاف. وهذا ما يعرف باسم التوازن المائي السالب. وتتأثر النموات الحديثة وكذلك الأزهار والثمار الصغيرة بدرجة أكبر نتيجة ارتفاع درجة الحرارة.

4- تعمل درجات الحرارة المرتفعة إلى تقليل معدل التمثيل الضوئي وزيادة معدل التنفس، ويحدث الجوع Starvation للنباتات، وتفقد النباتات مخزونها من الغذاء، وحلاوة ثمارها.

5- يؤدي ارتفاع درجات الحرارة إلى تساقط الأزهار والثمار الصغيرة.

6- يؤدي ارتفاع درجات الحرارة إلى قتل الجذور السطحية.

7- يؤثر ارتفاع الحرارة في حيوية حبوب اللقاح، ويقلل من نسبة إنتاشها ويقلل من نسبة الإخصاب، والعقد.

كيفية التغلب على أضرار الحرارة العالية: يمكن التغلب على أضرار الحرارة المرتفعة عن طريق إتباع الممارسات الزراعية التالية:

1- تغطية سطح التربة لتقليل تبخر الماء.

2- تقليل المسافات بين النباتات ليضلل بعضها البعض.

3- تربية الشتلات والنباتات الصغيرة داخل المشاتل، أو استعمال البيوت المحمية.

4- إعطاء ريات منتظمة لتعويض الماء المفقود بالنتح.

أضرار انخفاض الحرارة Low temperature injury

يؤدي انخفاض درجة الحرارة إلى إبطاء معدلات العمليات الحيوية التي تجري داخل النبات، ويسبب أضراراً لمحاصيل المناطق الاستوائية، والمعتدلة الحارة، والمعتدلة. ويتمثل هذا في تبقع الأوراق واحتراق حوافها. عموماً، فإنّ الأزهار والنموات الحديثة تكون أكثر تأثراً بالحرارة المنخفضة، ويمنع انخفاض درجة الحرارة انتشار حبوب اللقاح، وحدوث الإخصاب بالنسبة إلى المحاصيل الحقلية. وتقسم النباتات من حيث تأثرها بانخفاض درجات الحرارة إلى:

أ- نباتات تموت نتيجة تعرضها لدرجات الحرارة بين 0.5 – 5 °م، وتشمل الرز، والدخن، وفول الصويا, وقصب السكر.

ب- نباتات تتأثر نتيجة تعرضها لدرجات الحرارة المنخفضة، ثمّ تستعيد نموها بارتفاع درجة الحرارة، مثل حشيشة السودان، والفول السوداني.

ج- نباتات لا تتأثر كثيراً بانخفاض درجة الحرارة، مثل الذرة البيضاء، والقطن، وعباد الشمس.

د- نباتات لا تتأثر تماماً بانخفاض درجة الحرارة، مثل القمح، والشعير، والبطاطا.

أضرار التجمد Freezing injuries: يؤدي انخفاض درجة الحرارة عن الصفر المئوي إلى حدوث التجمد، ويؤدي هذا التجمد إلى حدوث الأضرار التالية:

1- تجمد البروتوبلازم: حيث يؤدي إلى انهيار تركيب البروتوبلازم فيترسب البروتين، ويحدث موت النبات (تجمد سريع).

2- الجفاف الخلوي: وينشأ عند تجمد الماء الموجود بين الخلايا، في حين أنّ الماء داخل الخلايا لم يتجمد بعد، لهذا يخرج الماء من داخل الخلايا إلى خارجها ويحدث الجفاف (تجمد بطيء وتدريجي).

3- أضرار ميكانيكية نتيجة الصقيع: والمقصود بالصقيع هو تجمد الماء وتحوله إلى بلورات ثلجية، وهناك نوعان من الصقيع.

أ- الصقيع الأسود: وهو يحدث عندما تكون الرطوبة الجوية غير مرتفعة نتيجةً لتجمد الماء داخل الخلايا وتحوله إلى بلورات إبرية، ويُحدث هذا الصقيع أكبر الأضرار للنبات، حيث يعمل على تمزيق الخلايا وموتها، وتحولها إلى اللون الأسود.

ب- الصقيع الأبيض: المقصود به تجمد الندى الملامس لسطح النبات، وتحوله إلى بلورات ثلجية. وتحدث هذه البلورات بعض الأضرار في الأنسجة الملامسة لها، ويحدث عند الرطوبة الجوية العالية.

4- قتل حبوب اللقاح والبويضات، وعدم تكون البذور.

ويُعد الصقيع من الأخطار المدمرة لنباتات المحاصيل، وتتعرض المحاصيل المزروعة في فصل الشتاء لأضرار الصقيع، وخاصةً خلال شهري كانون الأول وكانون الثاني، وتزداد أضرار الصقيع إذا حدث أثناء إزهار النباتات، حيث تفشل عملية الإخصاب وتكوين البذور والثمار.

طرق مكافحة الصقيع: تتم مكافحة الصقيع في حقول المحاصيل بعدة طرق أهمها:

1- تكوين الضباب الصناعي، وذلك بإطلاق بخار الماء في الجو المحيط بالنباتات.

2- التدخين، وذلك بحرق الأعشاب حيث إن ذرات الدخان تمنع تكوين الصقيع.

3- تغطية النباتات بالقش والبلاستيك لمنع إشعاع الحرارة منها.

4- استعمال المراوح لتحريك الهواء البارد ونزول الهواء الساخن بجوار التربة.

5- الري بالرذاذ لتسخين الهواء بجوار التربة ومنع الصقيع.

6- استعمال المواقد الساخنة، أو حرق بعض الإطارات المطاطية.

التقسية للبرودة Cold Hardiness: يقصد بها زيادة قابلية النباتات لتحمل البرودة، وذلك بزيادة تركيز المواد الصلبة في البروتوبلازم، ويمكن إحداث هذه التقسية بالوسائل التالية:

1- معاملة البذور أو البادرات بالبرودة المتدرجة: وذلك بتعريضها لدرجات حرارة منخفضة لعدة ساعات قبل زراعتها في الحقل، حيث تزيد من درجة تحملها لانخفاض درجة الحرارة.

2- تعطيش النباتات: وذلك بتباعد فترات الري الذي يؤدي إلى تقليل الماء في الخلايا، وزيادة تركيز الذائبات في الفجوات العصارية في الخلية.

3- تنظيم التسميد: وذلك بتقليل التسميد الآزوتي لمنع تكوين النموات الحديثة، وزيادة الفوسفور والبوتاسيوم لزيادة تركيز العصارة الخلوية.

4- إيقاف النمو: وذلك بتقليم النباتات تقليماً جائراً.

5- إنتاج أصناف تتحمل البرودة المنخفضة كما هو الحال في أصناف البرسيم الحجازي، التي تُزرع في المناطق التي تتعرض لانخفاض درجات الحرارة، وكذلك الأقماح الشتوية.

تحتاج المحاصيل الحولية الشتوية وبعض المحاصيل المعمرة إلى فترة خاصة من انخفاض الحرارة لكي تزهر، يطلق على عملية تعريض النباتات الموجودة في المناطق الباردة إلى درجات حرارة منخفضة لدفعها للإزهار بعملية الارتباع Vernilization (مثل الأقماح الشتوية). وفي هذه الحالة تُنقع البذور في الماء لفترة قصيرة ثمّ تعرض لدرجة حرارة منخفضة نحو 5 °م، مدة 15– 60 يوماً قبل الزراعة، وتؤدي زراعة هذه

البذور في أول الربيع إلى سرعة إزهارها في فصل الصيف، أمّا إذا لم تُعرّض البذور لدرجة حرارة منخفضة فإنّها تستمر في النمو الخضري ولا تزهر.

كما أن بعض النباتات ذات الحولين مثل الشوندر السكري تحتاج إلى موسم لنمو خضري وموسم آخر للنمو الزهري، وتحتاج إلى تعرضها للبرودة في الموسم الثاني لدفعها للإزهار. وتُحسب عدد ساعات البرودة اليومية من المعادلة التالية:

$$\text{عدد ساعات البرودة اليومية} = \frac{(7\ ^{\circ}\text{م} - \text{الدرجة الدنيا}) \times 24}{\text{الدرجة القصوى} - \text{الدرجة الدنيا}}$$

وترجع أهمية تعرض النباتات للبرودة بأنّها ضرورية للخروج من طور الراحة أو السكون، فعند انقضاء طور الراحة تنشط البراعم لتكوين الفروع الخضرية والأزهار، ويُعد دخول النباتات في طور الراحة وسيلة فعّالة لمقاومة النباتات للظروف القاسية خلال الشتاء، ويمكن كسر طور السكون للنباتات بأحد الوسائل التالية:

1- انتخاب الأصناف ذات طور السكون القصير.

2- الرش ببعض المواد الكيميائية، التي تعمل على تنشط البراعم وتقصير طور الراحة.

3- يؤدي تعطيش النباتات قبل طور الراحة إلى دخول النباتات مبكراً في طور الراحة، وبالتالي خروجها مبكراً من هذا الطور والتبكير في النضج.

كيفية التغلب على أضرار الحرارة المنخفضة: يمكن تعديل الظروف الحرارية لتلائم محصول ما بعدة طرق:

1) اختيار موقع الزراعة: في المناطق الباردة، فإنّ اختيار المنحدرات المواجهة للشمس أفضل من المنحدرات البعيدة عن الشمس، كذلك يجب تجنب زراعة المحاصيل في الأراضي المنخفضة، حيث إننّها تكون أكثر برودة، وكذلك يُفضل زراعة المحاصيل في المناطق القريبة من المسطحات المائية، حيث يعمل الماء على تلطيف الجو.

2) تغطية التربة بالقش أو البلاستيك لتدفئة التربة ومنع فقدان الماء بالتبخر.

3) يساعد الري على تدفئة النباتات.

4) زراعة المحاصيل في البيوت المحمية عند زراعتها في الأوقات غير المناسبة.

5) تدفئة النباتات بتغطيتها بالبلاستيك.

3- الماء Water: يُعد الماء من أهم العوامل التي يحتاجها النبات للنمو، ويمتص النبات الماء أكثر من أي مادة أخرى. ويمكن تلخيص فوائد الماء في النقاط التالية:

1- يعد الماء المكون الرئيس للخلايا الحية، ويكون الماء قرابة 95% من وزن الأنسجة.

2- الماء هو المحلول الناقل للعناصر الغذائية للنبات.

3- الماء هو المحلول الرئيس الذي تتم فيه معظم العمليات الكيميائية.

4- يعتبر الماء ضروري للعمليات الطبيعية في النبات، مثل استطالة الخلايا، وانتقال نواتج التمثيل الضوئي Photo-assimilates.

5- الماء ضروري في عملية التمثيل الضوئي، حيث يعد المعطي الأولي للإلكترونات.

6- الماء ضروري لتلطيف درجة حرارة النبات بعملية النتح (التأثير المبرد Cooling effect).

مصادر الماء: ينتشر الماء على سطح الكرة الأرضية، ويوجد 97% من الماء في المحيطات والباقي (3%) يتوزع على النحو الآتي: 75% في القطبين، 24 % في الماء الأرضي الجوفي، ونسبة ضئيلة منه في البحيرات (0.3 %)، ورطوبة أرضية (0.07 %)، ورطوبة جوية (0.04 %)، وأنهار (0.03%).

الخواص المميزة للماء Water properties

1) الحرارة النوعية: وهي كمية السعرات الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة غرام واحد من الماء درجة حرارة واحدة بدون حدوث تغير في حالة الماء. لذا يتميز الماء بارتفاع درجة الحرارة النوعية عن أي مادة أخرى، وله القدرة على امتصاص كمية أكبر من الحرارة مع قلة التغير في حرارته.

2) يحافظ الماء على حجم ثابت، ويبقى بحالة سائلة ضمن المدى الحراري (1- 40°م)، وبالتالي يحتل الحيز نفسه ضمن الخلية النباتية ويُكسبها ضغط الامتلاء ضمن المجال الحراري المذكور.

3) ترتبط جزيئات الماء مع بعضها البعض بالروابط الهيدروجينية (روابط تشاركية)، وبذلك تحقق تماسكاً بين الجزيئات، وتكون قوة شد كبيرة تبقي عمود الماء متصلاً داخل الأوعية الخشبية للنبات.

4) قوة التلاصق بين جزيئات الماء والمواد المرتبطة بها مرتفعة، الأمر الذي يسهل انتشارها.

5) الماء شفاف يسمح بانتشار الضوء اللازم لعملية التمثيل الضوئي من خلاله.

تُقسم موارد الماء في الطبيعة إلى نوعين: الرطوبة الجوية والرطوبة الأرضية.

الرطوبة الجوية: و يستفيد النبات منها بطريقتين:

أ- يعمل بخار الماء الموجود في الجو على تخفيف حدة الجفاف، ويقلل من عملية النتح.

ب- تُعد الرطوبة الجوية مصدر الترسبات المطرية إلى الأرض فتوفر الرطوبة في التربة، وتكون مصدراً لإمداد النبات باحتياجاته من الماء والأملاح والعناصر الغذائية الذائبة فيه.

يعبر عن الرطوبة الجوية بمقياسين الرطوبة المطلقة والرطوبة النسبية، وتعرف الرطوبة المطلقة بأنّها كمية بخار الماء الموجود في وحدة الحجم من الهواء، أمّا الرطوبة النسبية، فهي كمية بخار الماء الموجود في الهواء بالنسبة إلى كمية بخار الماء اللازمة للوصول إلى درجة التشبع. وعادةً تقاس الرطوبة الجوية في صورة رطوبة نسبية بواسطة (Psycrhometer).

4- الرياح Wind: تُعرّف الرياح بأنّها كمية الهواء المتحرك طبيعياً، ولها تأثيرات بيئية واسعة فهي تنقل بخار الماء من البحيرات والمحيطات إلى اليابسة ما يؤدي إلى هطول الأمطار، كما تعمل الرياح على فقد الرطوبة عن طريق زيادة التبخر من سطح التربة، وتُعد الرياح من العوامل التي تؤثر في إنتاج المحاصيل الزراعية، وتؤدي دوراً مهماً في نقل حبوب اللقاح من نباتٍ لآخر في بعض المحاصيل خلطية التلقيح Cross-pollinated crops، كما تؤثر الرياح في بعض العمليات الفسيولوجية، مثل النتح.

تأثيرات الرياح Wind effects: للرياح تأثيرات متعددة نوجزها فيما يلي:

1- التأثيرات الفيسيولوجية للرياح: للرياح تأثير واضح في عملية تبادل الغازات بين الغلاف الجوي وأوراق النبات عبر المسامات. كما أن فقد الماء من الورقة يكون بتأثير الرياح فهي تعمل على تقليل سمك طبقة الهواء الرطبة المحيطة بالورقة أو إزالتها، ما يُسرّع من انتشار بخار الماء خارج الورقة عبر المسامات، فيما يعرف بالنتح، الأمر الذي يزيد من الاحتياجات المائية للنبات. كما تعمل الرياح على تغيير درجة حرارة الورقة مباشرةً عن طريق نقل كتلة الهواء لتلامس الورقة، ما يجعل درجة حرارة الورقة قريبة من درجة حرارة الهواء المحيط بها. ويمكن أن تؤثر سرعة الرياح في سماكة طبقة الهواء

الساكنة المجللة لسطوح الأوراق Air boundary layer، ما يؤثر في مقاومتها لانتشار غاز الفحم عبر المسامات خلال المرحلة الغازية.

2- التأثيرات الميكانيكية للرياح: يؤدي حدوث الرياح إلى رقاد النباتات وتكسر الفروع وتساقط الثمار، ويمكن أن تؤدي الرياح الشديدة إلى اقتلاع النباتات، ما يؤدي إلى تقليل المساحة الخضراء الفعّالة في عملية التمثيل الضوئي. وقد يعزى التأثير الضار للرياح في النبات إلى المواد التي تحملها الرياح، فعلى سبيل المثال الرياح التي تهب في المناطق الساحلية من البحر تحمل الملح والرمل، التي يمكنها قتل البراعم والأوراق.

3- تعرية التربة: تعمل الرياح على إزالة الطبقة السطحية للتربة الغنية بالمواد العضوية، فيما يُعرف بالانجراف الريحي Wind erosion، ونقلها إلى أماكن أخرى، ما يفقد هذه الأراضي خصوبتها مع الوقت وتدهور إنتاجيتها. وتعمل الرياح على تحريك الكثبان الرملية وتغطية النباتات. وتعتبر مشكلة أساسية على المنحدرات والأراضي المتموجة حيث ينقل سنوياً ملايين الأطنان من الترسبات من هذه المنحدرات وتتجمع في الوديان وخزانات المياه والأراضي الزراعية، ومن آثارها:

1- جرف التربة الغنية بالعناصر الغذائية من الأراضي الزراعية والمراعي الطبيعية.

2- نقل ترب غير مرغوبة إلى تربة صالحة وغنية فتتجمع فوقها وتصبح غير صالحة.

3- زيادة سماكة الغطاء فوق البذور المزروعة، ما يعيق إنباتها وظهور البادرات فوق سطح التربة Seedling establishment، الأمر الذي يؤثر سلباً في الكثافة النباتية Crop stand.

الوسائل المطبقة للوقاية من التأثيرات الضارة للرياح:

1- زراعة مصدات الرياح، وهي أشجار سريعة النمو تزرع في خطوط حول الحقول في صفوف مفردة أو مزدوجة في الجهات التي تهب منها الرياح، وعادةً ما تزرع أشجار الكازورينا والكافور.

2- زراعة نباتات المحاصيل في خطوط متقاربة لتحمي بعضها كما تعمل على تخفيض سرعة الرياح.

3- زراعة محاصيل التغطية الحضراء، أو ترك بقايا المحصول السابق فوق سطح التربة، لحمايتها من الانجراف بتأثير الرياح.

4- تقليل عمليات الحراثة المكثفة Intensive tillage، ومنع عمليات إثارة التربة، أي تطبيق مبدأ الزراعة الحافظة Conservation Agriculture (CA).

5- استعمال الحواجز الصناعية، مثل الشباك السلكية المتعددة الأطوال، التي تخفض سرعة الرياح بنسبة 30-50%، كما يمكنها حماية المحاصيل من الرياح المحملة بالأملاح التي تهب من البحر.

5- الهواء وتركيبه Air composition: يحتوي الغلاف الجوي المحيط بسطح الكرة الأرضية عددا كبيراً من الغازات أهمها: الآزوت 78.9%، الأوكسجين20.93%، الأرغون 0.93%، ثاني أكسيد الكربون 0.03%، غازات أخرى 0.02% من حجم الغلاف الجوي، ولا يختلف هذا التركيب كثيراً من مكان لآخر. يُعد غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) من أهم الغازات التي تمتص مباشرةً بواسطة النبات في عملية التمثيل الضوئي، كما يعد عاملاً ضرورياً لبقاء الحياة النباتية على سطح الأرض. يبلغ تركيز CO_2 في الجو نحو 0.03 %، ويزداد عن ذلك في الهواء الجوي المحيط بالمصانع. تقل نسبته عن ذلك بالارتفاع عن سطح البحر. قدرت كمية غاز CO_2 الكلية المستهلكة بوساطة النباتات الخضراء بنحو ثلث الكمية الموجودة بالجو سنوياً، الأمر الذي يقتضي تعويض هذه الكمية لبقاء الحياة النباتية على سطح الأرض، عن طريق غاز CO_2 الناتج عن عملية تنفس الكائنات الحية النباتية والحيوانية، واحتراق المواد العضوية وتحللها، وصعود الغاز من فوهات البراكين.

ثانياً- العوامل الأرضية (عوامل التربة) Soil factors

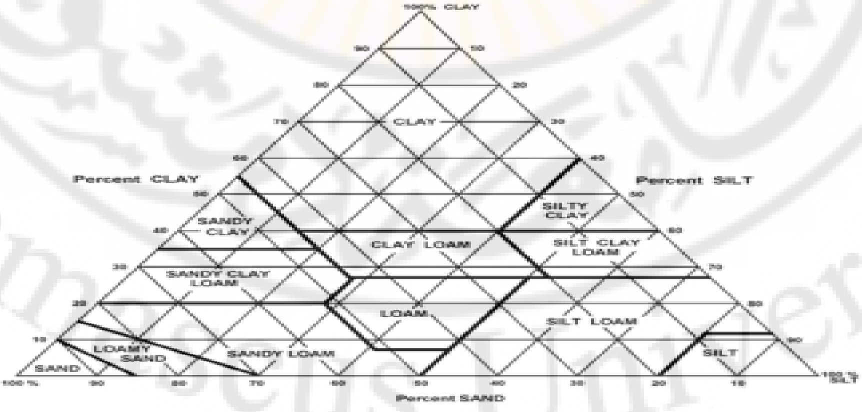
تُعرَّف التربة الزراعية بأنّها الطبقة السطحية المفككة من القشرة الأرضية التي تنمو فيها جذور النباتات وتمدها باحتياجاتها من الماء والعناصر الغذائية، كما تتخذ الجذور من الأرض وسطاً تثبت نفسها به، ومكاناً تنمو وتنتشر فيه. وللتربة ثلاث خصائص رئيسة تؤدي دوراً مهماً في نمو نباتات المحاصيل وتطورها وإنتاجيتها، أهمها:

أ- الخصائص الفيزيائية للتربة Physical properties: وتشتمل على عدة عوامل أهمها: قوام التربة، وبناء التربة، ولونها، وحرارتها، ورطوبها، وتركيب الهواء الموجود ضمن الفراغات البينية فيها.

1- قوام التربة Soil texture: يُعبّر قوام التربة عن درجة نعومة أو خشونة حبيبات التربة، باستخدام النسب المئوية لمجاميع حبيباتها الرئيسة، وهي حبيبات كل من الرمل (Sand)، والسلت (Silt)، والطين (Clay) الموجودة في حجم معين من التربة. يتراوح قطر حبيبة الطين أقل من 0.002 مم، في حين يتراوح قطر حبيبة السلت بين 0.002 - 0.05 مم، أما حبيبة الرمل فتُعد الأكبر حجماً، حيث يتراوح قطرها بين 0.05 - 2 مم. وهناك عدة مقاييس لتقويم حجم الحبيبات وتعريفها، منها النظام الدولي، الذي يعتمد على تحديد قطر الحبيبات، وفق الآتي:

قطر الحبيبات (مم)	المجموعة
اكبر من 2	الحـصى Gravel
2 – 0.2	الرمل الخشن Coarse sand
0.2 – 0.02	الرمل الناعم Fine sand
0.02 – 0.002	السلت Silt
أقل من 0.002	الطين Clay

تدعى الترب التي تتكون في معظمها من الطين ترباً طينية، أما تلك التي يسود تركيبها جزء كبير من الجزيئات الكبيرة فتعرف بالترب الحصوية. يمكن تصنيف الترب بعد معرفة نسبة المكونات (السلت، الرمل، الطين). ويتم تعيين قوام التربة بواسطة التحليل الميكانيكي، وهي عملية تهدف إلى فصل عينة التربة إلي مجاميع حبيباتها الرئيسة الثلاث حسب حجمها، ثمّ يستعمل مثلث التربة (الشكل، 8) لتحديد نوعية التربة.



الشكل رقم (8): مثلث تحديد قوام التربة بعد معرفة نسبة المكونات لبعضها.

ولقوام التربة تأثير بالغ في معظم خواص التربة الفيزيائية والكيميائية والحيوية. تُقسم الأراضي حسب قوامها إلى أراضي طينية أو سلتية او رملية. والأراضي الرملية ضعيفة الاحتفاظ بالرطوبة، ولكن يتخللها الماء والهواء بسهولة (عالية النفاذية)، في حين تعتبر الأراضي المحتوية على نسبة عالية من السلت ذات فعّالية لإنتاج المحاصيل، لأنّها وسط بين الأراضي الرملية والطينية، وتحتفظ بالرطوبة بدرجة جيدة، إضافة إلى أنّها جيدة التهوية والتهوية.

2- بناء التربة Soil structure: يُعرَّف بناء التربة بأنّه الهيئة أو الشكل التي تتجمع فيها حبيبات التربة مع بعضها، هناك العديد من الأشكال التي تتكتل فيها حبيبات التربة معا مثل الشكل الحبيبي (Granular)، والشكل الطبقي المتراكم (Platy)، والشكل التجميعي (Blocky)، والشكل الموشوري (Prismatic). يؤثر تجمع حبيبات التربة وشكل تكون الكتل في مساميتها Soil porosity، وبالتالي يؤثر في تهوية التربة ومقدرتها على الاحتفاظ بالرطوبة. إنّ المواد العضوية التي تُفرز بواسطة جذور النباتات أو بواسطة الميكروبات أثناء عملية تحلل البقايا النباتية تعمل على تجميع حبيبات التربة مع بعضها، ويؤثر بناء التربة على نفاذيتها للماء، ففي الترب التي يكون بنائها حبيبياً تكون سريعة النفاذية للماء، بينما التربة ذات التجمعات المتناثرة والموشورية تكون متوسطة النفاذية للماء، في حين نجد التربة ذات التركيب الطبقي المتراكم بطيئة النفاذية حيث يبقى الماء على سطح التربة لفترةٍ زمنيةٍ طويلة.

3- لون التربة Soil colour: يعتبر لون التربة من الخصائص الفيزيائية للتربة الذي يمكن من خلالها التمييز بين الترب. ففي الأقاليم المعتدلة، فإنّ اللون الأسود البني واللون البني الغامق خاصة في القطاع A يدل على المادة العضوية. أما الترب الحمراء والصفراء فتستمدان هذا اللون من وجود أكاسيد الحديد، والألوان الفاتحة تشير إلى جودة الصرف والتهوية. تتزايد الألوان الحمراء والصفراء في الترب من الأقاليم الباردة باتجاه خط الاستواء، وتتوقف كمية الحرارة التي تمتصها الأرض أو تفقدها على لونها، فإذا كان اللون فاتحاً فانّ الأرض تعكس مقداراً أكبر من أشعة الشمس فتقل نتيجة ذلك حرارتها والعكس صحيح.

4- رطوبة التربة Soil moisture: يتوقف توافر رطوبة التربة على عدد من العوامل، منها حجم حبيبات التربة، وكمية الهطول المطري، والمسافة بين سطح التربة ومستوى الماء الجوفي، بالإضافة إلى توزع الهطول المطري على مدار العام. يُعد ماء التربة عامل أساسي في الاختلاف بين المجتمعات النباتية. وتعد الترب الغدقة Waterlogging ضارة لنمو النباتات لأنّ التراكم الثقيل للماء في التربة يقلل من تهوية التربة، ومن ناحيةٍ أخرى،

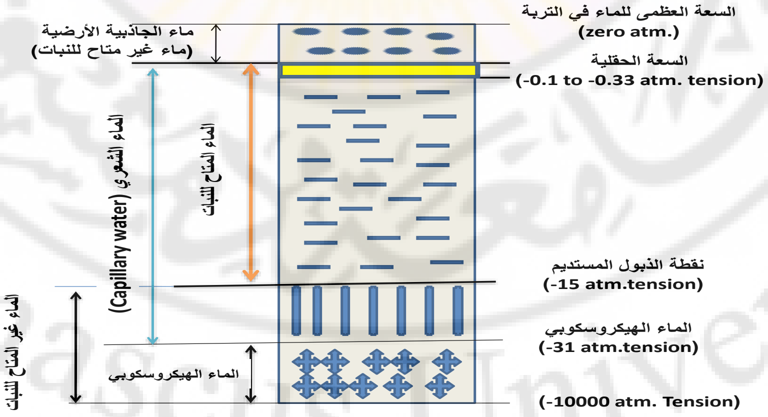
يُعد محتوى الماء القليل في التربة ضار لنمو النباتات، لأنّه يسبب ذبول مؤقت أو دائم في النبات. عند سقوط الماء على الأرض فإنّه يخترق سطح التربة ويأخذ الصور التالية:

1- ماء الجاذبية الأرضية Gravitational water: عندما تسقط الأمطار على الأرض أو تُروى التربة فإنّ جزءاً من الماء يتخلل إلى أسفل التربة بفعل قوة الجاذبية الأرضية، وتصبح التربة مشبعة بالماء عندما تمتلئ الفراغات البينية بين حبيبات التربة بالماء.

2- ماء السعة الحقلية Field capacity: عبارة عن المحتوى المائي للتربة بعد صرف الفائض من الماء بوساطة الجاذبية الأرضية، ويحدث هذا بعد يوم أو يومين من الري أو الأمطار تبعاً لنوع التربة.

3- الماء الشعري Capillary water: وهو عبارة عن الجزء المتبقي من الماء في الفراغات البينية لحبيبات التربة بفعل التوتر السطحي وقوى التلاصق بين جزيئات الماء وحبيبات التربة، وتزداد كمية هذا الماء بصغر حجم حبيبات التربة. ويستطيع النبات امتصاص معظم هذا الماء.

4- الماء المقيد (الهيجروسكوبي) Hygroscopic water: وهو عبارة عن الماء الممسوك بقوة حول حبيبات التربة بقوى أكبر من قوة إمتصاص الجذور، وبالتالي لا يستفيد منه النبات. عموماً، يستفيد النبات من الماء الشعري ما بين نسبة الرطوبة عند السعة الحقلية (FC) ونسبة الرطوبة عند نقطة الذبول الدائم Permanent (PWP) Wilting Point، وتعرف باسم الماء المتاح Available water (AW) (الشكل، 9).



الشكل رقم (9): صور وأشكال الماء في التربة.

تقسم النباتات من حيث الوسط المائي التي تعيش فيه الجذور إلى:

أ. **نباتات مائية** Hydrophytes: وهي تعيش في الماء أو تربة مشبعة بالماء. ويساعد التركيب التشريحي لهذه النباتات على ملاءمتها للبيئة، مثل الرز Rice.

ب. **نباتات وسطية** Mesophytes: وهي النباتات التي تعيش في وسط متزن من الماء والأكسجين، مثل معظم نباتات المحاصيل الحقلية.

ج. **نباتات جفافية** Xerophytes: وهي تعيش في البيئة الصحراوية حيث ندرة الماء، وتتميز بأنّ متصاصها من الرطوبة الأرضية أكبر ما يمكن، وفقدها من الماء في عملية النتح أقل ما يمكن. وهذه النباتات ملائمة تشريحياً وفسيولوجياً لهذه الظروف الصعبة، مثل النباتات الصحراوية.

الاحتياجات المائية للنباتات Plant water requirements

تختلف الاحتياجات المائية من محصولٍ إلى آخر ومن صنفٍ إلى آخر، وحسب طور النمو والبيئة المزروع فيها. وتقاس الاحتياجات المائية للمحاصيل المختلفة بقياس الماء المفقود في عمليتي التبخر-نتح، وتمثل كمية الماء المفقود من النبات والتربة ضمن البيئة التي ينمو فيها النبات. ويُقدَّر التبخر-نتح Evapo-transpiration بعدة طرق منها:

1- طريقة التبخر: حيث تقدر كمية التبخر باستعمال الإناء الموزون ثمّ نحسب التبخر-نتح عن طريق معادلات رياضية تعرف باسم معادلات Penman.

2- طريقة التبخر- نتح: وذلك بتقدير الماء المفقود من سطح مزروع ذي نمو قصير وتقاس الرطوبة المفقودة من السطح باستعمال طريقة الوزن، أو أجهزة الشد الرطوبي Tensiometer أوأجهزة تشتت النيوترونات Neutron probe أو التوصيل الكهربائي. وتوجد علاقة بين كمية التبخر-نتح واحتياجات المحصول الفعلية، التي يُعبّر عنها بمعامل المحصول. ويختلف المعامل من محصول إلى آخر ومن مرحلة نمو إلى اخرى، ويُعبرعن احتياج المحصول بارتفاع الماء اللازم لري المحصول، ويمثل مجموع ارتفاع الريات، فيقال أنّ محصول القمح يحتاج إلى 750 مم وهكذا، ويمكن تحويل ذلك إلى حجم الماء بالهكتار = 10000م^2 × 0.75 = 7500 م^3 ماء. فيختلف معدل التبخرنتح من 4 مم إلى 14 مم يومياً، أما معامل المحصول فيختلف من 0.30-0.90، وذلك حسب العوامل البيئية السائدة في منطقة الزراعة.

الاحتياج المائي النسبي Transpiration ratio: يُعرف الاحتياج المائي النسبي بأنّه عدد الوحدات بالوزن من الماء اللازمة لإنتاج وحدة واحدة من المادة الجافة من النبات. ويتوقف الاحتياج المائي النسبي على العوامل التالية:

1- خصوبة التربة: فكلما زادت خصوبة التربة قل الإحتياج المائي.

2- كمية الرطوبة الأرضية: يزداد الاحتياج المائي إذا زادت الرطوبة الأرضية أو قلت عن الكمية المثلى.

3- عمر النبات: يقل الاحتياج المائي بتقدم الباتات بالعمر.

4- الرطوبة الجوية: يزداد الاحتياج المائي كلما قلت الرطوبة النسبية الجوية.

5- نوع المحصول: يختلف الاحتياج المائي للمحصول من محصول إلى آخر، ويوضح الجدول (7) الاحتياج المائي النسبي (mm) لبعض المحاصيل الحقلية:

الجدول رقم (7): الاحتياج المائي النسبي لبعض الأنواع المحصولية.

الدخن	الذرة البيضاء	الذرة الصفراء	الشعير	القمح	البرسيم الحجازي
280	305	350	517	550	875

6- حالة المحصول: تحتاج النباتات المصابة بالأمراض إلى كمية من الماء أكبر من النباتات السليمة.

7- نوع النبات: تحتاج نباتات الـC_4 نسبياً إلى كمية أقل من المياه من نباتات الـC_3، لأنّها ذات كفاءة عالية في استعمال المياه.

تأثير عدم الاتزان المائي: تؤدي زيادة كمية الماء عن احتياجات النبات، وكذلك قلة كمية الماء عن الحد اللازم إلى حدوث أضرار للنبات، وفيما يلي تأثير كل من الجفاف والماء الزائد في نمو نباتات المحصول:

الجفاف: Drought: يُعرف الجفاف بأنه الحالة التي تكون فيها الرطوبة الأرضية هي العامل المحدد لنمو النبات. وتختلف النباتات في قدرتها على تحمل الجفاف، فهناك نباتات تتحمل الجفاف مثل النباتات الصحراوية، وتتسم النباتات المتحملة للجفاف بالمواصفات التالية: زيادة سماكة طبقة الأدمة، المسامات قليلة وغائرة، زيادة كثافة العروق في

الأوراق، وزيادة كثافة الزغب والأوبار على سطوح الأوراق، وزيادة التكرار المسامي، وزيادة حجم الفراغ الداخلي، ودرجة العصارية، والأوراق صغيرة ومتحورة على أشواك أو أبرية لتقليل النتح، غيرها. ويؤدي نقص الماء إلى الذبول المؤقت أو الدائم، وبطء العمليات الحيوية، وخاصةً عملية التمثيل الضوئي، ويسبب الجفاف التبكير في النضج، ما يؤدي إلى نقص الانتاج كماً ونوعاً، نتيجة اختصار أطوال المراحل الفينولوجية المختلفة.

أهم الوسائل المتبعة للتخفيف من أضرار انخفاض الرطوبة (الجفاف):

1- تقليل كثافة النباتات للحد من المنافسة على الماء في حال الزراعة المطرية، أما في حالة الزراعة المروية فلا بد من زيادة عدد النباتات في وحدة المساحة لتضلل بعضها البعض حتى يقل معدل فقد المياه بالتبخر-نتح.
2- استعمال مصدات الرياح لتقليل سرعة الرياح، وبالتالي تقليل فقد المياه بالتبخر.
3- زراعة محصول تغطية بين المحاصيل لرفع نسبة الرطوبة الجوية وتقليل التبخر.
4- اختيار المحاصيل المناسبة التي تتحمل الجفاف، مثل الذرة البيضاء، والشعير.

تأثير زيادة نسبة الرطوبة عن الحد اللازم:
1- يؤدي زيادة الماء عن الحد اللازم إلى شغل الفراغات البينية بين الحبيبات وبالتالي تقليل الأوكسجين في التربة، كما تزداد نسبة غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن التنفس، وتؤدي إلى تنشيط التحلل اللاهوائي وينتج عنه غاز الميثان السام وبالتالي موت النباتات.
2- يؤدي زيادة الماء إلى حدوث نقص في نفاذية الأغشية السيتوبلاسمية داخل خلايا الشعيرات الجذرية فيقل الامتصاص، ويحدث ما يُسمى الذبول الفيزيولوجي.
3- بطء العمليات الحيوية في النبات.
4- زيادة نسبة الإصابة بالأمراض.
5- تحول النترات إلى نتريت، وزيادة رشح هذه العناصر في التربة ملوثةً المياه الجوفية.
6- تتسبب في صرف الاملاح والمواد الغذائية من التربة.

تختلف النباتات في تحملها للرطوبة الزائدة، ومن المحاصيل الحساسة للرطوبة الزائدة، القمح، والشعير، وفول الصويا، ومن المحاصيل التي تتحمل الرطوبة الزائدة، الرز، والذرة البيضاء.

5- حرارة التربة Soil temperature: تؤثر حرارة التربة مع العوامل الأخرى في خواص التربة ونمو النباتات. تقلل الحرارة المنخفضة من معدل امتصاص الماء والعناصر المعدنية المغذية الداخلة مع تيار الماء من قبل الجذور، كما تؤثر حرارة التربة

في التوزع الجغرافي للنباتات على الأرض. وتتأثر حرارة التربة بحرارة الجو وشدة الإشعاع الشمسي والفترة اليومية للإشعاع الشمسي، ورطوبة التربة وعوامل أخرى. وتؤثر درجة حرارة التربة في نمو النباتات من خلال مايلي:

1) تؤثر درجة حرارة التربة في إنبات البذور، من خلال تأثيرها في التفاعلات البيوكيميائية داخل البذور، كشدة التنفس وامتصاص الماء والاستقلاب الغذائي، والنشاط الأنزيمي، وسرعة انقسام خلايا الجنين.

2) تؤثر درجة حرارة التربة في سرعة امتصاص الماء والعناصر الغذائية من التربة، حيث يكون الامتصاص أعظمي ضمن درجات الحرارة المثلى، وتقل القدرة الامتصاصية للجذور بتدني درجة حرارة التربة، بسبب انخفاض سرعة التنفس لخلايا الشعيرات الجذرية، وزيادة لزوجة أغشيتها الخلوية، وضعف حركة الماء والأملاح الممتصة، كما تقلل من استطالة الجذور.

3) تؤثر حرارة التربة في نشاط البكتيريا والكائنات الأخرى في التربة، فكلما ارتفعت درجة الحرارة ازداد نشاط البكتيريا (تتراوح درجة الحرارة المثلى لنشاط معظم أنواع البكتريا بين 25 - 30 ºم).

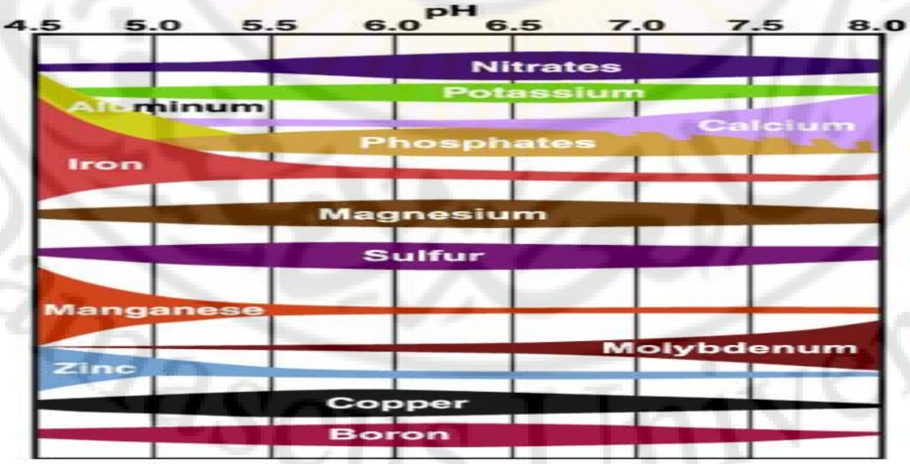
6- تهوية التربة Soil aeration: تُسمى الفراغات بين ذرات التربة المسامات Pore spaces، تحتوي هذه المسامات على الهواء، ويحتوي هواء التربة على نسبة قليلة من الأوكسجين، ونسبة عالية من غاز CO_2 بالمقارنة مع هواء الغلاف الجوي، إضافة لبخار الماء والآزوت. وعادةً ما تكون الترب الغدقة فقيرة بالأوكسجين، وتحتوي على غازات مثل الميثان (CH_4) والأمونيا (NH_4)، وكبريتيد الهيدروجين (H_2S). ويمكن توضيح علاقة هواء التربة بنمو النباتات في النقاط التالية:

1) يحتاج إنبات البذور للأوكسجين.
2) تنفس الجذور ونموها.
3) يلزم لنشاط الكائنات الحية النافعة.
4) تنمو معظم المحاصيل في التربة التي تحتوي على نسبة أكسجين في هوائها 21 % وينخفض النمو انخفاض المحتوى عن 10%. وتُنّشط في ظروف التهوية الجيدة بكتيريا التأزت، ما يؤدي إلى زيادة خصوبة الأرض. وتنشط الكائنات الحية اللاهوائية بانخفاض محتوى الأوكسجين في هواء التربة وينشأ عنه تحطم المركبات الغذائية المهمة مثل النترات، ما يؤدي إلى نقص خصوبة التربة وتكوين المواد السامة.
5) تزداد إصابة النباتات بالأمراض في التربة رديئة التهوية.

ب- الخصائص الكيميائية للتربة Soil chemical properties:

ويقصد بها العناصر الغذائية الموجودة في التربة وتفاعلاتها ومدى سهولة امتصاصها من قبل النباتات المختلفة، ويتأثر نمو وإنتاج المحاصيل المختلفة بهذه الخصائص التي تشمل:

(1) تفاعل التربة أو درجة الحموضة Soil PH: يُعبر عن حموضة التربة بالرقم الهيدروجيني (pH)، ويعرّف pH التربة بأنّه اللوغاريتم السالب لتركيز أيونات الهيدروجين النشطة في محلول التربة. يتراوح pH معظم الترب بين 4-8، وقد يكون أعلى من ذلك أو أقل في بعض الترب، على سبيل المثال الترب الملحية لها pH يتراوح من 7.3- 9.5 وبعض الترب الحامضية لها pH منخفض جداً، يتراوح من 2.8-3.9. الترب الزراعية لها pH منخفض نتيجة لعمليات إضافة الأسمدة باستمرار مثل نترات الامونيوم والأسمدة المحتوية على الكبريت. في حال إضافة الأسمدة الآزوتية تقوم كائنات التربة بإطلاق أيونات الهيدروجين (H^{+})، ما يؤدي إلى زيادة حموضة التربة Soil acidity، وتحل محل كاتيونات التربة. لتعديل pH التربة الحامضية يتم إضافة كربونات الكالسيوم، أما في الترب القاعدية فتتم إضافة الجبس. والتأثير المباشر لـpH التربة في نمو النبات محدود جداً، لكن التأثير غير المباشر كبير، حيث إنّ المعادن السامة في التربة كالألمنيوم (Al^{+3})، والمنغنيز (Mn^{+2})، تتأثر بحموضة التربة وقاعديتها. يؤثر pH التربة في إتاحة العناصر الغذائية للنبات، وكذلك في نشاط كائنات التربة. وتتأثر العناصر المغذية كالآزوت والفوسفور والكبريت بـ pH التربة. عند الـpH المتعادل، الذي يتراوح من 6.5-7.5 تكون معظم العناصر الغذائية متاحة للنبات (الشكل 10).



الشكل رقم (10): يوضح العلاقة بين pH التربة وتوفر العناصر الغذائية للنبات في التربة.

التأثير غير المباشر لحموضة التربة في نمو المحاصيل: يؤثر pH التربة على مدى تيسر/إتاحة العناصر والتبادل الكاتيوني بالتربة، وكذلك تحلل المواد العضوية والنشاط الحيوي فيها. يتأثر نشاط الكائنات الحية الدقيقة بالتربة برقم الحموضة، لكل كائن حي رقم حموضة محدد لنشاطه، تنشط عملية التأزت وتثبيت الآزوت في رقم حموضة 5.5، وتنمو معظم المحاصيل ضمن رقم حموضة يتراوح بين 5-8. وتختلف التربة في حموضتها ويرجع سبب الإختلاف بنسبة كبيرة إلى اختلاف محتواها من الأملاح المختلفة والكاتيونات المتبادلة والذائبة في محلول التربة، ففي حالة زيادة الصوديوم المتبادل في محلول التربة يرتفع الرقم الهيدروجيني ويصبح تفاعل التربة قاعدياً، ولاسيما في المناطق الجافة، وولكن عند زيادة أيونات الهيدروجين أو الألومنيوم المتبادلين ينخفض الرقم الهيدروجيني ويصبح تفاعل التربة حامضياً، وكذلك التغير في المحتوى المائي للتربة، ففي ترب المناطق الرطبة وشبه الرطبة يكون الرقم الهيدروجيني منخفضاً وتكون التربة حامضية، بعكس ترب أراضي المناطق الجافة ذات الرقم الهيدروجيني المرتفع.

(2) الناقلية الكهربائية Electric conductivity (EC)

إن التوصيل الكهربائي للمحلول المائي للتربة يزداد بزيادة أيونات الأملاح الذائبة والمتأينة فيه، أي بزيادة تركيزها. ويُستعمل جهاز قياس التوصيل الكهربائي Electric conductivity meter لتحديد ذلك. الوحدات المستخدمة لقياس التوصيل الكهربائي للمحلول المائي عبارة عن موز/سم (mhos/cm) وهي تساوي 1000 ملليموز/سم (10^3 mmhos/cm). وللتحويل إلى تركيز الأملاح بالمحلول بالميلي مكافئ/ لتر = التوصيل الكهربائي بالمليموز/سم × 10 . للتحويل إلي تركيز الأملاح بالمحلول كجزء في المليون ppm (مغ/لتر) = التوصيل بالمليموز/سم × 640، وللتحويل إلى تركيز الأملاح بالمحلول بالضغط الأسموزي = التوصيل الكهربائي بالمليموز/سم × 0.36. والواحدات المستعملة حالياً للتعبير عن الناقلية الكهربائية في محلول عجينة التربة المشبعة هي dS m^{-1}، وتعادل تماماً ميلليموز/سم عنددرجة حرارة 25 درجة مئوية. يُعد تقدير الأملاح الكلية الذائبة في مستخلص التربة من التقديرات الرئيسة المهمة لمعرفة درجة ملوحة التربة. وتقدر الأملاح في محلول التربة بوساطة قياس التوصيل الكهربائي، كما أنّ تأثير الأملاح لا يتوقف على كميتها في التربة فقط بل على نوعية تلك الأملاح، وتختلف كمية الأملاح الذائبة والموجودة بالتربة من تربةٍ لأخرى، ويرجع ذلك إلى ظروف تكوين التربة ونوعها، كما يؤدي الغسيل المستمر في الترب بوساطة مياه الري إلي غسيل الأملاح وإحلال الهيدروجين محل جزء من الكاتيونات المدمصة على أسطح حبيباتها. ومن التأثيرات السلبية للتركيزات المرتفعة والعالية من الأملاح في محلول التربة ما يلي:

1- زيادة الضغط الحلولي/الأسموزي، وهذا يقلل من مقدرة النبات على امتصاص الماء والأملاح.

2- حدوث السمية الأيونية ببعض الشوارد المعدنية السامة، مثل الصوديوم (Na^+)، والكلور (Cl^-) للنباتات النامية بالتربة.

3- تقليل معدل التبادل الكاتيوني في محلول التربة.

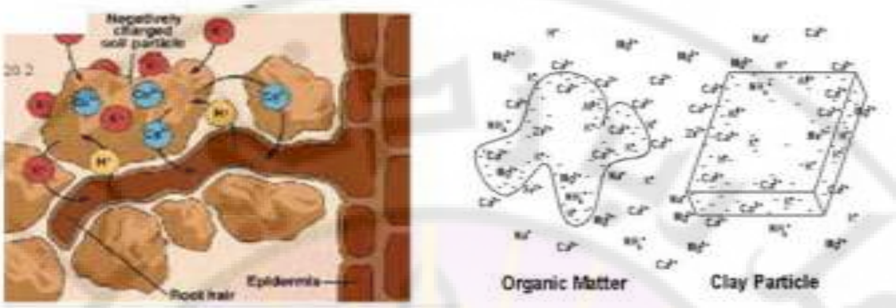
4- يؤدي ارتفاع نسبة الصوديوم المدمص إلى تدهور خواص التربة.

وتختلف المحاصيل في مقدار تحملها للأملاح، وهناك اختلاف بين الأصناف ضمن النوع الواحد، وتقسم المحاصيل تبعاً لدرجة تحملها للأملاح وفق الجدول (8) على النحو التالي:

محاصيل متحملة للملوحة	محاصيل متوسط التحمل للملوحة	محاصيل متوسطة الحساسية	محاصيل حساسة
الشعير، الشوندر السكري، القطن، القمح	الذرة البيضاء، العصفر، الذرة الصفراء	الدخن ، الرز ، الفول البلدي، الفول السوداني	معظم محاصيل الفاكهة، البندورة، السمسم
15–20 $dS . m^{-1}$	10–15 $dS . m^{-1}$	5– 10 $dS . m^{-1}$	أقل من 5 $dS . m^{-1}$
9600- 12800 ppm	6400- 9600 ppm	3200- 6400 ppm	أقل من 3200 ppm

(3) السعة التبادلية الكاتيونية: Cation Exchange Capacity (CEC)

تُكوِّن الأجزاء الصلبة ما يزيد عن 50% من حجم التربة، أما الحجم المتبقي فيملأ بالماء والهواء. تُعرّف السعة التبادلية الكاتيونة بأنّها الدرجة التي تستطيع عندها التربة ادمصاص وتبادل الكاتيونات التي تحمل شحنة موجبة مثل $NH_4^+, K^+, Ca^{2+}, Fe^{+2}$ ، أمّا الانيونات فهي التي تحمل شحنة سالبة مثل $NO_3^-, PO_4^{2-}, SO_4^2$ (الشكل ، 11).



الشكل رقم (11): يوضح السعة التبادلية الكاتونية وأهميتها في تبادل العناصر بين التربة وجذور النبات.

تتميز حبيبات الطين والمادة العضوية organic matter بوجود شحنات سالبة على سطوحها، الكاتيونات المعدنية يمكن أن تدمص إلى الشحنات السالبة، وعند ذلك فليس من السهولة فقدها في الماء بعملية الرشح، وكذلك تكون متاحة للامتصاص بوساطة جذور النبات. إنّ هذه المواد المعدنية الموجودة على سطح حبيبة الطين يمكن استبدالها بكاتيونات أخرى اعتماداً على نوع الشحنة.

(4) المادة العضوية في التربة Soil organic matter

تحتوي جميع أنواع الترب على مواد عضوية بنسب مختلفة، والمادة العضوية في التربة هي كل مادة ذات منشأ نباتي أو حيواني كبقايا النباتات والحيوانات التي لم تتحلل أو التي تحللت جزئياً. وللمادة العضوية دور مهم في تحسين الخواص الفيزيائية والكيميائية والحيوية للتربة، فهي تشكل مصدراً مهماً للعناصر الغذائية اللازمة لنمو النبات عند تحللها، ولها دور منظم في حموضة التربة pH ، وتعمل على زيادة السعة التبادلية للكاتيونات، كما ترفع مقدرة التربة على حفظ الماء وتحسين بنائها. وتشكل الغذاء الرئيس لجميع الكائنات الحية الموجودة في التربة.

ج- الخصائص الحيوية للتربة Soil biological properties

تشمل الخصائص الحيوية للتربة كل ما تحتويه التربة من كائنات حية مختلفة تنتمي للمملكة النباتية (Flora) والمملكة الحيوانية (Fauna). إنّ أحياء التربة، وخاصةً الكائنات الحية المجهريةن مثل البكتريا والفطريات..الخ، تفكك المادة العضوية في التربة إلى مواد متحللة Humus، إضافة للمركبات العضوية والأيونات المعدنية الحرة التي يستفيد منها

النبات خلال مراحل نموه وتطوره. وتفرز بعض أحياء التربة مواد مهمة ومفيدة مثل هرمونات النمو، وبعض أحياء التربة تفرز مواد سامة في التربة تؤثر في نمو النباتات. تثبت بعض الكائنات الحية الدقيقة الآزوت الجوي في التربة، الذي يفيد النباتات الراقية، وبعض كائنات التربة مثل ديدان الأرض Earthworms تزيد من خصوبة التربة بإضافة بقايا المواد التي تغذت عليها وحللتها، إضافة إلى تهوية التربة بحفر الأنفاق.

ثالثاً- العوامل الحيوية Biological factors

هناك علاقة قوية بين الكائنات الحية الموجودة في البيئة والنباتات المزروعة من جهة، وبين الكائنات الحية مع بعضها البعض من جهة أخرى. وتختلف هذه العلاقة باختلاف الكائنات الحية. نلاحظ تعدد أنواع العلاقات المعيشية بين الحيوانات والنباتات، كالمشاركة في قيام الحشرات بعملية التلقيح وقيام الطيور والحيوانات بنقل الثمار والبذور وتعايش الطيور باتخاذ الأشجار مأوى لها، وتغذية الحشرات على أجزاء النباتات، وتطفل بعض الفطريات والفيروسات على النباتات. عموماً، يمكن تقسيم هذه العلاقة إلى الأشكال والصور التالية:

1- تبادل المنفعة Symbiosis: وتشمل المشاركة والمعايشة.

2- التضاد Allelopathy: ويشمل التنافس والتضاد الحيوي والتطفل والافتراس.

أ- التنافس Competition: تتميز المحاصيل سريعة الإنبات قوية النمو الجذري والخضري بكفاءة عالية على التنافس لقدرتها على شغل الحيز الهوائي والأرضي بكفاءة عالية، مثل الشوندر السكري والقطن؛ وتغطي المحاصيل المزروعة بكثافة عالية مثل القمح والبرسيم سطح الأرض بكفاءة عالية وبالتالي تكون أكثر قدرة على التنافس. تتنافس نباتات المحاصيل مع بعضها البعض Intraspecific competition، أو مع نباتات أخرى مثل الأعشاب الضارة Interspecific competition على المكان، الضوء، غاز ثاني أكسيد الكربون، العناصر المغذية، والماء..الخ.

ب- التضاد Antagonism: تؤثر النباتات في بعضها البعض وفي كائنات حية أخرى بما يتحرر منها من مواد كيميائية مضادة Allelopathic substances التي تتحرر من النباتات إلى الأرض والجو بوسائل متعددة منها: الإدماع والتسرب والتطاير والغسيل مع ماء المطر، بالإضافة إلى الإفرازات من الجذور، كما تتحرر هذه المواد أثناء تحلل المواد الميتة (الأوراق الساقطة من الأشجار، بقايا المحاصيل). تؤدي هذه المواد إلى إحداث أضرارٍ على الكائنات الحية الأخرى. مثال: تفرز جذور الفاصولياء بعض المواد السامة

التي تؤدي إلى قتل ديدان الأرض، ما يؤدي إلى نقص عدد الديدان فيها؛ كما يفرز نبات الحمص مواد عن طريق الجذور والأوراق تؤثر سلباً في الأعشاب وأحياء التربة.

الكائنات الحية في التربة Soil organisms: توجد هذه الكائنات في الأرض طالما وجدت الرطوبة الكافية والمادة العضوية بها وفي غياب أيهما لا يمكن لهذه الكائنات أن تقوم بعملياتها الحيوية. وتختلف هذه الكائنات من حيوانات قارضة وديدان وحشرات ونباتات راقية كبيرة في الحجم إلى كائنات حية دقيقة لا تُرى بالعين المجردة كالبكتريا والفطريات والطحالب والبروتوزوا.

تأثير الكائنات الحية في نمو نباتات المحاصيل:

- ✓ تحليل المادة العضوية بوساطة بعض أنواع البكتيريا إلى ماء و CO_2 وأمونيا.
- ✓ تقوم بعض الكائنات بأكسدة مركبات الكبريت والأمونيا في التربة.
- ✓ التنفس وزيادة CO_2 ونقص O_2.
- ✓ انطلاق الأحماض العضوية.
- ✓ تثبيت الآزوت الجوي.
- ✓ إفراز المواد المشجعة للنمو أو إفراز مواد سامة.
- ✓ التنافس على عناصر النمو الأساسية.
- ✓ التطفل على نباتات المحاصيل.

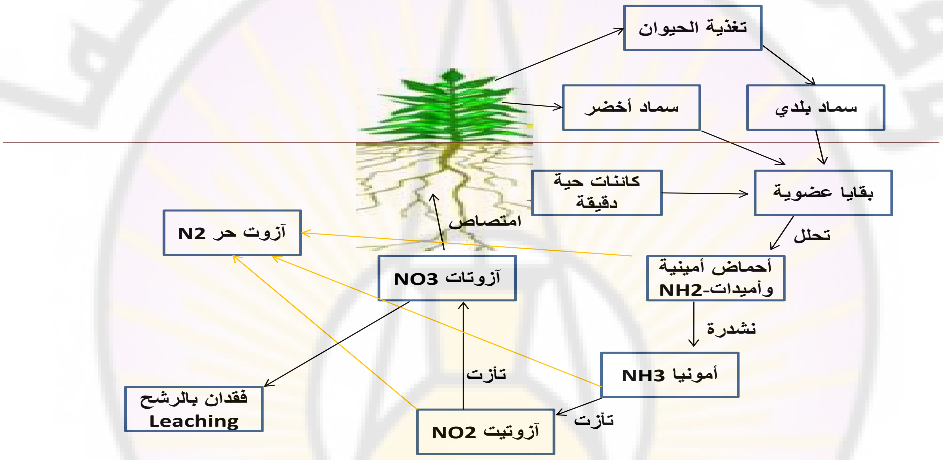
التأثير المفيد للكائنات الحية: تحقق هذه الكائنات من خلال عملياتها الحيوية المختلفة فوائد عديدة يمكن تلخيصها بالنقاط التالية:

1) تحليل المواد العضوية: لكي تحصل الكائنات الدقيقة على الطاقة والغذاء اللازمين لتكاثرها لا بد أن تحلل المواد العضوية. ويتم تحليل المواد العضوية على خطوات وكل خطوة تقريباً لها نوع معين من الكائنات الحية (الشكل، 12)، ونواتج التحليل المهمة هي مركبات الأمونيا والنترات وثاني أكسيد الكربون الذي يتحد جزء منه مع ماء التربة مكوناً حمض الكربون (H_2CO_3) الذي يعمل على إذابة بعض العناصر الغذائية اللازمة للنبات وجعلها في حالة صالحة للامتصاص. ويتم تحليل المادة العضوية وفق الخطوات التالية:

- الانحلال: وفيه تتحلل البروتينات إلى أحماض أمينية وأميدات.
- النشدرة: وفيه تتحلل الأحماض الأمينية إلى نشادر (أمونيا NH_4).

• التأزت: وفيه يتحلل النشادر إلى نتريت (NO_2) بوساطة بكتيريا معينة (Nitrobacter)، ثمّ يتحول النتريت إلى نترات NO_3 بواسطة بكتريا خاصة أخرى (Nitrosomonas).

والجدير بالذكر أنّ النباتات الراقية تأخذ الآزوت اللازم لها في صورة نترات ذائبة ولو أنّ بعضها يمكن أن تستعمله في صورة أمونيا كالرز.



الشكل رقم (12): خطوات تحلل المادة العضوية في التربة.

2) تثبيت الآزوت الجوي بوساطة البكتيريا: هناك عملية أخرى تقوم بها أنواع معينة من البكتيريا لها فائدة للنباتات، وهذه العملية هي تثبيت الآزوت الجوي، وتستفيد النباتات منه بطريقة مباشرة بوساطة البكتيريا المثبتة له، هناك نوعان من البكتيريا تقوم بذلك وهي:

أ- الآزوتوبكتيرAzotobacter: وهي بكتيريا تعيش حرة في التربة وتحتاج إلى بيئة حامضية نوعاً ما (pH=6) حتى تقوم بعملها. وقد وجد أنّ هذه البكتيريا تضيف إلى دونم من الأرض قرابة 3.5 كغ سنوياً من الآزوت إذا كانت الظروف البيئية ملائمة لها.

ب- البكتيريا العقدية Rhizobium: وهي بكتيريا تعيش معيشة تكافلية على جذور نباتات الفصيلة البقولية، تدخل هذه البكتيريا النباتات عن طريق الشعيرات الجذرية بعد تكوين

الأوراق الحقيقية، وتتكاثر البكتيريا بمجرد دخولها الشعيرات الجذرية، وتكوِّن في أثناء اختراقها للخلايا خيطاً يُسمى خيط العدوى، وهو خيط مكون من البكتيريا محاط بأنبوبة يكونها النبات العائل من السيللوز والبكتين. وتنفذ البكتيريا من خلية إلى أخرى حتى تصل إلى الخلايا الداخلية للقشرة وهنا تخرج البكتيريا من الغشاء الذي يحيط بها، وتتكاثر الخلايا التي توجد بها البكتيريا، كما تتكاثر الخلايا القريبة منها، فتتكون العقد البكتيرية في المحاصيل البقولية (الشكل، 13).

الشكل رقم (13): تشكل العقد البكتيرية على جذور البقوليات.

وتتكون حزم وعائية في العقد البكتيرية تتصل بالحزم الوعائية للنبات، وعن طريقها تنتقل المواد العضوية وغير العضوية من النبات العائل إلى العقد البكتيرية، كما تنتقل نواتج عملية تثبت الآزوت الجوي من العقد البكتيرية إلى النبات العائل. وهكذا نجد أنّ النبات البقولي لا يقوم بامتصاص الآزوت الجوي وتثبيته بل البكتيريا التي تعيش في العقد الموجودة في جذوره. وتعيش البكتيريا العقدية مع النباتات نحو سبعة أسابيع معيشة تعاونية تتحول بعدها إلى بكتيريا تعيش معيشة متطفلة لقلة المواد الغذائية المتجهة إليها، حيث تُفرز البكتيريا في هذه الحالة أنزيم البكتيناز الذي يقوم بإذابة الصفيحة الوسطى للخلايا فتتفجر العقد، ويتسرب منها بعض الآزوت إلى التربة حيث يمكن لجذور النباتات امتصاصه. وللبكتيريا العقدية عدة سلالات فيزيولوجية تنمو على أنواع مختلفة من النباتات البقولية، أي أنّ لكل محصول بقولي سلالة معينة تعيش على جذوره ووجود السلالة الملائمة من البكتيريا للمحصول البقولي المزروع في التربة مهم لمساعدة النبات في الحصول على الآزوت من الهواء بدلاً من التربة، وعدم وجود النوع الموافق من البكتيريا لهذا المحصول لا يمنع نموه طالما أنّ التربة تحتوي على الآزوت المعدني اللازم

له، ولكن في هذه الحالة تفتقر التربة بالآزوت بدلاً من اختزانه. وإذا كانت بكتيريا العقد الجذرية لمحصول بقولي معين غير موجودة في الأرض فمن الممكن أن تُضاف هذه البكتيريا الخاصة إلى الأرض، أو من خلال تلقيح بذور المحصول Seed inoculation المراد زراعته قبل الزراعة مباشرةً، وهي أفضل طريقة عملية لضمان التلقيح الجيد والسهل. وتجدر الإشارة إلى أنّ كمية من الآزوت تضاف إلى التربة مع مياه الأمطار وبكمية تختلف باختلاف المناطق وكمية الأمطار المتساقطة، وهي تتراوح عموماً بين 0.5 - 1 كغ . دونم$^{-1}$.

التأثير الضار لبعض الكائنات الحية: خلافا للأنواع السابقة من الكائنات الحية النافعة هناك أنواع أخرى تلحق ضرراً بالنباتات المزروعة تحت ظروف معينة:

1) إن عدم صرف الماء الزائد من التربة يجعل بعض البكتيريا اللاهوائية تضطر للحصول على الأوكسجين اللازم لها من اختزال النترات والكبريتات وغيرها، فإذا اختزلت النترات يتكون النتريت، حيث لا يمكن للنباتات الخضراء امتصاصه، وإذا استمرت عملية الاختزال، يُختزل النتريت أيضاً، ويتحول إلى آزوت حر (N_2). ويتلخص التخلص من الأثر الضار لهذه البكتبريا في القيام بالعمليات الزراعية التي تساعد على تفتيت التربة، وتأمين التبادل الغازي مثل عملية الحراثة والعزيق، وصرف الماء الزائد من التربة، وذلك لجعل الأرض ملائمة لنمو الكائنات الحية الهوائية.

2) في بعض الأحيان تكون البكتيريا والفطريات ضارة ولو مؤقتاً وذلك عن طريق منافسة النباتات النامية في الحصول على العناصر الغذائية من التربة، والآزوت هو أهم العناصر التي تتأثر بهذا التنافس ولو أنّ هذه الكائنات تستنفد أيضاً كمياتٍ غير قليلة من الفوسفور والبوتاسيوم. ويظهر هذا التنافس واضحاً عند إضافة مواد عضوية غنية بالمواد الكربوهيدراتية السهلة التحلل والفقيرة بالآزوت مثل سماد مكون من قش غير متحلل، أو سماد أخضر، في هذه الحالة ستحتاج البكتيريا إلى الآزوت لبناء بروتوبلازم خلاياها ما يؤدي إلى استهلاك الآزوت الموجود في التربة، الذي لولا وجود هذه الأحياء لاستفاد منه النبات المزروع، وعلى هذا فإنّ النترات والأمونيا ستختفيان من التربة وتصبح معه التربة فقيرة بالآزوت إلى أن يتم تحلل المواد الكربوهيدراتية، كما تتحلل الأحياء الدقيقة بعد موتها فتنطلق منها المركبات الآزوتية ثانية.

الفصل الثالث

استعمال العناصر المعدنية المغذية

Utilization of mineral nutrients

إنّ المصدر الرئيس في تغذية النبات هو تثبيت غاز ثاني أكسيد الكربون الجوي على شكل سكر بسيط باستعمال طاقة الشمس، حيث يدخل غاز CO_2 إلى النبات من خلال مسامات الورقة، كما يدخل الأوكسجين الجوي O_2 من خلال مسامات الورقة أيضاً، إضافة للأوكسجين الناتج عن أكسدة الماء ضوئياً بعملية التمثيل الضوئي، حيث يستعمل الأوكسجين في التنفس الخلوي لإطلاق مركبات الطاقة من الروابط الكيميائية للسكر لدعم نمو النبات وتطوره. إنّ غاز الكربون وطاقة الضوء، وحدها غير قادرة على اصطناع كافة المركبات المطلوبة لحياة النبات؛ فالنبات يتطلب عدداً من العناصر المعدنية التي تقسم إلى عناصر كبرى وعناصر صغرى، يحصل عليها النبات بشكلٍ أساسي من التربة.

التربة كمصدر رئيس للعناصر المعدنية المغذية للنبات:

تُعرَّف التربة الزراعية بأنّها الطبقة السطحية المفككة من القشرة الأرضية التي تنمو فيها جذور النباتات وتمدها باحتياجاتها من الماء والعناصر الغذائية، كما تتخذ الجذور من الأرض وسطاً تثبت نفسها به، ومكاناً تنمو وتنتشرفيه الجذور. تتألف التربة من ثلاثة أطوار، صلب وسائل وغازات تتفاعل جميعها مع العناصر المعدنية. إن الذرات المعدنية للطور الصلب للتربة تُعد مخزوناً يزود النبات بالبوتاسيوم والكالسيوم والمغنزيوم والحديد، وترتبط مع هذا الطور الصلب المركبات العضوية التي تُعد مستودعاً للآزوت والفوسفور والكبريت؛ أما الجزء السائل من التربة فيشكل محلول التربة، الذي تنحل فيه معظم العناصر المعدنية، ويُعد وسطاً لحركة الأيونات إلى سطح جذور النباتات. أما الغازات مثل الأوكسجين وثاني أكسيد الكربون فتنحل في محلول التربة، لكن التبادل الغازي مع الجذور يتم من خلال المسامات البينية للتربة.

العناصر المغذية التي يحتاجها النبات:

يحتاج النبات إلى 16 عنصراً مغذياً من أجل نموه وإكمال فترة حياته هي: الكربون، والاكسجين، والهيدروجين، والآزوت، والبوتاسيوم، والفوسفور، والكبريت، والمغنزيوم، والكالسيوم، والحديد، والمنغنيز، والزنك، والنحاس، والبورون، والموليبدينوم، والكلور.

بالإضافة إلى أربعة عناصر أخرى هي: الصوديوم، والكوبالت، والفناديوم والسيليكون، يتم امتصاصها من قبل بعض النباتات لأغراض خاصة، ولكنها غير مطلوبة للنباتات الأخرى. يُشكل الكربون والأكسجين والهيدروجين نحو 95% من تركيب المادة الجافة للنبات، وهي عناصر غير معدنية يمتصها النبات من الهواء والماء، ويتم تمثيل هذه العناصر خلال عملية التركيب الضوئي Photosynthesis، أما بقية العناصر فهي معدنية يمتصها النبات من محلول التربة بأشكالٍ مختلفة (أيونية أو غير أيونية)، وتقوم بوظائف محددة في النمو وعمليات الاستقلاب، وتطور النبات (الجدول، 9).

الجدول رقم (9): العناصر المعدنية الضرورية لحياة النبات.

العنصر	الشكل الذي يمتصه النبات	النسبة المئوية من الوزن الجاف للنبات	أهم الوظائف التي يؤديها للنبات
العناصر الكبرى (تركيزها في النبات بالـ%)			
الكربون	CO_2	44	المكون الرئيسي للمركبات العضوية
الأوكسجين	H_2O, O_2	44	المكون الرئيسي للمركبات العضوية
الهيدروجين	H_2O	6	المكون الرئيسي للمركبات العضوية
الآزوت	NO_3^-, NH_4^+	4-1	المكون الرئيسي للأحماض الأمينية، البروتينات، الأحماض النووية، الأنزيمات، الكلوروفيل.الخ.
البوتاسيوم	K^+	6-0.5	إصطناع البروتينات، فتح وإغلاق المسامات
الفوسفور	$H_2PO_4^-$, HPO_4^-	0.8-0.1	المكون الرئيسي للـADP و ATP ، الأحماض النووية، الليبيدات، الأنزيمات المرافقة
الكالسيوم	Ca^{+2}	3.5-0.2	المكون الرئيسي لجدر الخلايا، تركيب ونفاذية الأغشية، تنشيط بعض الأنزيمات
المغنزيوم	Mg^{+2}	0.8-0.1	المكون الرئيسي للكلوروفيل، تنشيط بعض الأنزيمات
الكبريت	SO_4^-	1.0-0.05	المكون الرئيسي للأحماض الأمينية والبروتينات وأنزيمA المرافق

العناصر الصغرى (تركيزها في النبات بالـppm)			
الكلور	Cl^-	10000-100	التعديل الحلولي والتوازن الأيوني
الحديد	Fe^{+2}, Fe^{+3}	300-25	اصطناع الكلوروفيل،السايتوكروم،أنزيم النتروجيناز
المنغنيز	Mn^{+2}	800-15	تنشيط بعض الأنزيمات
الزنك	Zn^{+2}	100-15	تنشيط العديد من الأنزيمات، تنشيط وظيفة الكلوروفيل
البورون	$BO_3^-, B_4O_7^-$	75-5	نقل الكربوهيدرات، اصطناع الاحماض النووية
النحاس	Cu^{+2}	30-4	تنشيط مكونات بعض الانزيمات
الموليبدينوم	MoO_4^-	5-0.1	تثبيت الآزوت الجوي، أنزيم الـ nitrate reductase

معيار ضرورية وأهمية العنصر المغذي للنبات Criteria of essentiality

أظهرت نتائج تحليل النبات باستعمال طرق التحليل الحديثة أنّ جسم النبات يحتوي على نحو30 عنصراً، لكن وجود عدة عناصر في النبات لا يعني أنّ كل هذه العناصر ضرورية للنبات. ذكر العالم Arnon (1954) أنّ العنصر يكون ضرورياً للنبات إذا حقق الشروط التالية:

أ- عندما لا يستطع النبات إكمال مراحل نموه الخضري والثمري عند غياب هذا العنصر أو نقصه.

ب- وعندما لا يُصحح هذا النقص إلا بإضافة هذا العنصر.

ج- وعندما يدخل هذا العنصر بشكلٍ مباشر في عمليات الاستقلاب في النبات.

بالاعتماد على هذا التعريف فإنّ العناصر الستة عشر الأولى هي عناصر ضرورية، والعناصر الأربعة الأخرى هي عناصر غير ضروية ولكنها عناصر وظيفية Functional elements في بعض النباتات حسب رأي العالم Nicolas (1961).

تصنيف العناصر الضرورية Classification of essential elements

يمكن تصنيف العناصر الضرورية حسب الكمية المطلوبة للنبات، ووظيفة العناصر في النبات، وحركية العناصر في النبات والتربة، وحسب طبيعتها الكيميائية.

1- التصنيف حسب الكمية المطلوبة Amount required

أ- العناصر الأساسية Basic nutrients: وهي الكربون والأوكسجين والهيدروجين، حيث تشكل نحو 95% من المادة الجافة للنبات.

ب- العناصر الكبرى Macronutrients: يتطلبها النبات بكمياتٍ كبيرة وأهمها: الآزوت، والفوسفور، والبوتاسيوم، والمغنزيوم، والكالسيوم والكبريت، حيث يُعد الآزوت والفوسفور والبوتاسيوم عناصر أولية Primary elements، ويُعد المغنزيوم والكالسيوم والكبريت عناصر ثانوية Secondary elements.

ج- العناصر الصغرى Micronutrients: يتطلبها النبات بكمياتٍ قليلة، أهمها: الحديد، والمنغنيز، والزنك، والنحاس، والبورون، والموليبدينوم، والكلور. وأي نقص أو زيادة لهذه العناصر له تأثير ضار في النبات وفي الغلة النهائية للمحصول.

2- التصنيف حسب وظيفة العناصر في النبات Function in the plants

أ- العناصر التي تدخل في التركيب الرئيس في النبات مثل: الكربون والأوكسجين والهيدروجين.

ب- العناصر الضرورية لتخزين ونقل الطاقة مثل: الآزوت والفوسفور والكبريت.

ج- العناصر الضرورية لمعادلة وتنظيم الشحنات مثل: البوتاسيوم والمغنزيوم والكالسيوم.

د- العناصر الداخلة في تفعيل الأنزيمات وسلسلة نقل الإلكترونات مثل: الحديد، والمنغنيز، والزنك، والنحاس، والبورون، والموليبدينوم، والكلور.

3- التصنيف حسب حركية العناصر في النبات والتربة:

1) التصنيف حسب حركية العناصر في التربة: تؤثر حركية العناصر في التربة في وفرة العناصر للنبات وطريقة إضافة الأسمدة، وتقسم العناصر حسب حركيتها في التربة إلى:

أ- عناصر متحركة Mobile elements: وهي منحلة في محلول التربة بشكلٍ كبير ولا تُدمص على معقدات الطين، مثال: NO_3، SO_4، BO_3، Cl، Mn.

ب- عناصر قليلة الحركة Less mobile elements: وهي منحلة في محلول التربة لكنها تُدمص على معقدات الطين لذلك تقل حركيتها في التربة، مثال: NH_4، K، Ca، Mg، Cu.

ب-عناصر غير متحركة Immobile elements: وهي عالية التفاعل ويتم تثبيتها في التربة، مثال: H_2PO_4، HPO_4، Zn .

2) التصنيف حسب حركية العناصر في النبات: تفيد معرفة حركية العناصر في النبات في تحديد نقص أي عنصر، فالعنصر المتحرك يتحرك إلى نقاط النمو (نحو الأعلى) عند نقصه، لذلك تظهر علامات النقص على الأوراق السفلية، وتقسم العناصر حسب حركيتها في النبات إلى:

أ- عناصر عالية الحركة: مثل N، K، P.

ب- عناصر متوسطة الحركة: مثل Zn.

ج- عناصر قليلة الحركة: مثل S، Fe، Mn، Cu، Mo، Cl.

د- عناصر غير متحركة: مثل Ca، B.

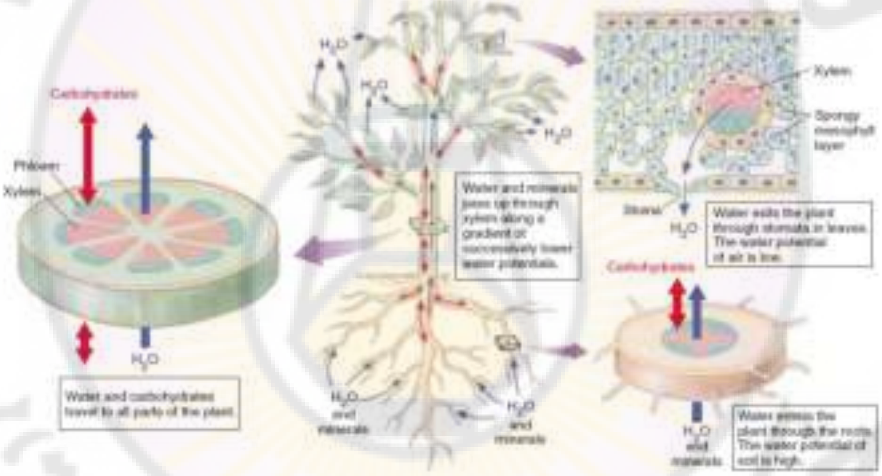
4- التصنيف حسب الطبيعة الكيميائية للعناصر: يمكن تصنيف العناصر حسب طبيعتها الكيميائية إلى:

أ- الكاتيونات: K، Ca، Mg، Fe، Mn، Zn، Cu.
ب- الأنيونات: NO_3، H_2PO_4، SO4.
ج- العناصر المعدنية: K، Ca، Mg، Fe، Mn، Zn، Cu.
د- العناصر اللامعدنية: N، P، S، B، Mo،Cl.

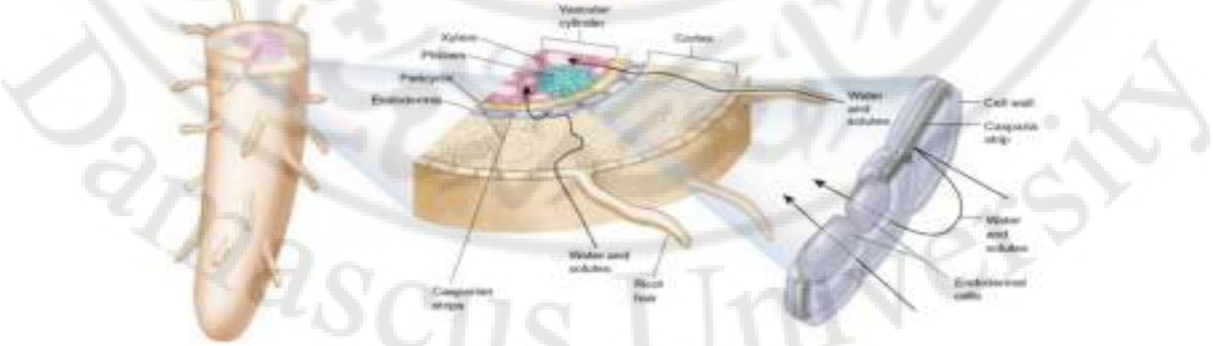
نقل العناصر المعدنية المغذية إلى سطح الجذور Transport of nutrients to root surface

1- نظرية محلول التربة Soil solution theory

حسب هذه النظرية فإنّ العناصر المعدنية تنحل في الماء وتنتقل إلى سطح الجذور بواسطة الجريان الكلي Mass flow أو الانحلال Diffusion. في حالة الجريان الكلي تنتقل الأيونات والأملاح مع حركة الماء إلى الجذور، أمّا في حالة الانحلال فإنّ انتقال العناصر يعتمد على فرق التركيز بين سطح الجذور والتربة، حيث تنتقل العناصر من المنطقة عالية التركيز إلى المنخفضة التركيز (الشكلين،14 و15).



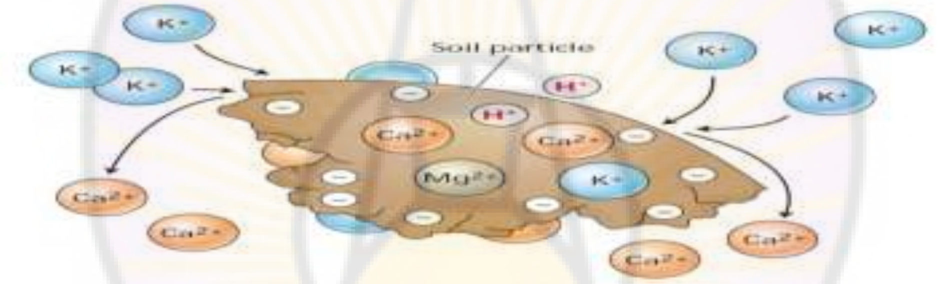
الشكل رقم (14): مسار حركة الماء والعناصر المعدنية من التربة إلى النبات ثم إلى خارج النبات.



الشكل رقم (15): مسار نقل العناصر المعدنية من التربة عبر جذور النبات.

2- نظرية التبادل المباشر Contact exchange theory

حسب هذه النظرية فإنّ التماس المباشر بين جذور النبات وغرويات التربة يسمح بالتبادل المباشر بين الهيدروجين (H^+) المنطلق من جذور النباتات والكاتيونات المدمصة على غرويات التربة (الشكل،16). عن طريق تحرير الهيدروجين وتشكيل حمض الكربون (H_2CO_3) الناتج عن اتحاد الماء مع غاز ثاني أكسيد الكربون المتشكل نتيجة تنفس الجذور. تُشجع الجذور تبادل الأيونات المدمصة على غرويات الطين والدبال، حيث يمكّنها ذلك من الحصول على العناصر المعدنية المغذية. يعتمد تحرير الهيدروجين وتشكيل حمض الكربون على شدّة تنفس الجذور وبالتالي توافر الأكسجين والكربوهيدرات للجذور إضافةً لتأثير حرارة التربة ودرجة الحموضة.



الشكل رقم (16): التبادل الأيوني Ionic exchange على سطح جزيئات التربة.

امتصاص العناصر المعدنية Absorption of nutrients

يؤثر في امتصاص العناصر المعدنية من محلول التربة مجموعة من العوامل أهمها:

1- عوامل خارجية: حالة الإرجاع والأكسدة للعنصر، وتركيز العنصر، ومحتوى التربة من الماء، وتهوية التربة، وحرارة التربة، وتفاعل التربة.
2- عوامل داخلية: جدار الخلية، ونوع الخلية النباتية، ومرحلة تطور النبات والنتح.

ويتم امتصاص العناصر المعدنية من محلول التربة حسب آليات الامتصاص التالية:

1- الامتصاص الفعّال Active absorption: حيث يتم امتصاص العناصر المغذية من محلول التربة الذي يحتوي تركيز منخفض من العناصر بالمقارنة مع نسغ النبات، وذلك ببذل الطاقة.

2- الامتصاص غير الفعّال Passive absorption: تدخل العناصر إلى النبات مع تيار النتح بدون بذل أي طاقة.

نقل العناصر المعدنية المغذية وتراكمها داخل النبات: تدخل العناصر الممتصة عبر الشعيرات الجذرية إلى منطقة القلنسوة الجذرية Cortex region، حيث تتراكم هناك عكس فرق التدرج بالتركيز، ومن منطقة القلنسوة تدخل العناصر المعدنية إلى الأوعية الخشبية Xylem vessels ، وتصل إلى الأوراق بالجريان الكلي Mass flow عن طريق تيار النتح. بالنسبة إلى الآزوت فإنّ جزءاً من الآزوت النتراتي (NO_3-N) يتم إرجاعه إلى آزوت أمونياكي (NH_4-N) وحمض غلوتامين في الجذور. تجتاز هذه المركبات مع الجزء المتبقي من الآزوت النتراتي الجزء الحي بين الخلايا والمسمى Symplast وتدخل الأوعية الخشبية، حيث تنتقل فيها نحو الأعلى بوساطة الجريان الكلي مع تيار النتح، وينتهي بها المطاف في الأوراق حيث يتم إرجاع النترات هناك، ثمّ تدخل المركبات المُرجعَة الأوعية اللحائية Phloem vessels وتُنقل إلى نقاط النمو مثل الأوراق الفتية، والجذور، والثمار..إلخ.

تمثيل العناصر المغذية في النبات Nutrient assimilation: إنّ التحويل الاستقلابي للعناصر المغذية للنبات إلى مركبات عضوية يُعرف بالتمثيل. يتحول غاز CO_2 استقلابياً إلى كربوهيدرات بعملية التمثيل الضوئي، ويدخل جزء من الماء أيضاً في العديد من التفاعلات الاستقلابية لكن معظمه يُفقد عن طريق النتح. تخضع بعض العناصر لعمليات تحول استقلابية كثيفة خلال عملية تحولها إلى مركبات عضوية وبعضها لا يخضع لأي عمليات؛ وجزء من العناصر الممتصة يتم تخزينها في الفجوات دون أي تمثيل.

1- تمثيل الآزوت في النبات Assimilation of nitrogen: يمتص النبات الآزوت على الغالب على شكل نترات (آزوتات) NO_3 أو أمونيوم NH_4. معظم النترات الممتص بواسطة الجذور تُنقل إلى الأوراق مع تيار النسغ الناقص، لذلك فإنّ تمثيل الآزوت يتم بشكلٍ رئيس في الأوراق وجزء بسيط فقط في الجذور، وذلك حسب المراحل التالية:

أ- يتحول النترات أولاً في النبات إلى أمونيا في خطوتين:

الأولى: يتم إرجاع النترات إلى نتريت (آزوتيت) NO_2.

$$NO_3 + NADH + H^+ \xrightarrow{\text{nitrate reductase}} NO_2 + NAD + H_2O$$

يتوسط هذا التفاعل أنزيم النترات ريدوكتاز ويتم تزويد القوة المرجعة من المركب NADPH. بما أنّ الموليبدينوم يدخل في تكوين هذا الأنزيم، فأي نقص في هذا العنصر يوقف تمثيل النترات ويؤدي إلى أعراض نقص الآزوت إضافةً لنقص الموليبدينوم.

في الخطوة الثانية: يتحول النتريت إلى أمونيا بوجود أنزيم Nitrite reductase

$$NO_2 + 6e + 7H^+ \xrightarrow{\text{nitrIte reductase}} NH_3 + 2H_2O$$

يحدث هذا التفاعل في الأوراق الخضراء في الصّانعات الخضراء، حيث يتم استخدام جزء من الطاقة المُصنّعة خلال تفاعلات الضوء في إرجاع النتريت إلى أمونيا. أيضاً يمكن أن يحدث هذا التفاعل في الظلام في الجذور والأوراق باستخدام جزء من الطاقة المحررة أثناء التنفس. تتميز النباتات الرباعية الكربون بكفاءة أكبر في تمثيل الآزوت بالمقارنة مع النباتات الثلاثية الكربون. يتم في النباتات الرباعية الكربون إرجاع غاز CO_2 في خلايا الحزم الوعائية Bundle sheath cells بينما يحدث إرجاع النتريت وتفاعلات الضوء في خلايا النسيج المتوسط Mesophyll cells، في حين يتم في النباتات الثلاثية الكربون إرجاع غاز CO_2 والنتريت في خلايا النسيج المتوسط Mesophyll cells، وبالتالي يكون هناك منافسة على الطاقة اللازمة للإرجاع.

ب- تحول الأمونيا إلى أحماض أمينية: إن وجود الأمونيا في النبات نتيجة لإرجاع النتريت إلى أمونيا أو امتصاص الأمونيوم NH_4 ، أو تحطم البروتينات خلال العمليات الفيزيولوجية المختلفة أو تحطم اليوريا الممتصة من قبل النبات إلى أمونيا، أو من عملية تثبيت الآزوت. تتحد الأمونيا مع حمض الغلوتاميك Glutamic acid لتشكيل الغلوتامين، ويتحد بدوره الغلوتامين مع Ketoglutaric acid لتشكيل جزيئتين من حمض الغلوتاميك (الحمض الأميني)، يُستعمل حمض الغلوتاميك بوصفه مادة أساسية لتصنيع الأحماض الأمينية الأخرى، وتُعرف هذه العملية بالتحول الأميني Transamination.

$$NH_3 + \text{Glutamic acid} + ATP \xrightarrow{\text{Glutamic synthetase}} \text{Glutamine} + ADP$$

Glutamine + Alpha Ketoglutaric acid $\xrightarrow{\text{Glutamic acid synthetase}}$ 2 Glutamic acid

2- تمثيل الفوسفات Phosphate assimilation: يتم نقل جزء من الفوسفات الممتص من الجذور إلى الأوراق ويبقى جزء في الجذور، والجزء المتبقي في الجذور يتم تمثيله بعملية الفسفرة التأكسدية Oxidative phosphorylation باستعمال الطاقة المحررة خلال عملية التنفس.

$$\text{ADP} + \text{Pi} \longrightarrow \text{ATP}$$

الفوسفات المنقولة إلى الأوراق يتم تمثيلها بوساطة عملية الفسفرة الضوئية photosynthetic phosphorylation في الصّانعات الخضراء باستعمال الطاقة الناتجة عن تفاعلات الضوء.

$$\text{ADP} + \text{Pi} \longrightarrow \text{ATP}$$

الفوسفات التي تمّ تمثيلها إلى طاقة ATP يتم نقلها بسرعة بالعمليات الاستقلابية التالية إلى مركبات نباتية مفسفرة مختلفة مثل السكريات، والفوسفات، والفوسفوليبيدات والنيكليوتيدات..الخ.

3- تمثيل الكبريت Assimilation of sulphate: يتم تمثيل الكبريتات في الصّانعات الخضراء باستعمال الطاقة المحررة خلال تفاعلات الضوء.

Sulphate ⟶ sulphite ⟶ sulphide ⟶ cysteine

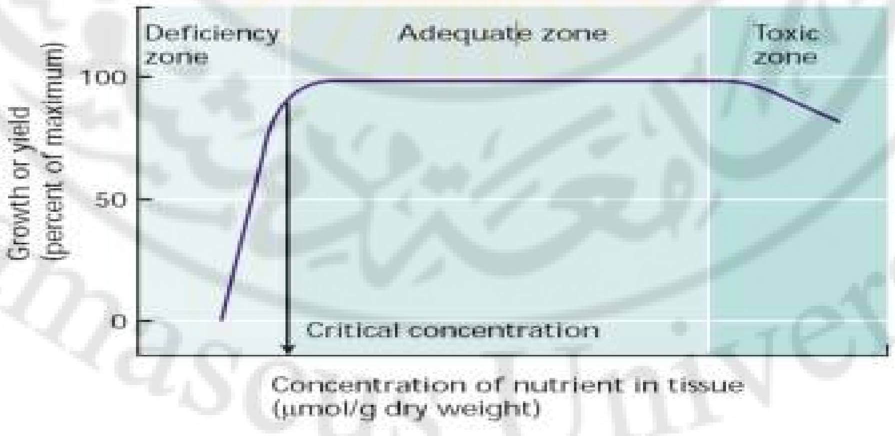
تتفاعل أيونات الكبريتات (SO^-_4) مع الـATP ويتم تنشيطها، ثمّ يتم إرجاع الكبريتات إلى كبريتيت (SO^-_2)، ومن ثمّ بمساعدة الفيرودوكسين، يُرجع الكبريتيت إلى كبريتيد (SH)، حيث يتم اندماجها مع الحمض العضوي لتشكيل الحمض الأميني السيستين.

4- تمثيل الكاتيونات Assimilation of cations: إنّ الكاتيونات مثل: Ca, K, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Na. يتم تمثيلها إمّا من خلال قوى الانجذاب الأيونية الضعيفة

للأنيونات العضوية والمعدنية المنحلة، أو من خلال تشكيل الروابط التشاركية. فالبوتاسيوم والكالسيوم والمغنزيوم تنجذب إلى الأنيونات في المحلول من خلال قوة حقلها الكهربائي. أما تمثيل كاتيونات العناصر الصغرى المعدنية مثل الحديد والمنغنيز والزنك والنحاس والموليبدينوم فيتم بوساطة تشكيل الروابط التشاركية، وتستطيع العديد من المواد داخل الخلية النباتية تشكيل مثل هذه الروابط مع المعادن بما فيها نحو ربع مجموع أنزيمات الخلية النباتية، من هذه المواد أنزيمات الفوسفيتاز، الكلوروفيل، النظام الضوئي الثاني، السايتوكرومات، البروتينات المحتوية على الكبريت وعلى الحديد.

نقص العناصر المغذية وسميتها Deficiency and toxicity of nutrients:

عندما لا تتوافر العناصر المعدنية المغذية للنبات بالكمية الكافية، فإنّ نمو النبات يتأثر، من الممكن أن لا تظهر أعراض النقص على النباتات حتى حدٍ معين من محتوى هذه العناصر في النباتات، لكن النمو يتأثر وهذه الحالة تعرف بالجوع المخفي Hidden hunger، إذا تناقص محتوى هذه العناصر تظهر على النبات أعراض النقص Deficiency symptoms. تختلف أعراض النقص من محصول لآخر لكنها تمتلك أنموذجاً عاماً من حيث التأثير، وتكون بعض أعراض النقص متداخلة مع أعراض بعض الأمراض التي تصيب النباتات وبعض أعراض الإجهادات، لذلك يجب أخذ الحيطة عند التشخيص، أما إذا زاد تركيز العناصر المعدنية في محلول التربة عن متطلبات النبات فيمكن أن يمتص النبات كمياتٍ زائدة من هذه العناصر ما يؤدي إلى عدم توازن محتوى العناصر داخل النبات وظهور أعراض السمية Toxicity symptoms (الشكل، 17).



الشكل رقم (17): العلاقة بين نمو أو غلة النبات ومحتوى العناصر المعدنية في أنسجة النبات.

دورات أهم العناصر المغذية للنبات في الطبيعة وعلاقتها مع الوسط البيئي:

1- دورة الآزوت Nitrogen cycle: يُعد الآزوت من العناصر الكبرى الضرورية لنمو النباتات، إذْ يتطلبه النبات بكمياتٍ كبيرة، وهو يدخل في تركيب الأحماض الأمينية، والبروتينات، والأنزيمات، والكلوروفيل، والأحماض النووية.إلخ. تحصل النباتات الخضراء على الآزوت من محلول التربة على شكل أمونيوم NH_4 أو نترات NO_3. يُعد الآزوت الجوي المصدر الرئيس لمركبات الآزوت في الطبيعة، هذا الآزوت الجوي غير متوافر بشكلٍ مباشر للكائنات الحية باستثناء بعض البكتريا المثبتة للآزوت، وبعض الطحالب Blue green algae. وبشكلٍ عام، تتضمن دورة الآزوت الخطوات التالية:

1- تحويل الآزوت الجوي الحر (N_2) إلى مركبات آزوتية Nitrogen fixation: وتتم هذه الخطوة بتثبيت الآزوت حيوياً Biological nitrogen fixation، أو تثبيت الآزوت لاحيوياً Physio-chemical nitrogen fixation.

2- تمثيل المركبات الآزوتية الممتصة بوساطة النبات على صورة (NH_4, NO_3) وتحويلها إلى مركبات آزوتية عضوية (أحماض أمينية وأميدات)، وتحصل الحيوانات على الآزوت اللازم لها من خلال تغذيتها على النباتات.

3- تحرير الأمونيا Ammonification: يتم مهاجمة البقايا العضوية للنباتات والحيوانات بوساطة العديد من الكائنات الحية الدقيقة، ولاسيما الـ -Actinomycetes وبكتريا الـ -Bacillus ، حيث تستخدم هذه الكائنات المركبات العضوية في عملياتها الاستقلابية وتحرر الأمونيا.

4- التأزت Nitrification: تقوم بعض البكتيريا مثل Nitrosomonase، Nitrococcus..الخ، في المحيطات والتربة بتحويل الأمونيا إلى آزوتيت (NO_2)، حيث تستعمل هذه البكتيريا الطاقة المخزنة في أجسام النباتات والحيوانات الميتة في عملياتها الاستقلابية.

$$NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H_2O + energy$$

تقوم بكتريا أخرى مثل Nitrobacter، Nitrocystis..الخ، بتحويل الآزوتيت إلى آزوتات (NO_3) وتحصل على الطاقة.

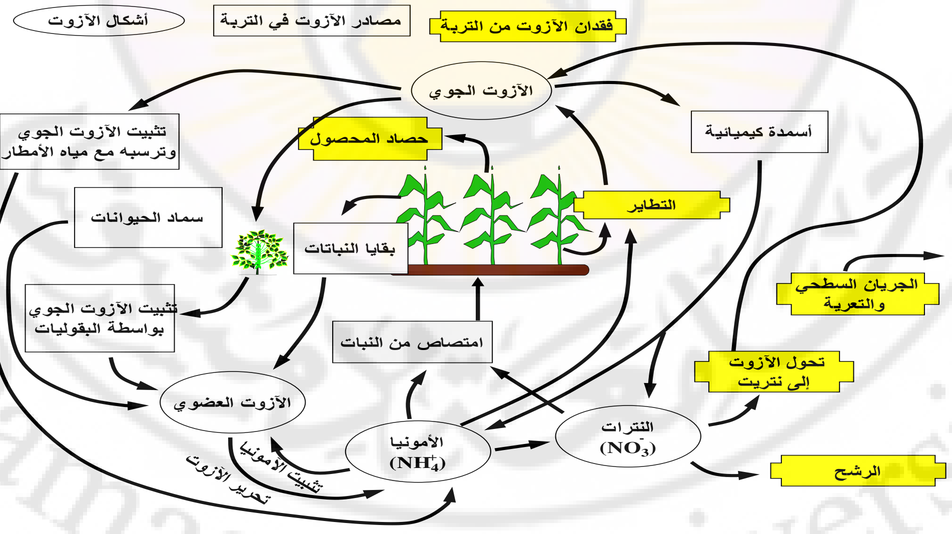
$$2NO_2^- + O2 \rightarrow 2NO_3^- + energy$$

5- تطاير الآزوت Denitrification: يتحول جزء من الأمونيا والآزوتات إلى آزوت حر (N_2) بواسطة بعض الكائنات الحية الدقيقة مثل pseudomonase aeruginosa، Thiobacillus denitrificans..الخ.

$$2NO_3^- \rightarrow 2NO_2 \rightarrow 2NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$$

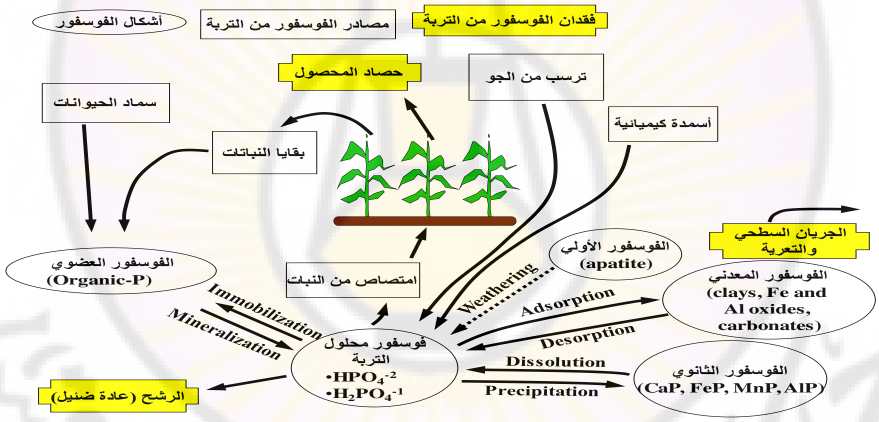
6- الترسيب والترشيح Sedimentation and leaching: يتم غسل جزء من الآزوتات في التربة إلى البحار أو ترشح عميقاً في التربة مع ماء الرشح Percolation water، هذه الآزوتات المفقودة بالرشح تُحبس في صخور التربة وهذا ما يسمى بترسيب الآزوت، هذا الآزوت المحتبس في الصخور لا يتحرر إلا إذا تعرّضت هذه الصخور إلى عمليات الحت والتعرية.

إذاً هناك كمية كبيرة من الآزوت يتم تثبيتها في أجسام النباتات والحيوانات والكائنات الحية الدقيقة، وهناك توازن دائماً بين هذه الكمية والكمية المثبتة من الجو (Input and outflow of nitrogen) ضمن النظام البيئي، ويوضح الشكل (18) دورة الآزوت في الطبيعة.



الشكل رقم (18): دورة الآزوت في الطبيعة.

2- دورة الفوسفور Phosphorus cycle: يُعد الفوسفور المكون الأساسي للأحماض النووية ومركبات الطاقة (ADP-، ATP، NADP)، والفوسفوليبيدات..إلخ. يوجد الفوسفور في التربة على شكل فوسفات صخري، فوسفات الـApatite، فوسفات الكالسيوم، Fluor Apatite {$Ca_{10}Fe_2(PO_4)_6$}، فوسفات الحديد وفوسفات الألمنيوم، وتُعتبر التربة ذات المنشأ من الفوسفات الصخري غنية بعنصر الفوسفور، ويوجد في التربة بشكلين أساسين هما الفوسفور العضوي Organic-P، والفوسفور المعدني Inorganic-P، ولكن يمتص النبات الفوسفور من التربة بشكله المعدني المنحل في محلول التربة. يتحول الفوسفور الممتص من قبل النبات بداخله إلى الشكل العضوي، وينتقل من النبات إلى مختلف المستويات الغذائية في النظام البيئي بشكل فوسفات عضوي، وبعد موت النباتات والحيوانات تقوم المفككات بمهاجمتها وتحرر الفوسفور إلى البيئة، وتستمر هذه العملية بطريقة دورية تُعرف بدورة الفوسفور (الشكل، 19).



الشكل رقم (19): دورة الفوسفور في الطبيعة.

دور الميكوريزا في توفير الفوسفور في التربة: تُعد فطريات الميكوريزا من الأحياء التي تُساعد على انحلال عنصر الفوسفور في التربة وزيادة توافره للنبات عن طريق نموها على جذور النبات، ما يزيد من مساحة الجذور وإفراز بعض الأحماض العضوية التي تساعد في تحطيم الرابطة بين الفوسفور وغرويات التربة فيصبح الفوسفور بشكلٍ منحل قابلاً للامتصاص من قبل جذور النباتات بعلاقة تسمى العلاقة التكافلية Symbiotic relation بين الميكوريزا وجذور النباتات.

3- دورة البوتاسيوم Potassium cycle: يُعد البوتاسيوم من العناصر الكبرى الضرورية للنبات، وعلى عكس العناصر الكبرى الأخرى، فإنّه لم يثبت حتى الآن دخول عنصر البوتاسيوم في بناء المركبات العضوية الضرورية واللازمة لاستمرار وجود النبات. وبالرغم من ذلك فإنّ البوتاسيوم عنصر لا غنى عنه، ولا يمكن لعنصر آخر مشابه له كالصوديوم أو الليثيوم أن يحل محله تماماً، إذْ يوجد البوتاسيوم دائماً على هيئة مركبات غير عضوية ذائبة، ولو أنه يتحد أيضاً بالأحماض العضوية ويتدخل في تكوين الكربوهيدرات وما ينشأ منها من مركبات أُخرى. ويعمل على تنظيم محتويات الخلية من الماء، كما أنه ينشط الأنزيمات. يوجد البوتاسيوم في المعادن الأولية التي تُعد المصدر الأساسي للبوتاسيوم مثل الفلدسبارات البوتاسية، كما يوجد في كثير من معادن الطين الثانوية، وعلى هذا تكون الأراضي الطينية ذات محتوى أكبر من البوتاسيوم بالمقارنة مع الأراضي الرملية. يوجد البوتاسيوم في التربة بأشكال متعددة ويمكن تقسيمها إلى:

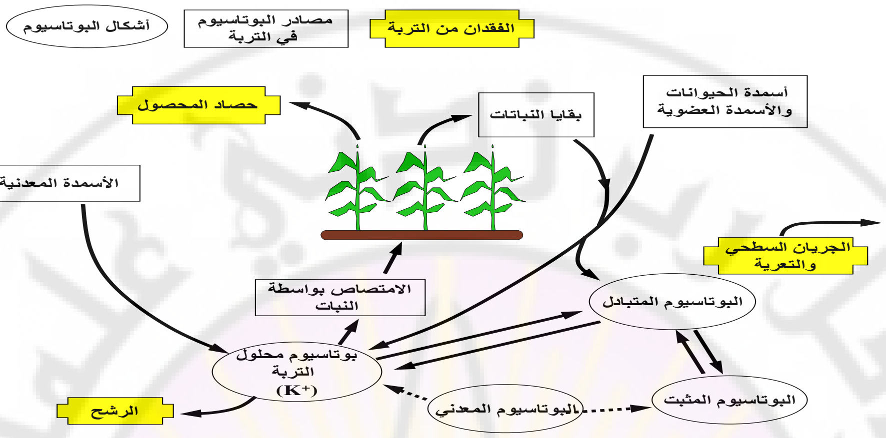
أ- البوتاسيوم الموجود في تركيب المعادن الأرضية.

ب- البوتاسيوم المُثبت (غير قابل للتبادل).

ج- البوتاسيوم المتبادل.

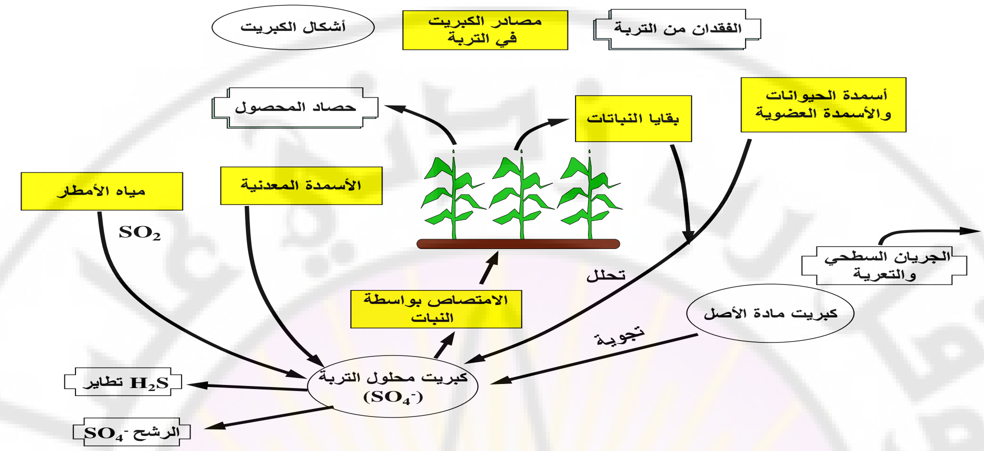
د- البوتاسيوم الذائب في المحلول الأرضي للتربة.

ويطلق على الصورتين الأخيرتين غالباً البوتاسيوم المُيسر (Available K)، حيث تُعدّان ذات أهمية من وجهة نظر تغذية النبات وإنتاج المحاصيل، ويُعد البوتاسيوم الميسر من أسهل مصادر إمداد جذور النبات النامي بالبوتاسيوم. ويُعد البوتاسيوم المتبادل صورة ميسرة للنبات، حيث تتحول هذه الصور إلى الصورة الأيونية K^+ الذائبة في المحلول الأرضي، ومن مصادر البوتاسيوم الذائب في المحلول الأرضي البوتاسيوم المضاف في صورة أسمدة كيميائية. تمتص النباتات البوتاسيوم كأيون K^+ بصورة أساسية من المحلول الأرضي وكمية قليلة من البوتاسيوم المتبادل على أسطح التبادل عن طريق التبادل بالتماس، وكمية أخرى من البوتاسيوم الذائب في المحلول الأرضي تدخل في تفاعلات التبادل الأيوني، ويحدث لها إدمصاص على أسطح الغرويات المعدنية. وعندما تكون كمية البوتاسيوم المضافة للتربة بصورة أسمدة كبيرة بالمقارنة مع قدرة التربة على التبادل، يرشح جزء منه إلى أعماق التربة، وهذه الحالة مألوفة خاصةً في الترب الرملية الخفيفة. ويوضح الشكل (20) دورة البوتاسيوم في الطبيعة.



الشكل رقم (20): دورة البوتاسيوم في الطبيعة.

دورة الكبريت في الطبيعة Sulphur cycle: يوجد الكبريت في التربة الزراعية في الصورة المعدنية والصورة العضوية، حيث يصل الكبريت إلى التربة، إما في صورة مخلفات زراعية أو أسمدة معدنية أو مع مياه الأمطار أو مع المكونات المعدنية للتربة والناتجة من عمليات التجوية للصخور الغنية بالكبريت. يوجد في تركيب بعض المعادن الأرضية ومنها البيريت (Pyrite FeS_2)، لاسيما في الأراضي الغدقة، في حين يوجد في تركيب الجبس أو كبريتات الكالسيوم ($CaSO_4$) في المناطق الجافة. يُعد الكبريت العضوي الصورة الأكثر وجوداً في الطبقة السطحية من الأرض الزراعية، حيث تُعد المادة العضوية مصدراً رئيساً للكبريت في الأرض الزراعية ولاسيما في المناطق الرطبة. ويوجد الكبريت في تركيب الأحماض الأمينية مثل السيستين والمثيونين، وتتحلل هذه المكونات بفعل الكائنات الحية الدقيقة وينطلق منها الكبريت المعدني في عملية تُعرف بعملية المعدنة Mineralization للكبريت. يمكن أن يُضاف الكبريت للتربة مع مياه الأمطار والأنهار، نتيجة لاحتراق المركبات الكبريتية كالفحم والمواد البترولية، حيث تنطلق بعض الأكاسيد الكبريتية مثل أكسيد الكبريت (SO_2) إلى الهواء الجوي. وهذه الغازات تصل إلى الأرض مرة أخرى عن طريق مياه الأمطار أو مياه الأنهار، كذلك يمكن للنبات امتصاص الكبريت على هذه الصورة (SO_2). يُعد الكبريت العضوي صورة غير ميسرة للنبات؛ وبتحلل المادة العضوية وحدوث عملية المعدنة للكبريت يتحول إلى كبريتيد الهيدروجين (H_2S) ثم إلى كبريتات ($SO4^{-2}$). ويبين الشكل (21) دورة الكبريت في الطبيعة.



الشكل رقم (21): دورة الكبريت في الطبيعة.

ويؤدى غمر الأرض بالماء إلى نشوء ظروف لاهوائية، وبالتالي تسود ظروف الاختزال، ويتم اختزال الكبريتات بوساطة بكتريا من جنس Desulfovibrio إلى كبريتيد الهيدروجين (H_2S)، ويتحد جزء منه مع الحديد ويتكون كبريتيد الحديد، والجزء الأخر يمكن أن يحدث له فقد إلى الغلاف الجوي. تحت الظروف الهوائية يتكون أنيون الكبريتات SO_4^{2-} ، وهذا الأنيون متحرك في التربة لزيادة قابلية ذوبان أملاحه في التربة، ومن المتوقع حدوث فقد للكبريت من التربة على هذه الصورة عن طريق رشح هذا الأنيون مع مياه الصرف. وتُعد الكبريتات الصورة التي يمتصها النبات، وبعد امتصاص النبات للكبريتات يحدث اختزال لها وتدخل في تكوين المركبات العضوية. ويمكن أن يحدث تمثيل للكبريت داخل أجسام الكائنات الدقيقة الموجودة بالأرض، ثمّ يعود الكبريت العضوي مرة أخرى للأرض مع المخلفات النباتية والحيوانية وتعاد الدورة مرة أخرى. يجب أيضاً ذكر أن من المصادر الأخرى للكبريت بالأرض الأسمدة التي تحوي عنصر الكبريت مثل الأسمدة الآزوتية والفوسفاتية وأسمدة أخرى، كذلك يضاف للأرض في صورة مُبيدات فطرية وحشرية.

Damascus University

الفصل الرابع

استعمالات الكربون وإنتاج المادة الجافة

Carbon Utilization and Dry Matter Production

أولاً- استقلاب (أيض) الكربون في الخلية النباتية Carbon Metabolism in the Plant cell

عملية التمثيل الضوئي Photosynthesis:

أحدثت الكائنات الحية ذاتية التغذية Photo-autotrophic الأساس المادي الباعث لتطور الحياة على سطح البسيطة، بسبب مقدرتها على القيام بعملية التمثيل الضوئي، التي تتمثل بامتصاص غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، وتحرير غاز الأوكسجين (O_2)، وهذان الغازان مهمان بالسوية والأهمية نفسها لجميع الكائنات الحية. يمثل الأوكسجين العنصر الأساسي للتنفس Respiration، وإنتاج الطاقة اللازمة لسير العمليات الأيضية Metabolic processes، والمحافظة على المكونات الخلوية. وتُعد المادة الجافة (السكريات Carbohydrates) المُصنَّعة بفضل عملية التمثيل الضوئي، بمنزلة المادة الأولية التي تُؤكسد لإنتاج الطاقة خلال عملية التنفس، وتشكل المادة الأولية للتصنيع الحيوي Biosynthesis للعديد من المركبات العضوية الأخرى، مثل البروتينات، والمواد الدهنية، وتُمتص خلال عملية التمثيل الضوئي الطاقة الضوئية Radiant energy، وتُحول إلى طاقة كيميائية مخزونة في روابط المركبات العضوية (السكريات) المُصنَّعة. ويمكن الحصول على طاقة كامنة مقدارها 479 كيلو جول من كل غرام واحد وزن ذري من الكربون الممتص. وتتضمن عملية التمثيل الضوئي العمليات الكيميوضوئية Photochemical Processes، التي لا تتم إلاَّ بوجود الضوء (تفاعلات الضوء Light reactions)، وعمليات أنزيمية Enzymatic Processes، التي لا يحتاج إتمامها إلى الضوء (تفاعلات الظلام Dark reactions)، بالإضافة إلى عمليات الانتشار Diffusion، التي يتم فيها التبادل الغازي لكلٍ من غاز الفحم (CO_2)، وغاز الأوكسجين (O_2) بين الصانعات الخضراء Chloroplasts، والوسط المحيط، وحقيقةً، فإن كل واحدة من هذه العمليات تتأثر بالعديد من العوامل الداخلية والخارجية، التي يمكن أنْ تؤثر سلباً في كفاءة هذه العملية بشكلٍ عام.

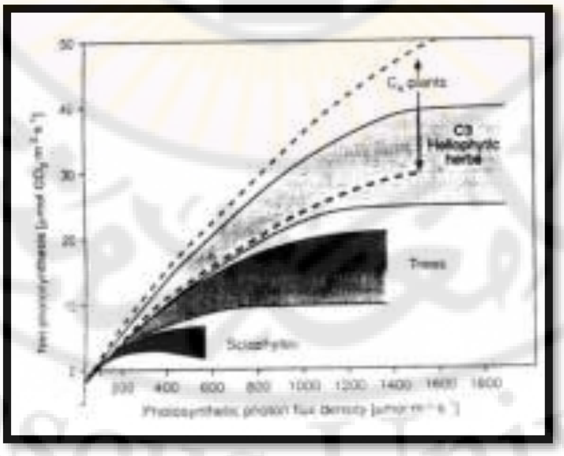
ثانياً- تأثير العوامل الخارجية في عملية تبادل غاز الفحم

The effect of External Factors on CO_2 Gas Exchange

يتأثر انتشار غاز الفحم عبر المسامات Stomata، أثناء عملية التبادل الغازي بالعديد من العوامل الخارجية. ونظراً إلى كون عملية التمثيل الضوئي هي عملية كيميوضوئية، فإنَّ هذه العملية تعتمد بشكلٍ رئيس على إتاحة الطاقة الضوئية، في حين تتحدد عملية التمثيل الضوئية كعملية كيميوحيوية Biochemical بتوافر غاز الفحم ضمن مراكز التثبيت في الصانعات الخضراء CO_2-fixation sites، ودرجة الحرارة، وكمية المياه والعناصر المعدنية المغذية المتاحة للنبات. وعادةً ما يتحدد معدل انتشار غاز الفحم عبر المسامات بدرجة الناقلية المسامية Stomatal Conductance (g_s)، التي تتحدد بدورها بالجهد المائي Water potential (Ψ_w) داخل الخلية النباتية. وتُعد الحرارة من العوامل البيئية الأكثر أهميةً المؤثرة في عملية التبادل الغازي التنفسي Respiratory gas exchange.

استجابة عملية التمثيل الضوئي للضوء The light Response of Photosynthesis

منحنى استجابة الضوء The light Response Curve: يزداد في البداية معدل امتصاص الأوراق لغاز الفحم بشكلٍ خطي مع زيادة شدة الإشعاع الضوئي، ولكن لا يلبث أنْ يتراجع، ويتوقف قبل وصوله إلى القيمة العظمى. وإنَّ العلاقة بين امتصاص الضوء ومعدل صافي التمثيل الضوئي تتبع منحنى التشبع Saturation Curve (الشكل،22).



الشكل رقم (22): استجابة معدل صافي التمثيل الضوئي للتباين في شدة الإشعاع الضوئي عند درجات الحرارة المثلى، وتركيز غاز الفحم في الوسط المحيط.

يبدأ منحنى الاستجابة للضوء عند الشدّات الضوئية المنخفضة، ويستمر بالازدياد طالما أنَّ معدل تحرير غاز الفحم بفعل التنفس يفوق معدل امتصاص غاز الفحم بعملية التمثيل الضوئي. وعند الشدّات الضوئية المنخفضة Low Photon flux densities، فإنَّ كمية غاز الفحم المنطلقة من عملية التنفس يمكن أنْ تفوق كمية غاز الفحم المثبتة Fixed بعملية التمثيل الضوئي، وينجم عن ذلك تحرير واضح لغاز الفحم. وعندما تتساوى كمية غاز الفحم المنطلقة من التنفس مع كمية غاز الفحم المثبتة بالتمثيل الضوئي، بحيث لا يمكن قياس أي تبادل غازي، فإنَّ مستوى الشدة الضوئية يُسمى نقطة التشبع الضوئي Light compensation point(Lc). وتبعاً لذلك فإنَّ النباتات التي تتنفس بشدةٍ أكبر تحتاج إلى ضوء أكثر للتعويض بالمقارنة مع النباتات التي تتنفس بشكلٍ أقل، أي أنَّ نقطة التعويض الضوئي تتناسب طرداً مع معدل التنفس. وعندما يتم تجاوز نقطة التعويض الضوئي، فيلاحظ في البداية ازدياداً خطياً Linear increase في معدل امتصاص CO_2، مشيراً إلى وجود علاقة طردية Proportionality بين الشدة الضوئية والغلة التمثيلية Photosynthetic yield، وتتوقف هذه العملية بالمجمل على سرعة تفاعلات الضوء. وكلما ازدادت غلة الضوء Quantum yield(Φ_a) (تمثل عدد المولات المثبتة من CO_2 إلى عدد المولات الممتصة من الفوتونات الضوئية)، كان منحنى استجابة الضوء أكثر انحداراً.

$$\text{كفاءة عملية التمثيل الضوئي}\quad \Phi_a\,[CO_2] = \frac{\textbf{Biochemical work (mol } CO_2 \textbf{ converted)}}{\textbf{Absorbed light quanta (mol photons)}}$$

وتتراوح قيمة غلة الضوء (Φ_a) للأنواع النباتية الأرضية الراقية بين 0.05 إلى 0.12. وعند المستويات العالية من الشدة الضوئية، فإنَّ الكفاءة التمثيلية Photosynthetic efficiency تزداد بشكلٍ طفيف فقط إلى أنْ تُصبح عملية التمثيل الضوئي مشبعة ضوئياً Light-saturated(Ls). وعند هذه المرحلة لا يصبح معدل امتصاص CO_2 محدداً بتفاعلات الضوء، إنّما يتحدد بالعمليات الأنزيمية (تفاعلات الظلام)، ومدى توافر غاز الفحم في الوسط المحيط، ومن ثمَّ فرق التدرج في تركيز CO_2 بين مراكز التثبيت في الأوراق والوسط المحيط. عموماً، إنَّ مواقع كلٍ من نقطة التعويض الضوئي (Lc)، ونقطة التشبع الضوئي (Ls) على منحني الاستجابة تعكس حالات الشدة الضوئية في البيئات التي تنتشر فيها الأنواع النباتية المختلفة (الشكل،22). ويبين الجدول (10) قيم التعويض والتشبع الضوئي في الأوراق المفردة، وعند تركيز CO_2 في الوسط المحيط، ودرجة الحرارة المثلى للعديد من الأنواع النباتية.

الجدول رقم (10): قيم التعويض والتشبع الضوئي في الأوراق المفردة، وعند تركيز CO_2 في الوسط المحيط، ودرجة الحرارة المثلى للعديد من الأنواع النباتية.

المجموعة النباتية	(Lc) نقطة التعويض الضوئي (μ mol photons m^{-2} s^{-1})	(Ls) نقطة التشبع الضوئي (μ mol m^{-2} s^{-1})
نباتات اليابسة		
الأنواع النباتية العشبية		
1. الأنواع النباتية رباعية الكربون (C_4 Plats)	**50 – 20**	**1500 <**
	50 -20	**1500 <**
2. الأنواع الصحراوية ثلاثية الكربون (C_3 desert plants)		
الأنواع النباتية المزروعة ثلاثية الكربون Agricultural C_3 plants	**40 – 20**	**1500 – 1000**
▪ Helophytes	**40 – 20**	**1500 – 1000**
▪ Sciophytes	**10 – 5**	**200 – 100**
▪ Epiphytes	**15 – 6**	**500 – 200**
الأنواع النباتية الخشبية (woody plants)		
أشجار الغابات المدارية Tropical forest trees		
▪ الأوراق العلوية المعرضة للشمس (Sun leaves)	**25 -15**	**1500 – 600**
▪ الأوراق السفلية المضللة (Shade leaves)	**20 – 5**	**300 – 200**
▪ النباتات الفتية (Young Harts)	**5 -2**	**150 – 50**

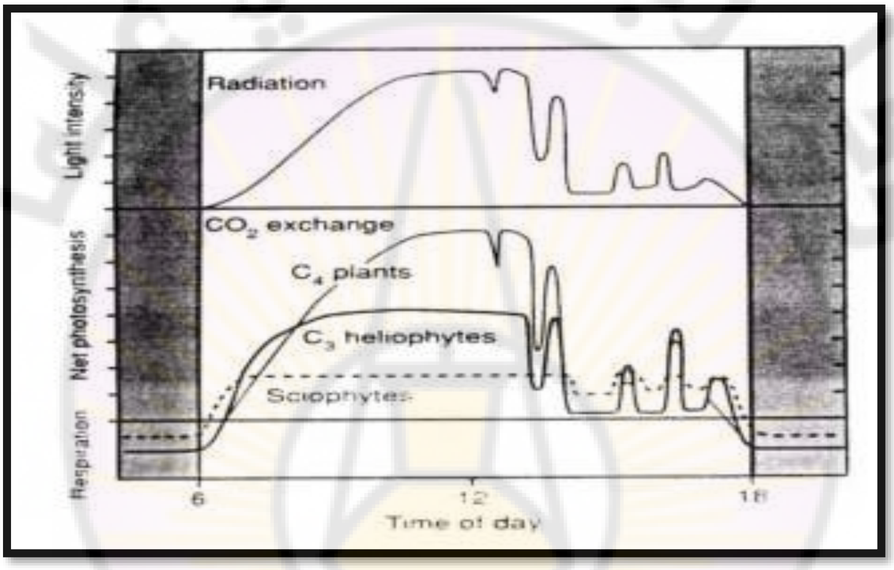
Damascus University

الأشجار ذات الأوراق العريضة المتساقطة		
▪ الأوراق العلوية المعرضة للشمس	**20 – 50 (100)**	**800 < - 600**
▪ الأوراق السفلية المضللة	**15 – 10**	**500 – 200**
الأشجار ذات الأوراق العريضة دائمة الخضرة		
▪ الأوراق العلوية المعّرضة للشمس	**30 – 10**	**800 – 600**
▪ الأوراق السفلية المضللة	**10 – 2**	**150 - 100**
الأنواع النباتية الدنيا Cryptogams		
الأشنيات Ferns		
▪ المواطن البيئية المشمسة	**100- 50**	**600 – 400**
▪ المواطن البيئية المضللة	**50 - 1**	**150 - 50**
الأنواع النباتية المائية Aquatic plants		
▪ الطحالب الطافية Plank tonic algae	**—**	**500 – 200**
▪ أعشاب البحر	**8 – 5**	**500 – 200**
▪ الطحالب في المياه العميقة Deep-water algae	**2**	**400 - 150**
الأنواع النباتية الوعائية المغمورة Submerged vascular plants	**8 – 20 (30) (60) 100**	**200 – 100**

ملاحظة: تمثل هذه القياسات متوسط العديد من القراءات المأخوذة من الكثير من الباحثين (عن Larcher, 2003).

ويبين الشكل (23) مقارنة منحنى الاستجابة للضوء لأنواع نباتية مختلفة، حيث يُظهر أنَّ الأنواع النباتية رباعية الكربون C_4 plants هي حالة استثنائية نوعاً ما: بعض الأنواع

العشبية المدارية لا تصل إلى نقطة التشبع الضوئي حتى عند أعلى المستويات من الشدة الضوئية، حيث يستمر فيها معدل التمثيل الضوئي بشكلٍ أفضل بالمقارنة مع معدل التمثيل الضوئي في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون C_3 plants (الجدول،11).



الشكل رقم (23): مقارنة منحنى الاستجابة للضوء لأنواع نباتية مختلفة.

الجدول رقم (11): قيم معدل صافي التمثيل الضوئي لمجموعات متباينة من الأنواع النباتية.

المجموعة النباتية	القيم العظمى لمعدل صافي التمثيل الضوئي (M mol CO_2 m^{-2} s^{-1})
الأنواع النباتية رباعية الكربون	
▪ *Cenchrus ciliais*	**68**
▪ *Pennisetum typhoides*	**64**
▪ *Sacchanm hybrids*	**64**

▪ *Sorghum Sudanese*	**57**
▪ *Zea mays*	**55**

الأنواع النباتية العشبية ثلاثية الكربون

▪ *Triticun boeoticum*	**45**
▪ *Typha latifolia*	**43**
▪ *Oryza sativa*	**40**
▪ *Helianthus anuus*	**28**
▪ *Glycine max*	**27**

الأنواع النباتية الخشبية ثلاثية الكربون

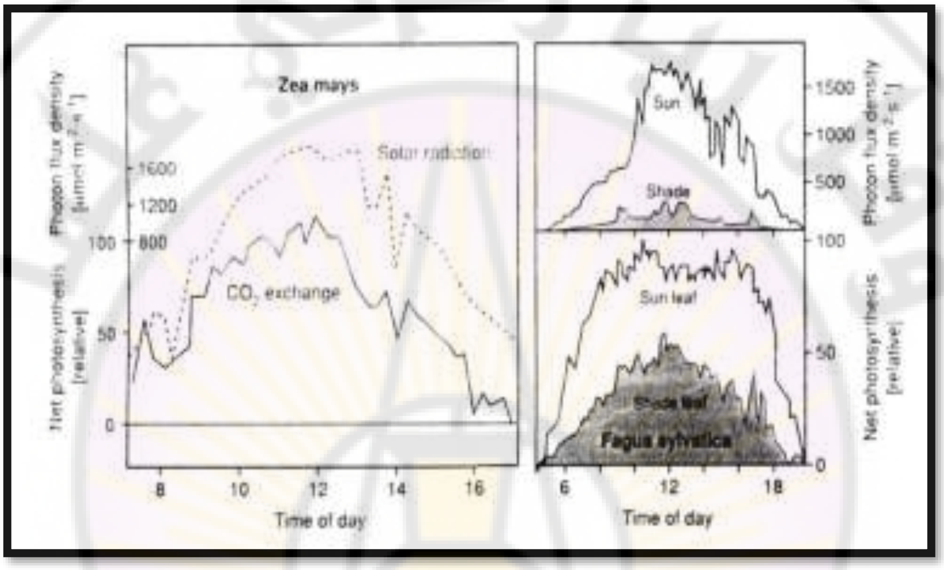
▪ *Salix species*	**35 - 20**
▪ *Populus spaces*	**25 – 20**
▪ *Eucalyptus pauciflora*	**20 – 15**
▪ *Pinvs sylvestris*	**17**

الأنواع النباتية CAM

▪ *Agava inapisaga*	**34**
▪ *Opuntia ficus-indica*	**20**

وتُلاحظ الحالة المعاكسة من الاستجابة للضوء في الأنواع النباتية التي يكون فيها الجهاز التمثيلي حساس بشكلٍ كبير للضوء، التي يُظهر فيها منحنى استجابة الضوء مستوى أمثل لمعدل صافي التمثيل الضوئي عند شدة ضوئية معينة (الشكل، 24). وتنتمي إلى هذه

المجموعة الأنواع النباتية في الطوابق السفلى في النظام الغابوي Forests، والنباتات المائية، وبعض الأنواع النباتية البدائية Cryptogams (الحرازيات، والأشنيات، والطحالب..الخ).



الشكل رقم (24): تتبع التغيرات اليومية في معدل صافي التمثيل الضوئي استجابة للشدة الضوئية.

الأقلمة للمواطن البيئية المشمسة والمظللة Acclimation to Sunny and Shady Habitats

إنَّ الأوراق المتكيفة مع البيئات المظللة (نباتات الظل) يكون فيها معدل التنفس أقل بالمقارنة مع أوراق النباتات المتكيفة مع البيئات ذات السطوع الشمسي العالي، لذلك فهي تصل إلى نقطة التعويض الضوئي بشكلٍ أسرع، أو عند شدّات ضوئية أقل. وبشكلٍ عام، فإنَّ نقطة التعويض الضوئي (Lc) للأنواع النباتية العشبية Herbs المنتشرة في البيئات المظللة، وكذلك الحال بالنسبة إلى بادرات الأشجار الموجودة في الطوابق المنخفضة من الغابة الكثيفة التي تحجب فيها تيجان الأشجار العالية الضوء عن تلك البادرات، تقدَّر بنحو 5 µmol photon $m^{-2}.s^{-1}$. بالإضافة إلى ذلك، فإنَّ الأوراق في البيئات المظللة تستعمل الضوء الضعيف بشكلٍ أفضل من الأوراق المعرَّضة بشكلٍ مباشر للشمس، ومن ثمَّ فإنها تصل إلى نقطة التشبع الضوئي، عند شدّاتٍ ضوئيةٍ أدنى. ويمكن القول: أنَّ

الأنواع النباتية Heliophytea تستعمل الضوء القوي بشكلٍ أفضل، بسبب زيادة معدل نقل الإلكترونات في سلسلة نقل الإلكترونات Electron Transport chain، وارتفاع معدل نشاط الأنزيم الذي يتوسط تفاعل إضافة CO_2 إلى المستقبل الأولي المركب خماسي الكربون Ribulose 1.5 bi-phosphate carboxylase activity (RuBbp)، وتكونْ عادةً الكفاءة التمثيلية (معدل تثبيت الكربون)، ومن ثَمَّ إنتاج المادة الجافة أعلى (الجدولين، 12، 13).

الجدول رقم (12): الفروقات بين الأوراق المتكيفة مع الشدّات الضوئية العالية والضعيفة.

الخصائص	الأوراق المتكيفة مع الشدة الضوئية العالية	الأوراق المتكيفة مع الظل أو الشدة الضوئية المنخفضة
خصائص الأوراق		
▪ المساحة الورقية Leaf area	–	+
▪ مساحة المسطح الداخلي (A mes/A)	+	–
▪ سماكة النسيج المتوسط Mesophyll thickness	+	–
▪ سماكة النسيج المتوسط العادي	+	–
▪ الكثافة المسامية Stomatal density	+	–
▪ الصانعات الخضراء في وحدة المساحة الورقية.	+	–

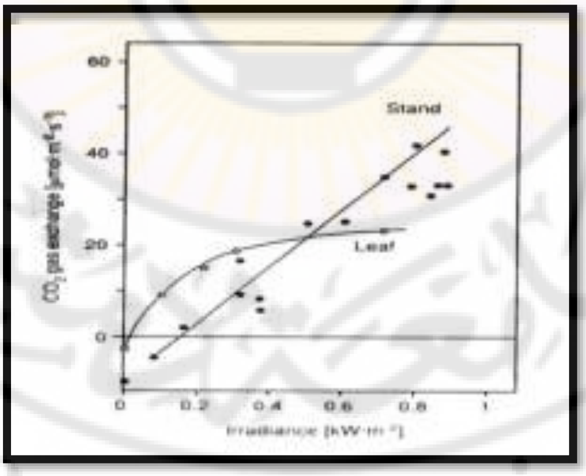
خصائص الصانعات الخضراء		
▪ حجم الصانعات الخضراء	–	+
▪ حجم الستروما إلى غشاء الميتوكوندرية	+	–
▪ محتوى اليخضور في الصانعات	–	+
▪ نسبة اليخضور ط / a	+	–
☒ P700/Chlorophyll	X	X
☒ P700/Chlorophyll	+	–
☒ P700/Chlorophyll	+	–
▪ سلسلة نقل الالكترونات ETC	+	–
الخصائص الوظيفة Functional characterize		
▪ فعَّالية الأنظمة الضوئية	+	–
▪ سرعة نقل الإلكترونات **ATP-synthetase activity**	+	–
▪ فعَّالية الأنزيم روبيسكو	+	–
▪ غلة الضوء Quantum yield	X	X
▪ كفاءة تثبيت الكربون	+	–
▪ الكفاءة التمثيلية	+	–
▪ تنفس الميتوكوندرية	+	–

- (A mes/A): مساحة مسطح النسيج المتوسط داخل الخلية إلى المساحة الورقية.
- (+): تشير إلى أكبر أو أعلى، في حين (–): تشير إلى أقل أو أدنى.
- (X): تشير إلى عدم وجود فروقات.

الجدول رقم (13): الفروقات بين خصائص الأوراق المتكيفة مع الشدّات الضوئية العالية والمنخفضة لدى النوع *Fagus sylvatica*، والنوع *Herdera helix*.

الخصائص	*Fagus sylvatica* Sun leaves	*Fagus sylvatica* Shade leaves	*Herdera helix* Sun leaves	*Herdera helix* Shade leaves
المساحة الورقية (سم^2)	**28.8**	**48.9**	**–**	**–**
سماكة الورقة (µm)	**185**	**93**	**409**	**221**
المساحة الورقية النوعية ($dm^2\ g^{-1}$ DM)	**–**	**–**	**0.97**	**2.6**
الكثافة المسامية ($N\ m\ m^{-2}$)	**214**	**144**	**–**	**–**
الناقلية المسامية ($cm.s^{-1}$)	**–**	**–**	**0.65**	**0.33**
تركيز الكورفيل (b + a) (مغ/ ورقة)	**1.6**	**1.9**		
تركيز الكوروفيل في وحدة المساحة الورقية ($mg\ .dm^{-2}$)	**–**	**–**	**8.7**	**5.5**
تركيز الكوروفيل في واحدة الوزن ($mol\ .\ g^{-1}$)	**6.6**	**16.1**	**–**	**–**
نسبة كلوروفيل a /b	**3.9**	**3.0**	**3.3**	**2.8**
نشاط الأنزيم المثبت للكربون RuBP carloxylase ($mol\ CO_2\ dm^{-2}\ \mu\ ha^{-1}$)	**–**	**–**	**398**	**202**
كفاءة صافي التمثيل الضوئي ($mg\ CO_2\ dm^{-2}\ ha^{-1}$)	**3.5**	**1.3**	**22.3**	**9.4**
نقطة التعويض الضوئي ($W.\ m^{-2}$)	**2.5**	**1.0**	**–**	**–**
نقطة التشبع الضوئي لصافي التمثيل الضوئي ($W.\ m^{-2}$)	**85**	**44**	**–**	**–**
التنفس الظلامي ($mg\ dm^{-2}\ ha^{-1}$)	**0.5**	**0.16**		

استجابة عملية التمثيل للضوء ضمن مجموعة من النباتات: تقود الملاحظات على مستوى الأوراق المفردة Single leaves إلى الافتراض بأنَّه في يوم مشمسٍ، فإنَّ الضوء عادة ما يكون متاحاً بكميةٍ زائدة. ولكن هذا غير صحيح، سواءً بالنسبة إلى النبات الكامل بكلِ طوابقه الورقية، أو بالنسبة إلى مجموعة النباتات الموجودة في وحدة المساحة من الأرض. خلال فترة النهار، فإنَّ الضوء يصل إلى الأوراق المفردة من زوايا مختلفة، ومن ثُمَّ نادراً ما تتعرض جميع الأوراق إلى شدة ضوئية كاملة Full light، ومنْ ثمَّ فإنَّ الشدّات الضوئية العالية جداً يمكن أنْ تُستعمل من قبل طوابق ورقية عديدة مختلفة (الشكل، 25). ففي حال وجود مجموعة من النباتات، فعادةً ما يُلاحظ وجود فروقات كبيرة من اسهام طوابق ورقية مختلفة للغلة التمثيلية الكلية. فعلى سبيل المثال، يُلاحظ في المجتمعات النباتية العشبية الحولية مثل القمح Wheat، التي تكون معظم أوراقها وخاصةً العلوية قائمة Erect، فإنَّ معدل التمثيل الضوئي عادةً ما يكون أعلى ما يمكن في المنطقة الوسطى من الطول الكلي للنباتات. الشكل الذي يبين طبيعة العلاقة بين معدل التمثيل الضوئي في ورقة مفردة يقع عليها الضوء بشكلٍ عامودي في نبات القمح الطري، وكامل الكثافة النباتية للنباتات الموجودة ضمن مساحة 1م^2 من الأرض (دليل المساحة الورقية 3.2) وشدة الإشعاع الضوئي Irradiance. يُلاحظ من الشكل أنَّ الورقة المفردة Leaf Single وصلت إلى نقطة التشبع الضوئي ونقطة التعويض الضوئي عند شدّات ضوئية أقل بالمقارنة مع مجموعة النباتات في وحدة المساحة من الأرض (Evans, 1973).



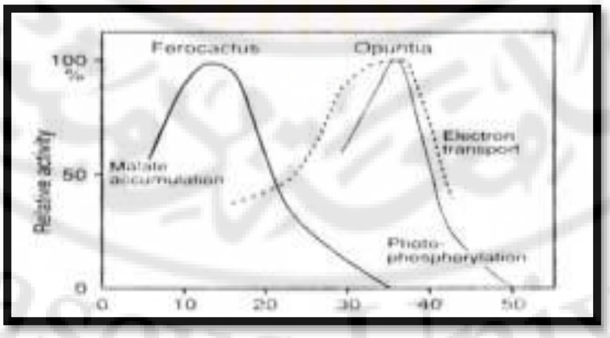
الشكل رقم (25): التمثيل الضوئي في أوراق القمح الطري (*Triticum aestivum* L.) المُضاءة بشكلٍ عمودي والتمثيل الضوئي لكامل النباتات الموجودة في وحدة المساحة من الأرض (دليل المساحة الورقية يعادل 3.2) بالعلاقة مع الشدّة الضوئية.

استجابة كل من عمليتي التنفس والتمثيل الضوئي للحرارة: يتمثل تأثير الحرارة في العمليات الأيضية المختلفة من خلال تأثيرها في سرعة التفاعلات الكيميائية، ونشاط الأنزيمات التي تتوسط تلك التفاعلات. وبناءً على قاعدة تأثير الحرارة في إتمام التفاعلات الكيميائية وسرعة هذه التفاعلات، التي تسمى اصطلاحاً Reaction rate-temperature Rule (RRT rule) المقترح من قبل Vant Hoff's، فإنَّ سرعة إتمام التفاعل تزداد بشكلٍ طردي بازدياد درجة الحرارة. عموماً، يزداد التنفس الظلامي طرداً مع ارتفاع درجة الحرارة، وعند درجات الحرارة المرتفعة جداً فإنَّ التفاعلات البيوكيميائية تحدث بسرعة كبيرة جداً لدرجة أنَّ المواد المستعملة في التنفس ونواتج الاستقلاب (مثل ADP) لا يمكن أنْ تواكب معدل استهلاك المادة الجافة من الطاقة، الأمر الذي يؤدي إلى استنفاد المادة الأولية المستعملة في عملية التنفس، ما يؤدي إلى تراجع معدل التنفس، ويُصاب النبات بما يُسمى اصطلاحاً بالجوع Starvation. ويؤدي ارتفاع درجة الحرارة بين 50-60ْم إلى تخريب الأنزيمات، والأغشية الخلوية لجميع المكتنفات الخلوية، ولاسيما الميتكونورية، ما يؤدي إلى توقف عملية التنفس بشكلٍ كامل.

تستجيب عملية التمثيل الضوئي للتغيرات التي يمكن أنْ تحصل في درجة حرارة الوسط المحيط تبعاً لشكل المنحني الأمثل Optimum Curve. يؤدي تعرّض النباتات إلى درجات حرارة منخفضة غير مناسبة (أقل من درجة الحرارة المثلى) إلى تباطؤ معدل تثبيت الكربون وإرجاعه في حلقة إرجاع الكربون الثلاثية (PCP Cycle)، ويزداد معدل تثبيت الكربون بازدياد درجة الحرارة ليصل إلى أعلى مستوى له عند درجة الحرارة المثلى (تختلف باختلاف النوع النباتي)، ثُمَّ يبدأ معدل التمثيل الضوئي بالتراجع تدريجياً بارتفاع درجة الحرارة عن المعدل الأمثل، بسبب تراجع نسبة غاز ثاني أكسيد الكربون إلى الأوكسجين CO_2/O_2 ratio، الأمر الذي يؤدي بدوره إلى تراجع كفاءة تثبيت/دمج غاز الفحم إلى المستقبل الأولي، المركب خماسي الكربون Carboxylation، نتيجة تراجع نشاط الأنزيم RuBp carboxylase، وازدياد نشاط الأنزيم RuBp Oxygenase، بالإضافة إلى تخريب غشاء الصانعة الخضراء Thylakoid membrane، ما يؤثر سلباً في معدل نقل الإلكترونات في سلسلة نقل الإلكترونات، والتدرج في الجهد الكهروكيماوي على جانبي الغشاء، فيتراجع معدل تصنيع المركبات الغنية بالطاقة خلال تفاعلات الضوء اللازمة لتثبيت غاز الفحم خلال تفاعلات الظلام.

إنَّ درجة الحرارة المثلى لمعدل صافي التمثيل الضوئي (NAR) في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون عادةً ما تكون أدنى من درجة الحرارة المثلى للتمثيل الضوئي الكلي Gross photosynthesis، لأنّه مع ارتفاع درجة الحرارة سوف يزداد كلٌّ من التنفس

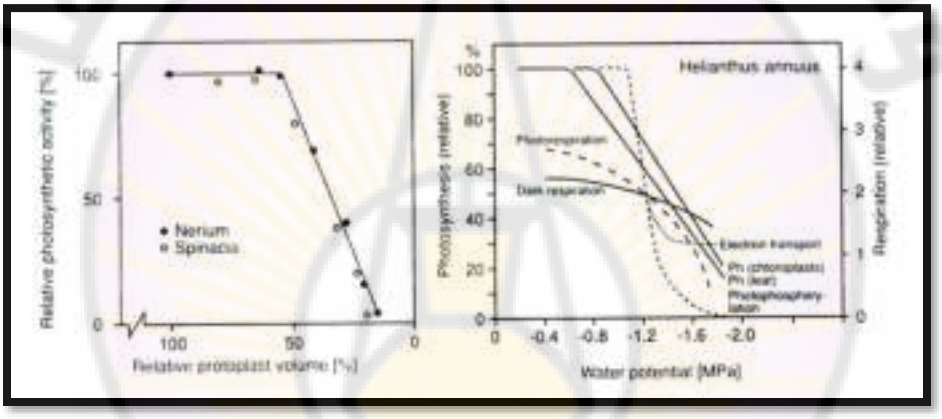
الضوئي Photorespiration وتنفس الميتوكندرية، الأمر الذي يؤثر سلباً في صافي ربح الكربون Net carbon gain. ويختلف معدل الحرارة الأمثل باختلاف النوع النباتي. وتتراوح درجة الحرارة المثلى لمعدل صافي التمثيل الضوئي لمعظم الأنواع النباتية ثلاثية الكربون بين 15-30ْم. وتتراوح درجات الحرارة المثلى للحوليات الربيعية Spring ephemerals التي تنمو خلال الموسم الذي تسوده درجات حرارة منخفضة، بين 10-20ْم، في حين تكون كفاءة النبات التمثيلية بالنسبة إلى الأنواع النباتية الحولية العشبية التي تنمو خلال المواسم الحارة والمواقع البيئية ذات السطوع الشمسي العالي والأشجار التي تنمو في المناخات الدافئة، في حدها الأعلى ضمن المدى الحراري بين 25-35ْم، وحتى 49ْم بالنسبة إلى الشجيرات الصحراوية Desert shrubs، وعادةً ما يكون معدل التمثيل الضوئي في الأنواع النباتية رباعية الكربون عالياً عند درجات الحرارة المرتفعة، لأنَّ معظم هذه الأنواع النباتية متكيفة مع البيئات ذات السطوع الشمسي العالي، ومع هذا فهناك بعض الأنواع النباتية رباعية الكربون التي تكون فيها درجات الحرارة المثلى لمعدل صافي التمثيل الضوئي منخفضة نوعاً ما، مثل أنواع الرغل (القطف) Atriplex species، التي تنمو خلال الفترات الباردة من السنة. وبالنسبة إلى الأنواع النباتية CAM، فإنَّ درجات الحرارة المثلى تكون عالية خلال المرحلة الضوئية Light phase، في حين أنَّ درجة الحرارة المثلى لتثبيت الكربون التي تحدث عادةً خلال الليل Dark-CO_2-fixation، فعادةً ما تكون منخفضة (الشكل، 26). يُلاحظ من الشكل أنَّ درجة الحرارة المثلى لعملية التثبيت الليلي لغاز الفحم في نبات التين الشوكي (الصَّبار) وتراكم المالات Malate accumulation، لا تتجاوز 20ْم، وهي أقل بكثير من درجة الحرارة اللازمة لإرجاع الكربون وتثبيته خلال فترة النهار، ولاسيما في البيئات التي تنتشر فيها مثل هذه الأنواع النباتية (الصحاري) (Gerwick et al, 1977).



الشكل رقم (26): تأثير درجة الحرارة في التراكم الليلي للمالات، وبعض عمليات التمثيل الضوئي الرئيسة.

المصـادر المائيـة وعمليـة التبـادل الغـازي CO$_2$ Gas Exchange and Water Supplies

يُعد الماء (H_2O) أيضـاً بالإضـافة إلـى غـاز الفحـم (CO_2) مـن المـواد الأوليـة الضـرورية لإتمام عملية التمثيل الضوئي، لذلك يُعد الماء من العوامل المحددة لمعدل التمثيل الضـوئي، ويُعد بالمقابل تـوافر كميـات كبيـرة وكافيـة مـن الميـاه مهمـاً جداً للمحافظـة علـى الترطيب العـالي High hydration لبروتوبلاسم الخليـة النباتيـة، ويـؤدي تراجـع حجـم الخليـة، أو جهد الامتلاء Turgor potential (Ψ_p) داخل الخلية النباتية، نتيجة نقص المياه Water deficiency، إلى تراجع النشاط التمثيلي Photosynthetic activity (الشكل، 27).



الشكل رقم (27): أهمية المحافظة على محتوى الخلية النباتية المائي وترطيب البروتوبلاسم للمحافظة على معدلات مثلى من التمثيل الضوئي.

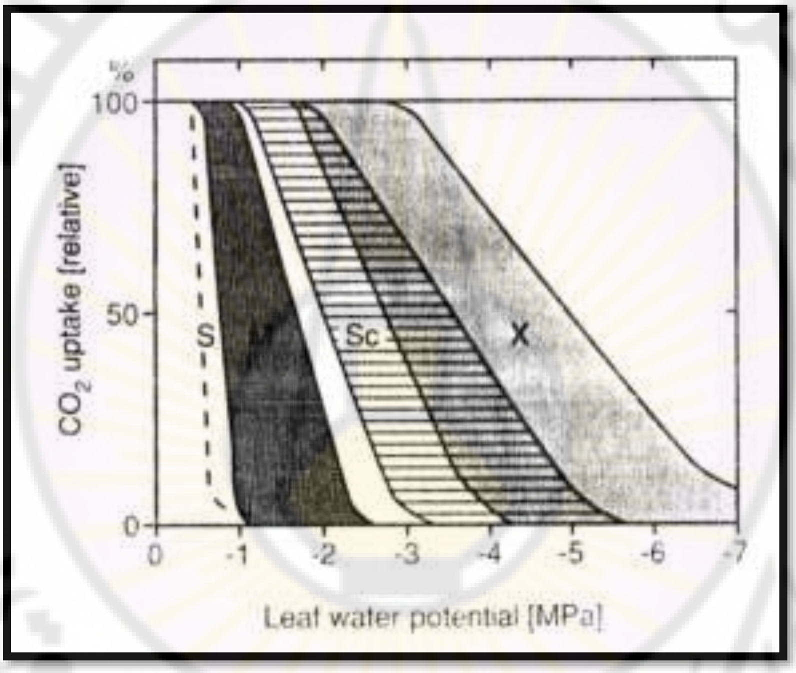
يُلاحظ من الشكل أنَّ تراجع الجهد المائي Water potential (يصبح أكثر سلباً) داخل خلايـا أوراق نباتـات محصـول زهرة الشمس Sunflower (*Helianthus anuus* L.) أكثـر مـن 0.5- ميغـا باسـكال، قـد أدى إلـى تراجـع الكفـاءة التمثيليـة لكـل مـن الصـانعات الخضراء والأوراق بشكلٍ جاد، وأدى استمرار تراجع الجهد المـائي إلـى أكثـر مـن 1.0- ميغا باسكال إلى انخفاض معدل إنتاج المركب الغني بالطاقة (ATP)، بسبب تراجع معدل فسفرة المركب ADP، ويعزى ذلك بشكلٍ رئيس إلـى تراجـع معدل نقل الإلكترونـات فـي سلسلة نقل الإلكترونات، وسبب بالمقابل تراجع جهد الأوراق المـائي تراجعـاً فـي كـل مـن التنفس الضوئي والتنفس الظلامي، ولكن بوتيرةٍ أقل بالمقارنـة مـع التراجـع الحاصـل فـي معدل التمثيل الضـوئي (Ortis-lopez et al., 1991)، حيث إنّ العمليـات التأكسـدية Oxidative processes أقل حساسية لظروف العجز المائي بالمقارنة مع عملية التمثيل

الضوئي، حيث لا تبدأ عمليتا التنفس الضوئي، وتنفس الميتوكوندريا بالتراجع إلاَّ عند المستويات الشديدة من الجفاف، أو تراجع الجهد المائي داخل الخلايا النباتية. وتبعاً لذلك، تصبح نسبة تثبيت الكربون إلى التنفس الضوئي تدريجياً أقل، نتيجة التراجع الحاد في معدل التمثيل الضوئي بالمقارنة مع معدل التراجع الحاصل في التنفس، الأمر الذي سيؤثر سلباً في معدل صافي التمثيل الضوئي (كمية المادة الجافة الكلية المصنَّعة بعملية التمثيل الضوئي مطروحاً منها ما يفقد بالتنفس).

يؤدي تعَّرض نباتات الأنواع المحصولية إلى ظروف العجز المائي Water deficit إلى تراجع الناقلية المسامية (g_s)، التي تُعد بمنزلة خط الدفاع الفسيولوجي الأول في النباتات للحد من معدل فقد المياه بالنتح Transpiration، بهدف المحافظة على ترطيب البروتوبلاسم. ويؤدي الانغلاق التدريجي للمسامات إلى تراجع موازٍ في معدل انتشار غاز الفحم، ما يؤثر سلباً في كمية غاز الفحم المتاح في مراكز التثبيت ضمن الصانعات الخضراء (Stroma)، الأمر الذي يؤدي إلى تراجع معدل التمثيل الضوئي. ويمكن أيضاً أنْ يؤثر شح المياه بشكلٍ مباشر في كفاءة النبات التمثيلية، نتيجة تراجع معدل نقل الإلكترونات في سلسلة نقل الإلكترونات، لأنَّ الماء هو المعطي الأولي للالكترونات بعد أكسدته ضوئياً، الأمر الذي يؤثر سلباً في معدل تصنيع المركبات الغنية بالطاقة (NADPH, ATP)، فيتراجع معدل تثبيت الكربون في حلقة كالفن، ما يؤثر سلباً في معدل تصنيع المركبات العضوية وتراكمها.

نقطتين حرجتين Critical points: تمثل النقطة الأولى العتبة الحرجة بين الكفاءة التمثيلية الكلية الكامنة Full photosynthetic capacity، (وذلك عندما يكون الجهد المائي عالٍ، والناقلية المسامية مرتفعة)، وبين التراجع الحاصل في كفاءة النباتية التمثيلية وصولاً إلى انعدام انتشار غاز الفحم عبر المسامات نتيجة الانغلاق التام للمسامات Stomatal closure. ويصل النبات إلى العتبة الحرجة لمعدل التمثيل الضوئي عندما يتراجع جهد الأوراق المائي إلى مستوى تبدأ معه المسامات بالانغلاق. وتتوقف سرعة انغلاق المسامات على العوامل الجوية الخارجية، حيث يؤدي تراجع الرطوبة النسبية الجوية، وارتفاع شدة الإشعاع الشمسي، وارتفاع درجة الحرارة، وزيادة سرعة الرياح إلى زيادة فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط (VPD)Leaf to air vapor pressure deficit، فيزداد معدل فقد المياه بالنتح، الأمر الذي يدفع النباتات إلى تقليل درجة انفتاح المسامات للحد من فقد المياه والمحافظة على جهد الامتلاء داخل الخلايا النباتية، ولكن يؤدي ري النباتات بكمياتٍ كافية من المياه بعد النقطة الحرجة

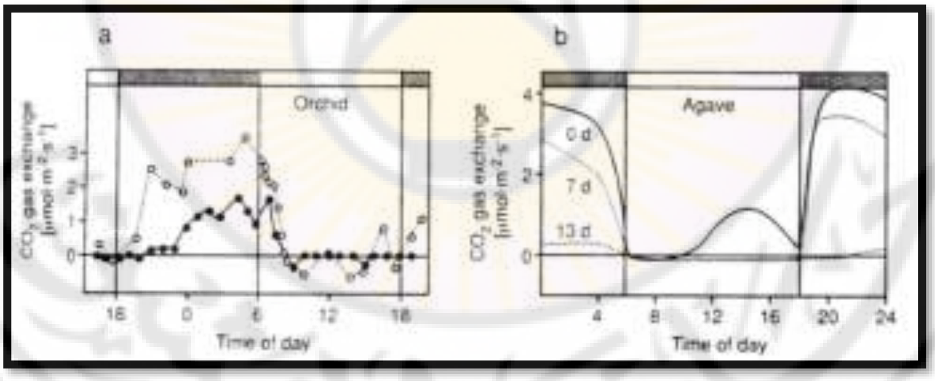
الأولى إلى إمكانية استعادة عملية التبادل الغازي بشكلٍ سريع. وينعدم التبادل الغازي بشكلٍ كامل Zero point for gas exchange عندما تنغلق المسامات بشكلٍ كامل، وهنا يتراجع الجهد المائي بشكلٍ شديد، ولا يقتصر التأثير السلبي للجفاف في عملية التمثيل الضوئي على العوامل المسامية Stomatal factors فقط، وإنّما يتعداه إلى التأثير المباشر للجفاف في عملية التمثيل الضوئي Non-Stomatal inhibition، وذلك إما نتيجة تخريب البروتينات المهمة في تثبيت الكربون (الشكل، 28).



الشكل رقم (28): تراجع امتصاص غاز الفحم نتيجة انخفاض جهد الأوراق المائي.

يُلاحظ من الشكل أنَّ النباتات العصارية Succulents (S)، تليها الأنواع النباتية المتكيفة مع البيئات الرطبة Mesophytes (M) (وتتضمن الأنواع النباتية العشبية ثنائية الفلقة، والأعشاب Grasses، والأنواع الخشبية المتكيفة مع البيئات الرطبة)، ثُمَّ الشجيرات والأشجار المتكيفة مع البيات شبه الرطبة وشبه الجافة، وأخيراً الأنواع النباتية الجفافية Xerophytes(X) مثل الحوليات العشبية، والشجيرات المنتشرة في البيئات الجافة. عموماً، عادةً ما تكون الفروقات طفيفة جداً بين الأنواع النباتية ثلاثية الكربون والأنواع النباتية رباعية الكربون. أما بالنسبة إلى الأنواع النباتية المتكيفة مع المناطق الجافة،

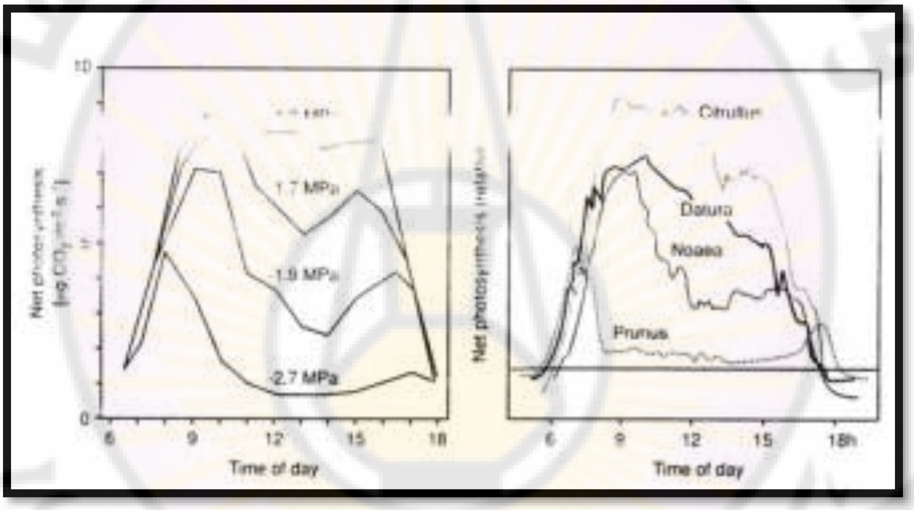
والنباتات الصحراوية بشكلٍ خاص، فهذه النباتات عادةً ما تغلق مساماتها بشكلٍ كامل عند أقل انخفاض في كمية المياه المتاحة، وتبقى عادةً النباتات التي يكون فيها المسار الكربوني من النوع CAM مساماتها مغلقة طول النهار، ويمكن أنْ تُبقي المسامات مغلقة خلال الليل في حال استمر تعرض النباتات لظروف العجز المائي (الشكل، 29). وفي هذه الحالة فإنَّ غاز الفحم الناتج عن التنفس لا يمكن أن يهرب Escape، ولكن عادةً ما يُستعمل ليثبت بعملية التمثيل الضوئي، وبذلك تعمل عملية التمثيل الضوئي على إعادة استعمال غاز CO_2 الداخلي الناتج عن هدم المالات المتراكمة (إعادة تدوير المالات) Malate recycling. يُلاحظ من الشكل (29) أنَّ معدل تبادل غاز الفحم عبر المسامات في النبات الصحراوي الآجافا *Agave lechuguilla*، يتراجع طرداً مع ازدياد شدة الإجهاد المائي (7 أيام، و13 يوماً بدون ري) بالمقارنة مع الشاهد المروي. وتبقى المسامات خلال فترة الإجهاد المائي مغلقة خلال النهار، وتمتص النباتات CO_2 فقط خلال الليل Nocturnal uptake، وأيضاً غاز الفحم الناتج من عملية التنفس Respiration. وإذا ما استمر الجفاف لفترات زمنية أطول، فإنَّ القليل جداً من CO_2 يمكن أنْ ينتشر عبر المسامات خلال الليل، وبالتالي سيكون المصدر الوحيد لغاز الفحم الناتج من عملية التنفس (Nobel. 1988).



الشكل رقم (29): تبادل غاز الفحم عبر المسامات تحت ظروف الجفاف بالمقارنة مع الظروف الرطبة.

ويمكن أنْ نعبِّر عن استجابة معدل صافي التمثيل الضوئي للجفاف، باعتماد مفهوم ميزان العلاقات المائية Water balance. فعندما يتراجع محتوى التربة المائي، وتقل كمية المياه المتاحة للنباتات في منطقة انتشار الجذور، تستمر عملية فقد المياه بالنتح نتيجة استمرار انفتاح المسامات خلال المستويات الخفيفة من الإجهاد المائي، وتصبح تبعاً لذلك كمية المياه المفقودة بالنتح أكبر من كمية المياه الممتصة عن طريق المجموعة الجذرية،

ما يؤدي إلى اختلال ميزان العلاقات المائية داخل الخلايا النباتية، فتتعرض النباتات إلى العجز المائي، المتمثل بتراجع الجهد المائي (يصبح أكثر سلباً)، وتراجع جهد الامتلاء، عندئذٍ تبدأ المسامات بالانغلاق تدريجياً بازدياد شدة العجز المائي، ولاسيما خلال النصف الثاني من النهار، وتبقى منغلقة لفترة زمنية أطول، الأمر الذي يؤثر سلباً في معدل انتشار غاز الفحم عبر المسامات، ومن ثُمَّ معدل التمثيل الضوئي (الشكل، 30، اليسار). حيث يُلاحظ من الشكل التراجع التدريجي في معدل صافي التمثيل الضوئي في أوراق محصول فول الصويا (*Glycine max* L.)بازدياد مستوى العجز المائي، ولاسيما خلال فترة منتصف النهار (Rawson et al., 1978).



الشكل رقم (30): الانخفاض التدريجي في صافي التمثيل الضوئي استجابةً لظروف العجز المائي خلال فترات مختلفة من النهار في نباتات محصول فول الصويا (اليسار)، والتباين اليومي في معدل صافي التمثيل الضوئي لدى بعض الأنواع النباتية المتباينة في حساسيتها للإجهاد المائي (اليمين).

عموماً، كلما كان النوع النباتي أكثر حساسية لظروف نقص المياه، وكانت الظروف المناخية أكثر جفافاً خلال الساعات الأولى من النهار، تراجع معدل التمثيل الضوئي بشكلٍ أسرع وأبكر (الشكل، 30، اليمين). يُلاحظ من الشكل التذبذبات اليومية Daily fluctuations في معدل التمثيل الضوئي لدى بعض الأنواع النباتية التي تختلف في حساسيتها للجفاف، وفي درجة تحمل الجفاف، ويلاحظ أنَّ النوعين النباتيين *Citrullus colocynthesis*، و *Datura metel*، هي الأكثر تحملاً للجفاف، حيث أبدتْ أدنى نسبة انخفاض في معدل صافي التمثيل الضوئي، الذي تراجع فقط خلال فترة الظهيرة، وبدأ

بالتراجع بشكلٍ ملحوظ خلال فترة ما بعد الظهيرة نتيجة تراجع الناقلية المسامية. ويُلاحظ بالنسبة إلى النوع *Noaea mucranata*، الذي ابدت نباتاته معدلات عالية من امتصاص الكربون خلال فترة الصباح (6-9 صباحاً)، ولكن تراجع فيه معدل التمثيل الضوئي، ومن ثُمَّ صافي التمثيل الضوئي بشكلٍ حاد خلال فترة الظهيرة Noon time. أما النوع *Prnnus arneniaca*، فقد تمكنت نباتاته من المحافظة على انتشار الكربون فقط خلال الساعات المبكرة من الصباح، وخلال فترة ما بعد الظهيرة (5-6 بعد الظهر) (Schulze et al., 1972).

كسب الكربون وفقد المياه Carbon Gain and Water Loss:

تسمح المسامات بالإضافة إلى انتشار CO_2 من الوسط الخارجي المحيط إلى داخل الأوراق، أيضاً بمرور بخار الماء Water vapor من داخل الأوراق إلى الوسط المحيط، وتُسمى هذه العملية بالتبادل الغازي Gas exchange. وبالتالي فإنَّ النباتات تفقد الماء كضريبة للحصول على غاز الفحم اللازم لعملية التمثيل الضوئي، لذلك يتناسب معدل انتشار CO_2 طرداً مع معدل فقد المياه بالنتح Transpiration. ويطلق على كمية المادة الجافة المُصنّعة بعملية التمثيل الضوئي (امتصاص CO_2 وتثبيته) إلى كمية المياه المفقودة بالنتح اصطلاحاً بكفاءة استعمال الماء Water Use Efficiency (WUE)، ويعطى وفق العلاقة الرياضية الآتية:

$$WUE_{ph} = \frac{\text{معدل التمثيل الضوئي } (A')}{\text{معدل فقد الماء بالنتح } (T)}$$

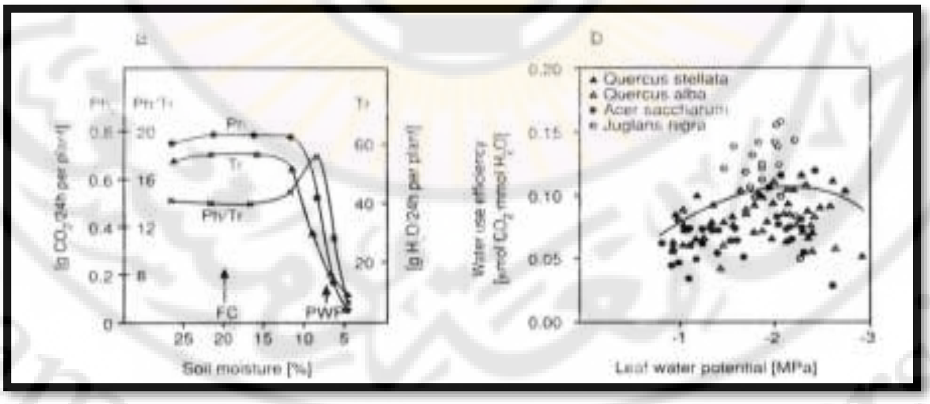
وتُعبِّر قيمة كفاءة استعمال الماء بشكلٍ آني عن عملية التبادل الغازي عبر المسامات. ويُلاحظ من المعادلة أنَّ قيمة كفاءة استعمال المياه تتناسب طرداً مع معدل التمثيل الضوئي (كمية المادة الجافة المُصنّعة)، وعكساً مع كمية المياه المنتوحة، ومن ثُمَّ يمكن أنْ تزداد قيمة كفاءة استعمال المياه إمّا بزيادة معدل التمثيل الضوئي، أو بتراجع معدل فقد المياه بالنتح. وحتى تكون صفة كفاءة استعمال المياه من الصفات المهمة المرتبطة بتحسين غلة المحاصيل الحقلية، ولاسيما تحت ظروف الزراعة المطرية، فيجب أنْ تكون الزيادة في قيمة WUE ناجمة عن زيادة كفاءة النبات التمثيلية عند أي مستوى من الناقلية المسامية، ومن ثُمَّ معدل النتح، لأنَّ أي تراجع في معدل فقد المياه بالنتح سيرافقه تراجعاً في معدل انتشار غاز الكربون، الأمر الذي يمكن أنْ يؤثر سلباً في كمية المادة الجافة المُصنَّعة والمتاحة لنمو النباتات وتطورها وإنتاجيتها، وتُسمى مثل هذه الأنواع النباتية بالأنواع

الكفوءة Capacity types، في حين تُسمى الأنواع أو الطرز الوراثية التي تزداد فيها قيمة كفاءة استعمال المياه بتقليل معدل فقد المياه بالنتح بالطرز غير الكفوءة Conductance types. عموماً، تتراوح قيمة كفاءة استعمال المياه تحت الظروف الحقلية الملائمة لعملية التبادل الغازي (عندما تكون قيمة الناقلية المسامية في حدها الأعظمي)، بين 3-5 $\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}/mmol\ H_2O$ في الأنواع الحولية العشبية المتكيفة مع البيئات الرطبة Mesophytic herbs، وفي الأشجار متساقطة الأوراق Deciduous trees، في حين تتراوح بين 4-8 في الأنواع النباتية الخشبة المتكيفة مع البيئات شبه الرطبة Sclerophyllous woody، وتتراوح بين 5-10 في الأنواع النباتية العصارية Succulents. ولكي نستبعد تأثير العوامل المناخية المحيطة في قيمة كفاءة استعمال المياه، من خلال تأثيرها في عملية التبادل الغازي، لا بدّ من معرفة نسبة مجموع المقاومات لكلٍ من انتشار CO_2 إلى عبور بخار الماء ($\Sigma r\ H_2O/\ \Sigma r\ CO_2$). فعندما تكون المسامات مفتوحة بشكلٍ كامل Fully open، فإنَّ قيمة نسبة مجموع المقامات تتراوح بين 0.1-0.4 لمعظم الأنواع النباتية ثلاثية الكربون C_3 plants، في حين تقدر بنحو 0.5 بالنسبة إلى العديد من الأشجار، وتصل إلى 0.8 بالنسبة إلى الأنواع النباتية رباعية الكربون C_4 plants. عموماً، عند ظروف بيئية محددة، فإنَّ معدل فقد بخار الماء أثناء عملية التبادل الغازي هي أكثر بكثير من معدل انتشار غاز الفحم، ويعزى ذلك إلى الأسباب الآتية:

1. إنَّ فرق التدرج في تراكيز غاز الفحم (CO_2) بين الهواء الخارجي المحيط بالأوراق، والوسط الداخلي للأوراق، هو أقل حدّة Less steep بالمقارنة مع فرق التدرج في الجهد المائي بين أنسجة الأوراق الداخلية والوسط المحيط، لأنَّ الهواء الخارجي غير مشبع ببخار الماء. وعلى سبيل المثال، فإنَّ فرق التدرج في الجهد المائي بين الأوراق والوسط الخارجي المحيط عند درجة حرارة 20ْم، ورطوبة نسبية جوية تعادل 50%، هو أكثر بعشرين ضعفاً بالمقارنة مع فرق التدرج بتركيز CO_2.
2. إنَّ حركة جزيئات الماء من داخل الأوراق إلى الوسط المحيط أسرع من حركة جزيئات غاز الفحم (CO_2)، لأنَّ الوزن الجزيئي للماء (18) أقل من الوزن الجزيئي لغاز الفحم (44).
3. إنَّ المسافة التي يقطعها غاز الفحم خلال مسيرة انتشاره من الوسط المحيط إلى مراكز التثبيت ضمن الصانعات الخضراء كبيرة جداً بالمقارنة مع المسافة التي يقطعها بخار الماء من داخل الأوراق إلى الوسط المحيط، أي أنَّ عدد

المقاومات التي تعيق انتشار غاز الفحم وصولاً إلى الصانعات الخضراء (عبور المرحلتين الغازية والسائلة) أكثر بالمقارنة مع عبور بخار الماء من النسيج المتوسط إلى الوسط المحيط، لذلك، فعند أي قيمة للناقلية المسامية، فإنَّ معدل فقد بخار الماء Water vapor loss أكبر بكثير من معدل كسب الكربون Carbon gain، لذلك يُقال مجازاً إنّ النبات يدفع الماء كضريبة باهظة جداً للحصول على المادة الأولية (CO_2) اللازمة لعملية التمثيل الضوئي.

انطلاقاً مما تقدم، فعادةً ما تكون قيمة كفاءة استعمال الماء عند الأنواع النباتية ثلاثية الكربون أقل بالمقارنة مع الأنواع النباتية رباعية الكربون، لأنَّ كفاءة تثبيت الكربون فيها أقل، بسبب إمكانية حدوث التنفس الضوئي، في حين أنَّ التنفس الضوئي لا يحدث في الأنواع رباعية الكربون، لأنّها تمتلك آليات تركيز غاز الفحم CO_2-Concentrating mechanisms في خلايا الحزم الوعائية Bundle sheath. فعادةً ما يكون ميزان الماء خاسراً في جميع الأنواع النباتية عندما تكون المسامات مفتوحة بشكلٍ كامل، في حين يؤدي الانغلاق الجزئي للمسامات Partial Stomatal closure إلى زيادة قيمة كفاءة استعمال الماء، لأنَّ ذلك يزيد من المقاومة المسامية (rs) Stomatal resistance لخروج الماء، فيقل معدل فقد الماء بالنتح، دون أنْ يؤثر ذلك سلباً في معدل التمثيل الضوئي وتصنيع المادة الجافة، ولاسيما خلال المراحل الأولى من ظروف الإجهاد المائي (الشكل، 31).



الشكل رقم (31): كفاءة استعمال المياه لعملية التمثيل الضوئي تحت الظروف الجافة، وتأثير تراجع محتوى التربة المائي في نسبة معدل التمثيل الضوئي إلى معدل الفقد الماء بالنتح، لدى نباتات القمح بعمر ستة أسابيع.

يُلاحظ من الشكل أنّه في نباتات القمح بعمر ستة أسابيع المعَّرضة لظروف الجفاف، فعند أي مستوىً من محتوى التربة المائي وصولاً إلى السعة الحقلية Field capacity (Fc) فإنَّ معدل التمثيل الضوئي الصافي دائماً أعلى من معدل النتح، وبالتالي تكون قيمة كفاءة استعمال المياه نسبياً عالية، ومع تراجع محتوى التربة المائي بشكلٍ أكبر سيكون مقدار الانخفاض في معدل فقد الماء بالنتح أكبر بكثير من مقدار التراجع بمعدل التمثيل الضوئي، ما يؤدي إلى ارتفاع ملحوظ في قيمة كفاءة استعمال المياه، ولكن يؤدي التراجع الكبير في محتوى التربة المائي وصولاً إلى نقطة الذبول الدائم Permanent (PWP) milting Point إلى انخفاض قيمة كفاءة استعمال المياه، نتيجة حدوث الانغلاق التام للمسامات، الأمر الذي يوقف تماماً انتشار CO_2 عبر المسامات، وفقد بخار الماء، ولكن يستمر فقد المياه من خلال العديسات الموجودة في الساق ومن الأدمة الخارجية Cuticle، وتصبح كمية الماء المفقودة أكبر بكثير من كمية المادة الجافة المصنّعة بالتمثيل الضوئي (Aho et al., 1979).

وتحت ظروف الزراعة الحقلية، فإنَّ قيمة كفاءة استعمال المياه تتأثر بالظروف المناخية Climaticconditions. وعادةً ما تصل قيمة كفاءة استعمال المياه إلى ذروتها Maximum value خلال ساعات الصباح الأولى، لأنَّ الهواء المحيط لا يزال رطباً، وشدة السطوع الشمسي مثالية لعملية التمثيل الضوئي، ولكن مع اقتراب فترة الظهيرة Noon time سوف تزداد درجة حرارة الوسط المحيط، وتزداد شدة الإشعاع الشمسي ويصبح الهواء أكثر جفافاً، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة فرق التدرج في ضغط بخار الماء (VPD) بين الأوراق والوسط المحيط، ما يؤدي إلى زيادة معدل فقد المياه بالنتح، الأمر الذي يؤدي إلى تراجع قيمة كفاءة استعمال المياه. وتختلف أيضاً قيمة كفاءة استعمال المياه باختلاف مرحلة النمو/ تقدم موسم النمو، فعلى سبيل المثال، فإنَّ معدل التمثيل الضوئي في محصولي القمح، والشعير Barley يكون في حده الأعظمي قبل الإزهار بنحو 20-30 يوماً، بسبب اكتمال النمو الخضري، وتكون جميع الأوراق خضراء وفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي، وخاصةً في حال وجود هندسة ورقية مناسبة Canopy architecture، ولكن مع تقدم النباتات بالعمر (المراحل المتقدمة من حياة النبات)، فعادةً ما يتراجع معدل التمثيل الضوئي الكلي، بسبب شيخوخة نسبة كبيرة من الأوراق ويباسها، التي يقتصر دورها فقط على فقد المياه دون تصنيع المادة الجافة، الأمر الذي يؤدي إلى تراجع كفاءة استعمال المياه.

وحتى تعطي صفة كفاءة استعمال المياه فكرة دقيقة عن أداء الأنواع النباتية/ الطرز الوراثية، فيجب أن تُعبر عن نسبة تصنيع المادة الجافة وتراكمها Dry matter

production إلى كمية المياه المستهلكة من قبل النباتات خلال كامل موسم النمو، عندئذٍ ستكون هذه الصفة ذات طبيعة تكاملية Integrated in nature، ولا يمكن أنْ تعبر القياسات الآنية Instantaneous measurements (على مستوى الورقة المفردة، لأنّها تتغير على مدار اليوم الواحد، وباختلاف مرحلة النمو.

كان الباحثان Hellriegel (1883)، و Moximov (1923) أول من درس العلاقة بين زيادة المادة الجافة والاحتياج المائي، وأطلقوا عليها كفاءة استعمال المياه للإنتاجية Water use efficiency of productivity، التي تعطي وفق العلاقة الآتية:

$$\text{كفاءة استعمال المياه للإنتاجية} = \frac{\text{إنتاج المادة الجافة العضوية (غ)}}{\text{استهلاك المياه (كغ)}}$$

إذاً، يمكن أنْ تُعرَّف صفة كفاءة استعمال المياه بأنها كمية المادة الجافة المُصنَّعة بفضل عملية التمثيل الضوئي بالغرام، إلى كمية المياه الكلية المستهلكة (التبخر + النتح) Evapo-tronspiration مقدرة بالكغ، خلال فترة زمنية تمتد من عدة أسابيع إلى كامل موسم النمو. وحقيقةً، فإنَّ كمية المياه المستهلكة لإنتاج المادة الجافة تختلف باختلاف النوع النباتي، وباختلاف الأصناف ضمن النوع نفسه، وباختلاف المرحلة التطورية من دورة حياة النبات Developmental stage، والكثافة النباتية Plant density، والظروف البيئية السائدة، والأهم من هذا وذاك كمية المياه المتاحة للنبات Water supply، ومعدل فقد الماء بالتبخر Evaporation rate. ويُساعد فهم كفاءة استعمال الماء كصفة فسيولوجية مرتبطة بتحسين الإنتاجية Productivity، في انتخاب الطرز الوراثية ذات المقدرة التكيفية الأعلى مع المحافظة على الكفاءة الإنتاجية، وزراعتها ضمن المناطق البيئية المناسبة لتأمين الحد الأدنى اللازم من الاحتياجات المائية. ويبين الجدول الآتي قيم كفاءة استعمال الماء الإنتاجية (WUEp) (غ مادة جافة. $كغ^{-1}$ ماء) لبعض المجموعات النباتية، (الجدول، 14).

الجدول رقم (14): قيم كفاءة استعمال المياه لدى بعض المجموعات النباتية.

المجموعة النباتية	WUEp
الأنواع النباتية ذات المسار الكربوني CAM	**6- 15 (30)**
الأنواع النباتية رباعية الكربون C_4 plats	**3- 5**
الأنواع النباتية الحولية ثلاثية الكربون	
▪ النجيليات Cereals	**1.5- 2**
▪ البقوليات Legumes	**1.3 -1.4**
▪ البطاطا والمحاصيل الجذرية.	**1.5- 2.5**
▪ بادرات محصول زهرة الشمس.	**3.6**
▪ نباتات زهرة الشمس بمرحلة الإزهار.	**1.5**
الأنواع النباتية الخشبية Woody plants	
▪ الأشجار عريضة الأوراق المزروعة في المناطق المدارية.	**1- 2**
▪ الأشجار عريضة الأوراق المزروعة في المناطق المعتدلة.	**3- 5**
▪ الشجيرات في البيئات شبه الرطبة.	**3- 6**
▪ الأشجار المخروطية Coniferous trees.	**3- 5**

تأثير التغذية المعدنية في انتشار CO_2 وإنتاج المادة الجافة:

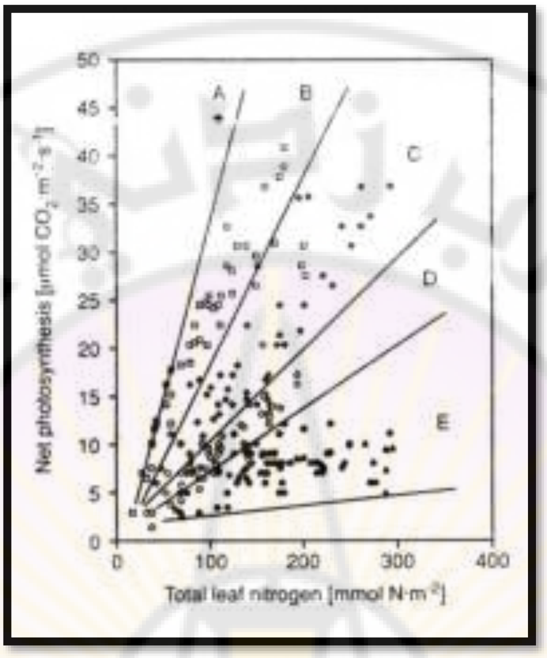
تتأثر عمليتي التمثيل الضوئي والتنفس بطرائق شتى، من خلال تأثير العناصر المعدنية المغذية. وفي الترب الزراعية التي لا تعاني نقصاً حاداً في بعض العناصر المعدنية المغذية المهمة للنبات، فإنَّ تأثير العوامل البيئية (الحرارة، والرطوبة، والضوء...الخ) يكون أشدُّ وطأةً في عملية التمثيل الضوئي بالمقارنة مع تأثير التغذية المعدنية، ومع ذلك

فإنَّ غلة الأنواع المحصولية عادةً ما تزداد عند إضافة كميات كافية من العناصر المعدنية المغذية. وتتمثل التأثيرات البيوكيميائية في عمليتي التمثيل الضوئي والتنفس الناجمة عن اختلال التوازن المعدني في التربة، كون العناصر المعدنية تدخل في تركيب الأنزيمات Enzymes التي تتوسط تفاعلات تلك العمليات، أو في الأصبغة اليخضورية، أو يمكن أنْ تؤدي دور العوامل المساعدة مشجعة لعمل الأنزيمات Activators، أو تؤثر بشكلٍ مباشر في عملية التمثيل الضوئي (الجدول، 15)

الجدول رقم (15): دور العناصر المعدنية المغذية في عملية التمثيل الضوئي.

الوظيفة	المكونات التركيبية وعناصر الاستقرار	العناصر الداخلة في تركيب الأنزيمات والعوامل المساعدة	عوامل النقل والتوازن الشاردي
تمايز واستقرار تركيب الصانعة الخضراء	**Ca, Fe, Mg, S, N**	**(Mn), Mg, Zn, Fe, K**	**–**
العملية الكيموضوئية	**Mn**	**(Mo), Cl, Mg**	**Cl**
نقل الإلكترونات وعملية	**Cu, Fe, S, 8, Mg, (Ca)**	**(Mo), Cl, Mg, K**	**Mg, K**
تثبيت الكربون وحلقة كالفن	**P**	**Zn, K, Mn, Mg**	**–**
نقل نواتج التمثيل الضوئي وتصنيع الغشاء حركة المسامات	**–**	**–**	**Cl, Ca, K**

وإنَّ عنصر الآزوت (N) المكون الضروري للبروتينات وجزيئات اليخضور، هو أيضاً ضروري لتشكل غشاء الصانعة الخضراء الداخلي Thyakoid membrane، والأنزيمات. وحقيقةً، توجد علاقة ارتباط وطيدة بين محتوى الأوراق من الآزوت وكمية جزيئات الكلوروفيل (اللواقط الضوئية) (الشكل، 32).



الشكل رقم (32): العلاقة بين كفاءة النبات التمثيلية ومحتوى الآزوت في الأوراق في العديد من الأنواع النباتية.

يُلاحظ من الشكل وجود علاقة ارتباط طردية بين كلٍ من محتوى الأوراق من اليخضور ومحتواها من الآزوت الكلي، وبين محتوى الأوراق من الآزوت الكلي ونشاط الأنزيم المثبت لغاز الفحم RuBp-Carboxylase، وذلك في الورقة العلمية Flag Leaf، لنباتات القمح الطري Bread wheat (Evans, 1983). وهذا يعني أنَّ محتوى الأوراق، وخاصةً الورقة العلمية من الآزوت الكلي، يُعد من العوامل الرئيسة المحددة لكفاءة النبات التمثيلية، التي تتحدد بدورها بكمية الطاقة الضوئية الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي الممتصة (I) Intercepted Light energy، وتتحدد الأخيرة بمساحة الأوراق، ومحتواها من اليخضور (اللواقط الضوئية)، بالإضافة إلى كفاءة النبات في تحويل الطاقة الضوئية الممتصة إلى طاقة كيميائية مخزونة في روابط المركبات العضوية (السكريات) المُصَنَّعة، وتتحدد الأخيرة بكمية الأنزيم RuBisco ونشاطه (العودة والخيتي، 2008).

ويدخل عنصر الفوسفور Orthopasphate (P) في تركيب المركبات الغنية بالطاقة (ATP) Energ-rich compounds، والسكريات الثلاثية Triose، والخماسية

Pentose، والسداسية Hexose المُفسفرة، لذلك يؤدي توافر الفوسفور المعدني دوراً مهماً جداً في حلقة كالفن Calvin، وفي نقل نواتج الاستقلاب Metabolites، ونواتج التمثيل الضوئي Assimilates (النشاء، والسكروز)، ومن ثُمَّ فإنَّ نقص عنصر الفوسفور يؤدي إلى تراكم نواتج التمثيل الضوئي في الصانعات الخضراء، الأمر الذي يثبط عملية التمثيل الضوئي End- product inhibitory effect، حتى تحت الظروف البيئية المناسبة (Lauer el al.,1989, Senfi; 1975). وبينت بعض التجارب وجود علاقة ارتباط بين محتوى الأوراق الداخلي من CO_2 (Ci) (كمقياس لكفاءة تثبيت الكربون (Carboxylation efficiency)، وكمية الفوسفور المتاحة للنبات، في محصول فول الصويا Soybean، حيث لوحظ أنَّ معدل صافي التمثيل الضوئي كان معنوياً أعلى في البيئات التي زودت بكمية أكبر من الفوسفور (mMpi 0.50)، بالمقارنة مع البيئات الفقيرة جداً بالفوسفور (mMpi 0.050)، ما يشير إلى أهمية توافر الفوسفور المعدني في زيادة معدل تثبيت الكربون، ومن ثُمَّ استهلاك غاز ثاني أكسيد الكربون الداخلي. عموماً، يؤدي نقص بعض العناصر المعدنية (Ca^{+2}, Mg, Fe... الخ)، أو حتى تراجع الكمية الممتصة منها إلى تراجع محتوى الأوراق من الأصبغة اليخضورية، بالإضافة إلى تراجع عدد الصانعات الخضراء وحجمها. ويؤدي نقص عنصري الحديد والمغنيزيوم (Fe^{+3}, Mg^{+2}) إلى اصفرار الأوراق Chloroses، الذي يؤدي بدوره إلى انخفاض معدل امتصاص غاز الفحم بنحو الثلث، ويُعزى ذلك إلى تراجع محتوى الأوراق من الأصبغة الخضراء Chlorophyll molecules، ما يؤثر سلباً في كمية الطاقة الضوئية الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي الممتصة.

محتوى الأوراق من الآزوت وتمثيل الكربون Carbon Assimilation and Nitrogen Incorporation

يزداد معدل التمثيل الضوئي (تثبيت الكربون) بزيادة كمية الآزوت الممتصة من قبل جذور النبات، نظراً إلى أهميتهْ، في تصنيع البروتينات البنائية، وتشكيل خلايا نباتية جديدة (زيادة عدد الأوراق ومساحتها). ويُلاحظ من الشكل (32) وجود علاقة ارتباط خطية بين كفاءة النبات التمثيلية ومحتوى الأوراق من الآزوت، في الأنواع النباتية رباعية الكربون، مثل *Panicum miliaceum* (A)، والأنواع المحصولية ثلاثية الكربون (أصناف محسَّنة من القمح والرز Rice)(B)، والأنواع النباتية العشبية (C) C_3 grasses and herbs، والأشجار متساقطة الأوراق (D)، والشجيرات (E) Shrubs، (Stumtz and Zotz, 2001). ومن المهم بمكان تعريف كفاءة استعمال الآزوت التمثيلية

Photosynthetic Nitrogen (NUE_{ph})Use Efficiency، التـي تمثـل نسبـة معدل التمثيل الضوئي إلى محتوى الآزوت في وحدة المساحة الورقية.

$$NUE_{ph} = \frac{Ph\ (\mu mol\ CO_2\ M^{-2}\ S^{-1})}{N_A\ (mmol\ N\ m^{-2})}$$

وتمثـل كفـاءة اسـتعمال الآزوت التمثيليـة الإنتاجيـة (NUE_P)، نسـبة الزيـادة الحاصـلة فـي كمية المادة الجافة خلال فترة زمنية محددة إلى محتوى الأجزاء التمثيلية Assimilating organs من الآزوت.

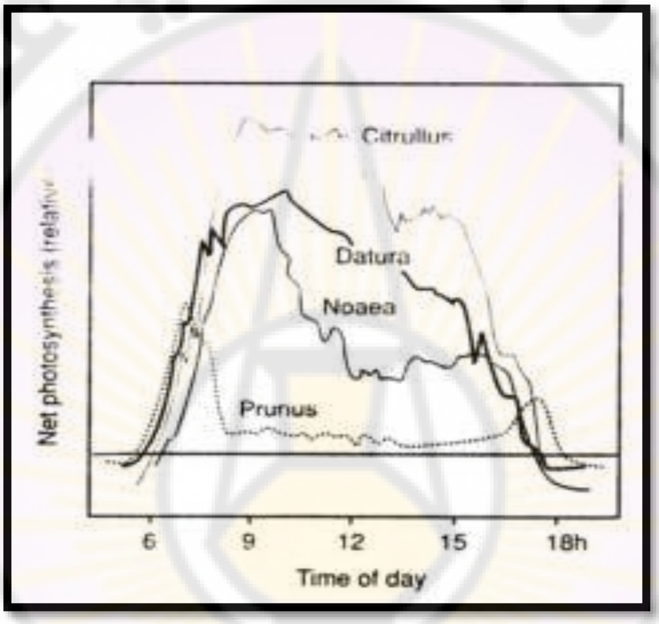
$$NUE_P = \frac{\text{Increase in organic dry matter}}{\text{Incorporated nitrogen}} \quad (gDM\ g^{-1}\ N)$$

التأثير المشترك للعوامل البيئية في عملية التمثيل الضوئي:

Photosynthesis and the Interplay of External Factors

تحـت ظـروف النمـو الطبيعيـة، فـإنَّ العوامـل البيئيـة المختلفـة لا تـؤثر بشـكلٍ مسـتقل عـن بعضـها الـبعض، وإنّمـا يتـداخل تأثيرهـا، بحيـث تكـون الاسـتجابة حصـيلة معقـد العوامـل مجتمعـة Factor Complex. ومـن الأمثلـة الجليـة علـى التـأثير المتبـادل المعقـد ظـاهرة انخفـاض معـدل التمثيـل الضـوئي خـلال فتـرة الظهيـرة Midday depression of photosynthesis، فعند فترة منتصف النهار سوف تزداد شدة الإشعاع الشمسي، الأمر الذي يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الأوراق، ومن ثُمَّ زيادة معدل فقد الماء بـالنتح، لأنَّ عمليـة النـتح لهـا تـأثير مبـرد Cooling effect، وتصـبح تبعـاً لـذلك كميـة المـاء المفقـودة بالنتح أكبر من كمية الماء الممتصة عن طريق المجموعة الجذرية، فيتراجع جهد الامـتلاء داخـل الخلايـا النباتيـة، وتبـدأ المسـامات بـالانغلاق تـدريجياً، ويـزداد تركيـز CO_2 الـداخلي بسبب تراجع معدل تثبيت الكربون (تثبيط غير مسامي لعملية التمثيل الضـوئي)، وتتراجـع كفـاءة النظـام الضـوئي الثـاني Photosystem II، وتترافق أيضـاً كـل هـذه التغيـرات مـع

تراجع الجهد المائي في الأوراق نتيجة انخفاض محتوى الماء النسبي فيها، الأمر الذي يؤدي إلى تراجع معدل التمثيل الضوئي خلال فترة الظهيرة، ولكن بعد الظهيرة يبدأ معدل التمثيل الضوئي بالازدياد تدريجياً نتيجة زوال كل تلك العوامل المحددة (الشكل، 33). هذا الانخفاض في معدل صافي التمثيل الضوئي خلال فترة الظهيرة يكون ناجم عن تأثير مجموعة من العوامل التي أدّتْ إلى تعرض النباتات إلى مستويات عالية من الإجهاد.



الشكل رقم (33): التبدل الحاصل في معدل صافي التمثيل الضوئي بتغير الوقت خلال النهار.

تؤدي الشدة الضوئية العالية إلى حدوث التثبيط الضوئي Photoinhibition، ويؤدي تراجع كمية الماء الممتصة وازدياد معدل النتح إلى تراجع جهد الامتلاء (Ψ_p)Turgor potential، ويؤدي تراجع الناقلية المسامية وانغلاق المسامات بشكلٍ كامل إلى تعطيل التأثير المبرد لعملية النتح، وحدوث التحميل الحراري الزائد Heat overloading، وتراجع الجهد المائي يؤدي إلى تراجع معدل نقل نواتج التمثيل الضوئي من المصدر Source (الأوراق) إلى المصب Sink (نقاط الاستهلاك + الحبوب)، ويؤدي بالمقابل تخريب النظام الضوئي الثاني إلى توقف النشاط التمثيلي، ومن ثُمَّ تراكم نواتج التمثيل الضوئي ضمن الصانعات، التي تؤدي بدورها إلى تراجع معدل تصنيع كمية جديدة من نواتج التمثيل الضوئي. عموماً، تحت ظروف الزراعة الحقلية، فنادراً ما تكون جميع العوامل البيئية مثلى لوصول معدل التمثيل الضوئي إلى أعلى قيمة ممكنة Maximum

value، وبالمتوسط فإنَّ القيم اليومية العظمى لامتصاص CO_2 وتثبيته لا تتجاوز 70-80% من الطاقة التمثيلية الكامنة. عموماً، تتباين العوامل البيئية التي يمكن أنْ تقلل من كفاءة التمثيل الضوئي، وتختلف وطأة هذه العوامل ونسبة اسهامها باختلاف المنطقة البيئية، ولكن في بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط، فإنَّ شح الموارد المائية العذبة Water shortage هو أهم العوامل المحددة لإنتاجية الأنواع المحصولية. فعلى سبيل المثال لا الحصر، فإنَّ معدل التمثيل الضوئي اليومي الأعظمي لبعض الأنواع الشجيرية وشبه الشجيرية Semi-shrubs المنتشرة في المناطق الجافة يعادل 20-50% خلال الفترات الجافة بالمقارنة مع الفترات التي تهطل فيها الأمطار. وتختلف بشكلٍ عام التأثيرات الناجمة عن الإجهاد المائي باختلاف النوع النباتي، وطبيعة المسار الكربوني (C_3، C_4،CAM)، والمرحلة من حياة النبات التي تتعرض للإجهاد، وشدة الإجهاد، ومدته، وخصائص التربة، ولاسيما مقدرتها على الاحتفاظ بالماء، والممارسات الزراعية المعتمدة [موعد الزراعة، عمق الزراعة، معدلات التسميد الآزوتي، طريقة تحضير الأرض قبل الزراعة (زراعة حافظة أو تقليدية)، معدل البذار، مكافحة الأعشاب ...الخ].

ميزانية الكربون على مستوى النبات ككل Carbon Budget of the Whole Plant

إنَّ قيمة الكسب الصافي في الكربون Net carbon gain تتحدد فقط بمعدل تثبيت الكربون بعملية التمثيل الضوئي، ومعدل فقد الكربون خلال كامل موسم النمو، ولا يمكن التعويل على معدلات التمثيل الضوئي والتنفس خلال فترات محددة من النمو. ويتحدد معدل صافي التمثيل الضوئي بنسبة الأجزاء الخضراء الفعّالة في عملية التمثيل الضوئي Assimilating organs إلى الأجزاء التي تقوم فقط بعملية التنفس Respiring tissues (العامل التشريحي/الوظيفي). وتتحدد أيضاً بطول الفترة التي تكون خلالها العوامل البيئية ملائمة للتمثيل الضوئي إلى طول الفترة التي تسوء خلالها الظروف البيئية خلال كامل موسم النمو (عامل الزمن Time factor). عموماً، تزداد قيمة معدل صافي التمثيل الضوئي (كسب الكربون الصافي) عندما تكون كمية المادة الجافة الكلية المُصنّعة بالتمثيل الضوئي أكبر من كمية المادة الجافة المفقودة بالتنفس، أي عندما يكون معدل التمثيل الضوئي أعلى من معدل فقد المادة الجافة بالتنفس. وتسمى نسبة مجموع معدلي التمثيل الضوئي والتنفس ($ph_n + R$) إلى معدل التنفس، اصطلاحاً كفاءة استعمال الكربون في الورقة النباتية Carbon Use Efficiency of the leaf (CUE_{leaf}).

$$\mathbf{CUE_{leaf} = \frac{ph_n + R}{R}\ (m\ mol\ CO_2\ m^{-2}\ S^{-1} /\ \mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1})}$$

عموماً، تحت ظروف النمو المناسبة فإنَّ أوراق الأنواع النباتية ثلاثية الكربون تكسب كمية من الكربون بفعل التمثيل الضوئي تعادل 3-5 مرات أعلى من كمية الكربون المفقودة بالتنفس خلال الفترة الزمنية نفسها، في حين تكون كمية الكربون المثبتة بوساطة أوراق الأنواع النباتية رباعية الكربون أعلى بنحو 10-20 مرة بالمقارنة مع كمية الكربون المفقودة بالتنفس. ويعزى ذلك بشكلٍ رئيس إلى عدم حدوث التنفس الضوئي في الأنواع النباتية رباعية الكربون. ويعطى ميزان الكربون اليومي Daily carbon balance فكرة دقيقة عن خصائص النوع النباتي/الطراز الوراثي الإنتاجية، ويعتمد ذلك على متوسط معدل صافي الكربون اليومي على مدار موسم النمو. ويزداد معدل صافي كسب الكربون في الحالات الآتية:

1. ارتفاع معدل التمثيل الضوئي Higher assimilation rate.
2. زيادة حجم المسطح الورقي الأخضر الفعّال في عملية التمثيل الضوئي، (LAI) مع وجود هندسة ورقية مناسبة لوصول كمية كافية من الطاقة الضوئية إلى جميع أوراق النبات، ولاسيما السفلية منها.
3. زيادة طول الفترة الزمنية خلال النهار التي تكون خلالها العوامل البيئية مناسبة جداً لعملية التمثيل الضوئي.
4. كلما كان عدد ساعات الليل قصيرة ودرجة حرارة الليل منخفضة، كلما كان معدل التنفس أقل.

يمكن القول:إنَّ الكفاءة الإنتاجية تتحدد بمعدل صافي التمثيل الضوئي اليومي، وعدد الأيام التي يكون خلالها معدل صافي التمثيل الضوئي أعظمياً. وتكمن أهمية ذلك من وجهة نظر إنتاجية، من خلال العمل ضمن برامج التحسين الوراثي على ضبط توقيت مراحل النمو مع الظروف البيئية السائدة في منطقة ما، بما يضمن زيادة معدل التمثيل الضوئي.

ميزان الكربون الكلي The Overall CO_2 Balance

يتضمن ميزان الكربون لكامل النبات كمية المادة الجافة الكلية المُصنّعة بعملية التمثيل الضوئي السنوية Annual gross photosynthesis (phg)، لكامل كتلة الأوراق (DM_{leaf}) خلال كامل عدد ساعات النهار السنوية (d)، مطروحاً منه كمية المادة الجافة الكلية السنوية المفقودة بالتنفس من خلال الأوراق في الليل والنهار (R_{leaf})، وما يفقد بالتنفس من الأجزاء الهوائية الأخرى (بما فيها الأزهار والثمار) (R_{shoot})، وما يفقد بالتنفس عن طريق الجذور (R_{root}).

$$CO_2 \text{ balance} = DM_{leaf}\, \Sigma_c\, phg - DM_{leaf}\, \Sigma R_{leaf} - DM_{root} \Sigma R_{shoot} - DM_{root}\, \Sigma R_{root}$$

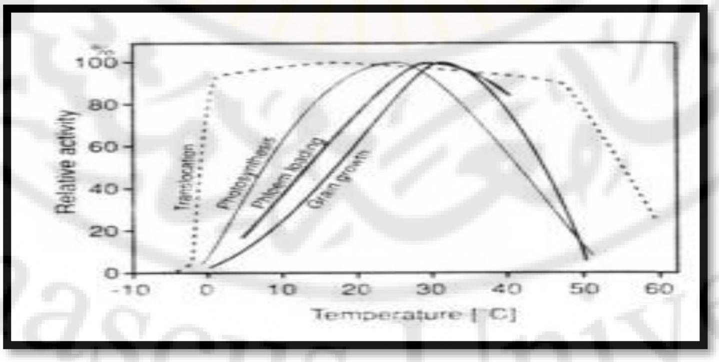
ويُسمى ميزان الكربون على مستوى النبات ككل اصطلاحاً بكفاءة استعمال الكربون للنبات ككل، ويُرمز له بالرمز CUE_{plant}، ويعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$CUE_{plant} = \frac{\Sigma_{phn} + \Sigma R}{\Sigma R} \quad (g\ CO_2\ g^{-1}\ t^{-1})$$

وحتى نتمكن من حساب كفاءة استعمال الكربون على مستوى النبات بشكلٍ دقيق، فلا بدَّ من قياس معدل صافي التمثيل الضوئي لكل جزء من الأجزاء الهوائية الفعّالة في عملية التمثيل الضوئي (الأوراق، الساق، السنابل، القنابع، العصافات، القرون...الخ)، ولابدَّ من قياس معدل فقد المادة الجافة. بالتنفس للأجزاء تحت الأرضية خلال النهار والليل. وتقدَّر كفاءة استعمال الكربون للثبات الكامل في الأنواع النباتية الحولية، مثل الحبوب Cereals، والبقوليات Legumes، والمحاصيل الجذرية Root crops، بنحو 2-4 غ CO_2 لكل غ خلال فترة زمنية محددة.

إنتاج المادة الجافة Dry Matter Production

إنَّ المادة الجافة المُصنّعة بفعل عملية التمثيل الضوئي، وغير المستعملة في التنفس (كمية المادة الجافة الفائضة)، تُساعد في زيادة المادة الجافة للنبات، ويمكن أنْ تستعمل لنمو أجزاء النبات المختلفة، أو تُخزن على شكل مدخرات Accumulating reserves. وتوجد علاقة ارتباط مباشرة وخطية بين كمية المادة الجافة الزائدة في ميزانية الكربون CO_2-budget والزيادة الحاصلة في الوزن الجاف للنبات (الشكل، 34).



الشكل رقم (34): التبدلات في النمو والفعالية النسبية لمختلف العمليات الفسيولوجية باختلاف درجة الحرارة.

يُلاحظ من الشكل وجود علاقة ارتباط خطية مباشرة بين معدل التمثيل الضوئي (كمية المادة الجافة المصنّعة) ومعدل النمو النسبي Relative growth rate(RGR)، وتزداد قيمة معامل الارتباط بازدياد معدل صافي التمثيل الضوئي (كمية المادة الجافة المتبقية بعد طرح ما يُفقد منها بالتنفس) (Pereira,1999). ويتوقف ذلك بشكلٍ رئيس على كفاءة النبات التمثيلية عند أي مستوى من التنفس. وعادةً ما يكون إنتاج المادة الجافة في الأنواع النباتية رباعية الكربون، مثل قصب السكر Sugar cane، والذرة الصفراء Maize، والدخن Millet أعلى بنحو 2-3 أضعاف بالمقارنة مع الأنواع النباتية ثلاثية الكربون، مثل الشوندر السكري Sugar beet، والفصة Alfalfa، والتبغ Tobacco، والقمح، والشعير...الخ. ويمكن أنْ نُعبِّر عن الزيادة في الكتلة الحية Biomass نتيجة تراكم نواتج التمثيل الضوئي production rate (PR)، من خلال نسبة الزيادة الحاصلة في المادة الجافة في وحدة الزمن (يوم، أسبوع) خلال موسم النمو.

$$PR = d\,DM / dt$$

ويمكن تقدير معدل الزيادة في المادة الجافة من خلال حصاد النباتات خلال فواصل زمنية محددة Periodic harvests، ولكن لا يمكن الحصول ببساطة عن الوزن الجاف للكربون العضوي (المادة الجافة) بمجرد تسجيل الوزن الجاف الكلي للنبات، لأنَّ هذا الوزن الجاف يتضمن أيضاً مواد معدنية Mineral substances، تُقدَّر بنحو 3-10% من الوزن الكلي للمادة الجافة (الجدول، 16)، إضافة إلى المركبات الكربونية. وتبعاً لذلك لا بدَّ من طرح وزن الرماد Ash weight من الوزن الجاف الكلي للمادة الجافة الأولية.

الجدول رقم (16): متوسط محتوى الرماد (%) في المادة الجافة لمختلف المجاميع النباتية.

المجموعة النباتية	محتوى الرماد (%)
Thallophytes	
1. البكتريا.	8 - 10
2. الفطريات.	7 - 8
3. أعشاب البحر Seaweed.	10 - 20
4. الطحالب Mosses.	2 - 4
Herbaceous cormophytes	
1. Grasses and sedges.	7 - 10
2. Meadow herbs.	6 - 10

الأنواع النباتية العصارية Succulents	
1. عصارة الأوراق.	20 - 10
2. عصارة الساق.	15 - 10
الأنواع النباتية المتكيفة مع البيئات المتملحة (Halophytes)	20 - 10
Tundra herbs	15 - 5
النباتات المائية	12 - 5
الأنواع النباتية الخشبية Woody plants	
1. متساقطة الأوراق	6 - 4
2. مستديرة الأوراق	9 - 5

المصدر: Larcher, 1987.

ويمكن أنْ يُعبَّر عن معدل إنتاج المادة الجافة على مستوى النبات المفّرد Individual plant، بمفهوم معدل النمو النسبي RGR)Relative Growth Rate). ويُعبِّر معدل النمو النسبي عن مقدار الزيادة الحاصلة في المادة الجافة خلال وحدة الزمن، وذلك بالنسبة إلى الوزن الجاف الأولي Initial Dry weight (الحصاد الأول عند الزمن T1)، ويعطى بالعلاقة الرياضية الآتية (Briggs et al., 1920 a,b).

$$RGR = \frac{d\,DM}{dt} \times \frac{1}{DM}$$ **(غ مادة جافة عضوية. غ$^{-1}$. أسبوع $^{-1}$)**

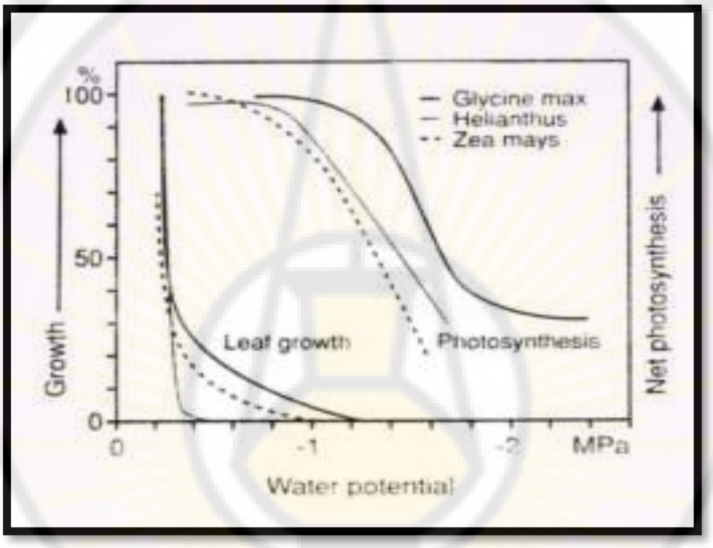
ويُعبَّر عن الزيادة التراكمية في المادة الجافة العضوية خلال كامل موسم النمو بمفهوم غلة الإنتاج YP)production yield)، وتمثل الفرق في الوزن الجاف للمادة الجافة العضوية عند بداية القياس (t_1)، وعند نهاية موسم النمو (t_2)، ويُعطى وفق العلاقة الآتية:

$$YP = \int_{t1}^{t2} PR\,dt$$

وبشكلٍ مماثل لميزان الكربون الكلي، فإنَّ غلة الإنتاج تتحدد بشكلٍ رئيس بكفاءة النبات التمثيلية Assimilatory capacity، وطول موسم النمو، ومدى ملاءمة الظروف البيئية السائدة خلال كامل موسم النمو. وتؤثر العوامل البيئية في إنتاج المادة الجافة من خلال تأثيرها في معدل انتشار CO_2 عبر المسامات أثناء عملية التبادل الغازي، وفي معدل تثبيت الكربون. ويمكن أنْ يؤثر تعَّرض النباتات لمستوياتٍ غير مناسبة من العوامل البيئية (الحرارة، الرطوبة، الشدة الضوئية). ونقص التغذية المعدنية سلباً في معدل تصنيع المادة الجافة وتراكمها، ويُعزى ذلك إلى التأثيرات المباشرة في عملية التمثيل الضوئي، ويُلاحظ من الشكل (35) التبدلات الحاصلة في معدل نمو الأوراق ومعدل صافي التمثيل الضوئي في محصول فول الصويا Soybean ، وزهرة الشمس Sunflower، والذرة الصفراء Corn استجابة لانخفاض الحاصل في جهد الأوراق المائي (Boyes, 1970). ويبين أيضاً الشكل (35) تأثير درجات الحرارة في مختلف العمليات المرتبطة بإنتاج نواتج التمثيل الضوئي ونقلها إلى أجزاء النبات المختلفة لنمو نباتات القمح الطري خلال مرحلة تطور الحبوب (Wardlaw and Passieura, 1976). يُلاحظ من الشكل أنَّ معدل صافي التمثيل الضوئي في الأوراق العلمية، والنقل الفعّال للسكريات ضمن اللحاء (تحميل اللحاء) ومعدل نمو الحبوب Grain growth، تزداد بازدياد درجة الحرارة وصولاً إلى درجة الحرارة المثلى Optimum temperature (20-30 °م: ضمن مدى حراري ضيق)، ثُمَّ لا تلبث أنْ تنخفض عند درجات الحرارة المتطرفة Extreme temperatures. ولكن يُلاحظ أنَّ عملية نقل نواتج التمثيل الضوئي من المصدر إلى خلايا اللحاء Translocation of assimilates أقل تأثراً بالتغير الحاصل بدرجات الحرارة، ولا تنخفض إلاّ في حالات تعرض النباتات للصقيع Frost، أو الإجهاد الحراري المتطرف (< 50°م). ويُلاحظ من الشكل (35) أنَّ تراجع الجهد المائي داخل الأوراق يؤثر بشكلٍ أكبر في معدل نمو الأوراق بالمقارنة مع معدل صافي التمثيل الضوئي لدى جميع الأنواع النباتية، حيث يؤدي تراجع الجهد المائي إلى تراجع جهد الامتلاء، الذي يُعد بمنزلة القوة الفيزيائية التي تدفع الجدران الخلوية على الاستطالة، لذلك فإنَّ أي تراجع في جهد الامتلاء يمكن أنْ يوقف نمو الأوراق نتيجة تثبيط استطالتها Cell expansion، ويمكن ألاَّ يؤثر ذلك في معدل انقسام الخلايا Cell division، ويترّاجع معدل النمو، لأنَّ النمو هو حصيلة انقسام واستطالة غير عكوسة للخلايا النباتية. وتُعد تبعاً لذلك عملية استطالة خلايا الأوراق من أكثر العمليات الفسيولوجية حساسيةً للعجز المائي، ولكن تتباين نسبة التراجع في معدل نمو الأوراق استجابةً للتراجع في الجهد المائي باختلاف الأنواع النباتية، ويمكن أنْ يُعزى ذلك إلى التباين في مرونة جدران الخلايا

النباتية Cell wall (Φ)extensibility، أو التباين في المقدرة على المحافظة على جهد الامتلاء (Ψ_P) داخل خلايا الأوراق، أو التباين في الحد الأدنى الحرج من جهد الامتلاء الذي تبدأ عنده الخلايا النباتية بالاستطالة (y)، وهذا موضح في المعادلة المقترحة من Cossegrove وزملاؤه (1989):

Plant cell growth rate = Ø (P-Y)



الشكل رقم (35): التبدلات في النمو والفعالية النسبية لمختلف العمليات الفسيولوجية باختلاف جهد الأوراق المائي.

استعمال نواتج التمثيل الضوئي في النمو Utilization of Photosynthates in the growth

تتكون النباتات بشكلٍ رئيس من الكربوهيدرات، حيث تشكل قرابة 60% أو أكثر من المادة الجافة في النباتات الراقية. وإنَّ المادة الجافة المصنَّعة بفضل عملية التمثيل الضوئي يجب أنْ توزع Distributed بين أجزاء النبات المختلفة تبعاً لاحتياجاتها (الصيانة، النمو، التخزين...الخ)، أو تستعمل كمادة أولية لتصنيع مركبات عضوية أخرى (البروتينات، المواد الدهنية).

نقل نواتج التمثيل الضوئي Translocation of Photosynthates

تنقل نواتج التمثيل الضوئي بشكلٍ مستمر من أماكن تصنيعها (المصدر)، أي الأجزاء الهواء الخضراء الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي إلى أماكن الاستهلاك أو الادخار (المصب)، وتتضمن الأنسجة الجنينية Meristematic tissues، والبذور Seeds، والثمار Fruits، والأنسجة الخازنة Storage tissues. ويتحدد معدل نقل نواتج التمثيل الضوئي بفرق التدرج بالتركيز بين مواقع التصنيع ومراكز الطلب على نواتج التمثيل الضوئي (مراكز الجذب Attraction centers). وفي النجيليات على سبيل المثال، فإنَّ الأوراق السفلية تقدم المادة الجافة إلى الجذور، في حين تقدم الأوراق العلوية المادة الجافة لمراكز النمو في الأجزاء الهوائية، مثل الأزهار Flowers، والحبوب في طور التشكل والامتلاء. ومن المهم بمكان أنْ تحصل الأعضاء النباتية المختلفة المستهلكة لنواتج التمثيل الضوئي على كامل احتياجاتها من المادة الجافة في الوقت المناسب. وتسمى عملية توزيع نواتج التمثيل الضوئي بين أجزاء النبات المختلفة اصطلاحاً كفاءة توزيع نواتج التمثيل الضوئي Partitioning efficiency. ويمكن القول بشكلٍ عام، إنَّ التباين الوراثي في الغلة الاقتصادية بين الطرز التابعة للنوع النباتي نفسه إنَّما يُعزى إلى ثلاثة محاور رئيسة:

1. التباين في معدل صافي التمثيل الضوئي، وهذا يُعزى بدوره إلى التباين في كفاءة الطراز الوراثي التمثيلية.
2. التباين في معدل نقل نواتج التمثيل الضوئي من المصدر إلى المصب.
3. التباين في كفاءة توزيع نواتج التمثيل الضوئي بين أجزاء النبات المختلفة. وبشكلٍ عام، فإنَّ الطراز الوراثي الذي يُسخِّر كمية أكبر من نواتج التمثيل الضوئي لمرحلة النمو الثمري Reproductive stage، سيعطي غلةً اقتصادية أكبر، ومن ثمّ قيمة دليل حصاد Harvest index أعلى.

وتتراوح بشكلٍ عام قيمة دليل الحصاد في الحبوب بين 25% في الشيلم Rye، إلى 50% في الرز Rice، والشعير Barley، ويمكن أنْ تصل حتى 60% في القمح. وتتراوح هذا القيمة في البقوليات بين 30% في فول الصويا Soybean، إلى 60% في الفول Garden bean. ويمكن زيادة الغلة الاقتصادية من خلال التحسين الوراثي لزيادة قيمة دليل الحصاد، الذي يُعَّد من الصفات الفسيولوجية المهمة المرتبطة بتحسين غلة محاصيل الحبوب والبقول، ولاسيما تحت ظروف الزراعة المطرية (Passioura, 1983):

$$GY = T_E \times WUE \times HI$$

حيث: T_E: معدل فقد المياه بالتبخر- نتح.

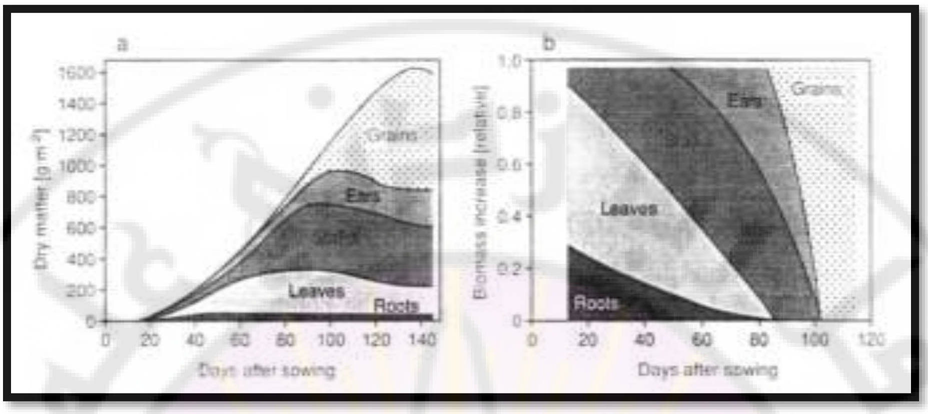
WUE: كفاءة استعمال المياه.

HI: دليل الحصاد.

وأهم ما يميز هذه المعادلة أنَّ مكوناتها مستقلة عن بعضها البعض، ومن ثُمَّ يمكن زيادة الغلة الاقتصادية من خلال زيادة أي من مكوناتها، بمعنى آخر يمكن تحقيق زيادة تراكمية في الغلة الاقتصادية من خلال زيادة جميع تلك الصفات المحددة للغلة. وقد أمكن من خلال برامج التربية والتحسين الوراثي زيادة دليل الحصاد (نسبة الغلة الحبية إلى الوزن الجاف الكلي للنبات) من قرابة 24%. إلى 47% في محصول الذرة الصفراء، ومن نحو 43% إلى 57% في أصنافْ الرز المحسّنة المستنبطة حديثاً.

تكاليف ومنافع الأوراق Costs and Benefits of Leaves

إنَّ التكاليف المتعلقة بالنمو Growth والتمايز Differentiation لا تقتصر فقط على المادة الجافة الداخلة في تركيب الأنسجة النباتية المختلفة، وإنما تتضمن استعمال نواتج التمثيل الضوئي في إنتاج المواد الداعمة Supporting substrates، وتأمين الهياكل الكربونية Carbon skeletons لجميع المركبات العضوية في النبات، بالإضافة إلى استهلاك جزء منها في تأمين احتياجات الطاقة للعمليات الأيضية المختلفة (تنفس النمو والصيانة، ونقل العناصر المعدنية)، ولكل العمليات الحيوية الأخرى. ويُعبَّر عن التكاليف اللازمة لتشكل ورقة نباتية جديدة وتطورها بمكافئ الجلوكوز Glucose equivalents، أو احتياجات الطاقة أو الكربون (الشكل، 36، الجدول، 17). وعادةً ما تكون كلفة تشكيل الأوراق ذات العمر الطويل وتطورها Long-lived، والسميكة المتغلظة أعلى من كلفة تشكيل الأوراق ذات العمر القصير والطرية وتطورها، بسبب زيادة كثافة أنسجتها، وازدياد درجة تعقيد تركيز موادها العضوية، بالإضافة إلى احتوائها على المركبات العضوية التي يتطلب تصنيعها كمياتٍ كبيرة من الكربون، مثل البروتينات، والمواد الدهنية، والليغنين Lignins، ونواتج الاستقلاب الثانوي.



الشكل رقم (36): توزيع نواتج التمثيل الضوئي بين أجزاء النبات المختلفة (القمح الربيعي) (a)، والتسخير (الزيادة النسبية في المادة الجافة) للأعضاء المختلفة (b).

الجدول رقم (17): يبين تكاليف بناء بعض المركبات العضوية والمواد الدفاعية.

المادة النباتية وأجزاء النبات	تكلفة البناء (غ جلوكوز/ غ مادة جافة)
المواد الدفاعية Defense substances	
▪ التانينات Tannins	**2.50 – 1.55**
▪ Cyanogenic glycosides	**2.10 – 1.90**
▪ الفلافونيدات Flavonoids	**2.80 – 2.10**
▪ القلويدات Alkaloids	**3.30 – 2.80**
▪ التربينات الأحادية Monoterpenoids	**3.50 – 2.80**
▪ Latex	**3.30**
مواد جدر الخلية النباتية Cellwall sub	
▪ الليفنين (خشب المخروطيات).	**2.49 – 2.44**
▪ الليفنين (خشب معظاة البذور).	**2.52 – 2.48**

تكاليف الأعضاء المستبدلة Costs of replacing organs

▪ الأوراق الطرية Soft leaves.	**1.20 – 1.10**
❖ الفقيرة بالمواد الدفاعية	
❖ الغنية بالمواد الدفاعية	**حتى 1.80**
▪ الأوراق المتغلظة السميكة Sclerophyllous	**1.60 – 1.30**
▪ إبر الأشجار المخروطية Conifer needles	**1.50**
▪ الأجزاء الهوائية غير المحتوية على الليغنين.	**1.35 – 1.10**
▪ الأجزاء الهوائية المحتوية على الليغنين.	**1.55 – 1.40**

المصدر: Gulmom and Mooney, 1986; Merino et al., 1984; Eamus and Prichard, 1998

وتعرَّف نسبة الوزن الجاف للأوراق إلى المساحة الورقية بمساحة الكتلة الورقية النوعية Specific leaf Mass Area (SLM)، وتعطى بالعلاقة الرياضية الآتية (Hunt and Cooper, 1967):

$$\text{SLM (كغ . م}^{-2}\text{)} = \frac{\textbf{Dry matter}}{\textbf{Leaf area}}$$

وتختلف قيمة مساحة الكتلة الورقية النوعية باختلاف النوع النباتي. فهي تتراوح بين 0.04-0.08 كغ. م$^{-2}$ للأوراق المتمايزة بشكلٍ كامل للأنواع الحولية العشبية المتكيفة مع ظروف الإضاءة العالية، وقرابة 0.05-0.10 كغ. م$^{-2}$ للشجيرات متساقطة الأوراق والأشجار. وبنحو 0.2-0.3 كغ. م$^{-2}$ للأشجار المخروطية دائمة الخضرة.

كسب الكربون السريع: شكل الاستثمار Rapid Carbon Gain: the Investment Type

تتحدد كمية المادة الجافة في النبات "دخل income" بكفاءة النبات التمثيلية في وحدة المساحة الورقية. ويتحدد الأخير بحجم المصدر Source size، أو نسبة الأنسجة الفعّالة في عملية التمثيل الضوئي من كامل الكتلة الحية (يجب ألاّ تقل عن 50%). وخلال مرحلة

النمو الخضري فإنَّ جزءاً كبيراً من نواتج التمثيل الضوئي يُستعمل لتشكيل الأوراق الخضراء، التي تشكل "مطابخ النبات"، حيث تقوم بدورها بتصنيع نواتج التمثيل الضوئي بفضل عملية التمثيل الضوئي. وخلال مرحلة الإزهار وما بعدها، فإنَّ النباتات تُسخّر جزءاً أكبر من نواتج التمثيل للأعضاء الاقتصادية (الثمرية) Reproductive organs، في حين تقل كمية المادة الجافة المُسخّرة للأجزاء النباتية الأخرى (الجذور)، فقط ما يكفي لصيانة الأجزاء النباتية الأخرى، وعادةً ما تتيبس الأوراق السفلية وتموت. وتبعاً لذلك فإنَّ نسبة الأوراق، والجذور، والتراكيب الداعمة، والأجزاء المثمرة تتغير بشكلٍ ملحوظ خلال مختلف مراحل النمو (الشكل، 36 a,b). يبين الشكل توزيع/تسخير Partitioning نواتج التمثيل الضوئي في نباتات محصول القمح، حيث يبين الشكل (15 a) توزيع نواتج التمثيل الضوئي على الأعضاء النباتية المختلفة، خلال مراحل النمو والتطور. ويبين الشكل (b 36) الزيادة النسبية في المادة الجافة للأعضاء النباتية المختلفة Fisher and (Schulze,1982). وتُعد الأنواع النباتية الحولية محدودة النمو خير مثال على طبيعة توجيه المادة الجافة واستثمارها، وآلية توزيعها بين أجزاء النمو المختلفة، لأنَّ موسم النمو محدود الطول، والعوامل البيئية التي تكون مثلى لكل مرحلة من مراحل النمو تتحدد بعامل الزمن، لذلك تسعى النباتات إلى استثمار نواتج التمثيل الضوئي بالشكل الأمثل بما يضمن تشكيل أعلى نسبة / كمية من الأنسجة النباتية / الأجزاء الثمرية خلال أقصر فترة زمنية ممكنة، بطريقة لا تتعارض مع التوازن الأمثل بين حجم المصدر والمصب. وتتحدد طبيعة استثمار نواتج التمثيل الضوئي وتوزيعها باختلاف العوامل البيئية السائدة. فعلى سبيل المثال، إذا كانت مصادر المياه المتاحة محدودة وغير كافية، أو في حال كانت التربة غير خصبة وفقيرة بالعناصر المعدنية المغذية، هنا سيضطر النبات إلى توجيه كمية أكبر من نواتج التمثيل الضوئي باتجاه الأجزاء تحت الأرضية (الجذور)، لتشكيل مجموع جذري متعمق ومتشعب Deep-well-branched قادراً على استخلاص كمية أكبر من الماء والعناصر المعدنية المغذية من حيز أكبر من قطاع التربة، ولاسيما من طبقات التربة العميقة الرطبة، ما يساعد في زيادة مقدرة النباتات على تحمل الجفاف، وضمان تحقيق غلة اقتصادية جيدة، ولكن سيكون ذلك على حساب كمية المادة الجافة المسخّرة للأجزاء الهوائية (الأوراق، والسوق Stalks)، ما يؤثر سلباً في حجم المسطح الورقي الأخضر الفعّال في عملية التمثيل الضوئي، ومن ثُمَّ كمية المادة الجافة المصَّنعة والمتاحة لمرحلة النمو الثمري، ما يؤثر سلباً في عدد الأجزاء الاقتصادية المتشكلة وحجمها (قوة المصب Sink Strength)، ومن ثُمَّ غلة المحصول الاقتصادية.

ميزانيـة الكربـون فـي المجتمعـات النباتيـة The Carbon Budget of Plant Stands

إنتاجيـة النباتـات فـي وحـدة المساحـة مـن الأرض The Productivity of Plant Stands

تُسمى كمية المادة الجافة المتشكلة بوساطة الأجزاء الهوائية المغطية لمساحة محدودة من سطح التربة اصطلاحاً الإنتاج الأساسي Primary Production (PP) لتلك الكثافة النباتية. ويزداد الإنتاج للمجتمع النباتي بزيادة:

1. معدل إنتاج المادة الجافة للنباتات المكونة للمجتمع النباتي.
2. زيادة كمية الطاقة الضوئية الممتصة من قبل الأوراق الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي.
3. زيادة طول موسم النمو، وعدد أيام النهار الطويل، حيث يضمن ذلك انفتاح المسامات لفترة زمنية أطول، ومن ثُمَّ زيادة معدل انتشار الكربون، وكفاءة النبات التمثيلية.

ويُعبَّر عن ذلك بمفهوم معدل نمو المحصول Crop Growth Rate (CGR) ويمثل حاصل جداء معدل الإنتاج في وحدة المساحة الورقية للنبات الواحد (ULR) مع دليل المساحة الورقية (LAI) التي تغطي وحدة المساحة من الأرض للنبات الواحد.

GCR = ULR × LAI (غ مادة جافة عضوية.م$^{-2}$ من الأرض. وحدة الزمن)

تُحقق الكثافة النباتية ضمن مساحة متر مربع واحد من الأرض، من الأنواع الحولية رباعية الكربون معدلات إنتاج أعظمي تقدر بنحو 50-60 غ.م$^{-2}$. يوم$^{-1}$، وذلك في البيئات المدارية وشبه المدارية، خلال موسم النمو الرئيس، في حين يُقدّر معدل نمو المحصول في المناطق البيئية المعتدلة بنحو 20-30 غ.م$^{-2}$. يوم$^{-1}$ بسبب كون شدة الإشعاع الشمسي أقل. ويقدّر معدل نمو المحصول في الأنواع النباتية الحولية ثلاثية الكربون بنحو 15-30 غ.م$^{-2}$. يوم$^{-1}$ كحدٍ أقصى، وذلك حسب النوع النباتي Species، وبالنسبة إلى كامل موسم فإنَّ متوسط معدل نمو المحصول في مثل هذه المجموعة النباتية لا يتجاوز 30-50% من

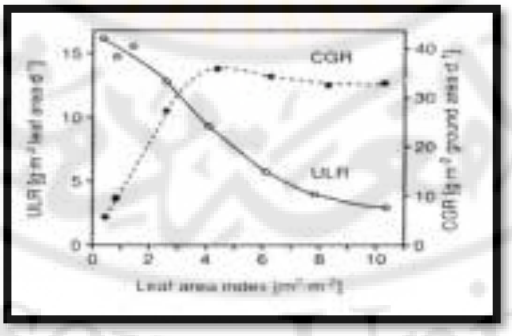
ذلك المعدل، بسبب تباين العوامل البيئية باختلاف مراحل النمو، وإمكانية تراجع المسطح التمثيلي وكفاءة النبات التمثيلية مع تقدم مراحل النمو. ويبين الجدول (18) القيم العظمى لغلة المادة الجافة لمختلف الأنواع النباتية.

الجدول رقم (18): القيم العظمى لغلة المادة الجافة لمختلف الأنواع النباتية.

النوع النباتي	غلة المادة الجافة القصوى (كغ. م$^{-2}$. سنة $^{-1}$)	دليل الحصاد
الأنواع النباتية رباعية الكربون		
▪ قصب السكر	8 – 6	0.85
▪ الذرة الصفراء في البيئات المدارية وشبه المدارية	4 – 3	0.5 – 0.4
▪ الذرة الصفراء في البيئات المعتدلة	4 – 2	0.5 – 0.4
▪ الدخن في البيئات المدارية	5 – 4	0.88 – 0.4
▪ الأنواع الحولية العلفية المدارية	8 – 3	0.85
الأنواع النباتية الحولية ثلاثية الكربون		
▪ الرز	5 - 2	0.55 – 0.4
▪ القمح	3 - 1	0.45 – 0.25
▪ الشعير	1.5	0.52 – 0.32
▪ أعشاب المروج	3 - 2	0.8 – 0.7
الأنواع المحصولية الجذرية		
▪ الشوندر السكري		0.67 – 0.45
▪ البطاطا Potato		0.86 – 0.82
الأنواع البقولية		
▪ الفصة Lucerne	3	–
▪ فول الصويا	3 – 1	0.35 – 0.3

المصدر: (Nobel, 1996; Nobel et al., 1992 b)

عموماً، كلما ازداد دليل المساحة الورقية (LAI)، ازداد حجم المسطح الورقي الأخضر الفعَّال في عملية التمثيل الضوئي، ومن ثُمَّ معدل إنتاج المادة الجافة، بسبب زيادة كمية الطاقة الضوئية الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي الممتصة (I)، ولاسيما في حال امتلاك النبات كفاءة عالية لاستعمال الضوء Radiation Use Effacing (RUE) وتحويله إلى طاقة كيميائية مخزونة في روابط المركبات العضوية المصنعة (السكريات). وهذا الكلام صحيح حتى حدٍ معين، وفي حال وجود هندسة ورقية مناسبة تزيد من كفاءة توزيع الضوء Light distribution، ولكن في حال غياب الهندسة الورقية، وزيادة الكثافة النباتية في وحدة المساحة من الأرض (تقليل المسافة بين السطور، أو بين النباتات ضمن السطر نفسه)، فستؤدي زيادة دليل المساحة الورقية إلى حدوث تظليل متبادل Foliage overlaps، يؤثر سلباً في كمية وشدة الطاقة الضوئية الواصلة إلى الأوراق السفلية المظللة، ما يؤثر سلباً في صافي كسب الكربون، ومن ثُمَّ معدل إنتاج المادة الجافة، فيتراجع معدل نمو المحصول (الشكل، 37). حيث يبين الشكل العلاقة بين الكفاءة التمثيلية في وحدة المساحة الورقة (ULR: غ مادة جافة. م$^{-1}$ من الوراق. يوم$^{-1}$). لنبات واحد من الذرة الصفراء ومعدل نمو المحصول بالعلاقة مع دليل المساحة الورقية. ويُلاحظ من الشكل أنَّ زيادة دليل المساحة الورقية (UAI =4) ثُمَّ لا يلبث بعد بالانخفاض مع زيادة دليل المساحة الورقية. ما يشير إلى وجود دليل مساحة ورقية أمثل Optimal LAI، لتحقيق أعلى معدل نمو محصول، وهذا يتوافق مع وجود هندسة ورقية (طريقة توضع الأوراق على الساق، وزاوية توضعها) تسمح بامتصاص كامل الأشعة الضوئية الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي (PAR) الواصلة إلى الغطاء النباتي Plant canopy. عموماً، يمكن أن يتحقق ذلك في الأنواع النباتية الحولية ذات الأوراق الأفقية عند دليل مساحة ورقية يتراوح بين 4-6، وعند قيمة تتراوح بين 8-10 في الحشائش.



الشكل رقم (37): العلاقة بين الكفاءة التمثيلية في وحدة المساحة الورقة (ULR) لنبات واحد من الذرة الصفراء ومعدل نمو المحصول بالعلاقة مع دليل المساحة الورقية.

Damascus University

كفـاءة تحويـل الطاقـة بعمليـة التمثيـل الضـوئي Energy Conversion by Photosynthesis

تُعد عملية التمثيل الضوئي Photosynthesis من أكثر العمليات الفسيولوجية فعَّالية في تحويل الطاقة الضوئية Solar energy إلى طاقة كيميائية Chemical energy. وتُسمى فعَّالية عملية التمثيل الضوئي في استعمال الطاقة الضوئية اصطلاحاً كفاءة استعمال الضوء Radiation Use Efficiency(RUE_{ph}).

$$(\%)\ RUEph = \frac{\text{كمية الطاقة الكيميائية المخزونة في روابط المركبات العضوية}}{\text{كمية الطاقة الضوئية الممتصة}} \times 100$$

ويمكن أنْ تُحسب كفاءة استعمال الضوء بعملية التمثيل الضوئي من معرفة الاحتياج الضوئي Quantum requirement اللازم لتفاعلات الضوء Photochemical processes. ويُقدر عدد الفوتونات الضوئية اللازمة لتحرير جزيء واحد من الأكسجين (O_2) بنحو 8. ويحتاج إنتاج وزن جزيئي واحد من سكر الجلوكوز قرابة 48 فوتوناً ضوئياً. ويُلاحظ أنَّ قيمة كفاءة استعمال الضوء لعملية التمثيل الضوئي تساوي تقريباً 33.2%، وذلك وفق الآتي:

$$RUE\ ph = \frac{2874\ KJ\ \text{(كمية الطاقة الموجودة في مول واحد من الجلوكوز)}}{8642\ KJ\ \text{(كمية الطاقة الموجودة في 48 مول من الفوتونات الضوئية الممتصة ضمن المدى 400 - 700 نانومتر-1)}} = 33.2\ \%$$

وتقدّر قيمة كفاءة استعمال الضوء مخبرياً في الصانعَّات الخضراء المعزولة، ضمن الظروف البيئية المثلى، وعند مستوى التشبع من CO_2 بنحو 30% فقط، حيث يُفقد جزء من الطاقة خلال تفاعلات الضوء على شكل حرارة. ووجد ضمن الظروف المخبرية نفسها أنَّ كفاءة عملية التمثيل الضوئي الكلي Gross photosynthesis تقدَّر تقريباً بنحو 24% في أوراق الأنواع النباتية رباعية الكربون، وقرابة 14% في أوراق الأنواع النباتية ثلاثية الكربون. وتحت ظروف النمو الطبيعية (الحقل) فإنَّ كفاءة التمثيل الضوئي الكلي تقدّر بنحو 8-10% فقط، بسبب انخفاض CO_2 في الوسط المحيط. ولا تتجاوز قيمة كفاءة صافي التمثيل الضوئي أكثر من الثلث إلى الضعف، وذلك بعد طرح كمية الطاقة المفقودة بالتنفس. ويبين الجدول (19) نسبة الطاقة المفقودة من كامل كمية الإشعاع الضوئي خلال عملية التمثيل الضوئي في النبات (Beadte and Long, 1985).

الجدول رقم (19): نسبة الطاقة المفقودة من كامل الإشعاع الضوئي خلال عملية التمثيل الضوئي.

الطاقة المفقودة بسبب:	نسبة الفقد (%)
- الأشعة الضوئية التي تقع خارج مدى الأشعة الضوئية الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي (400- 700 نانومتر).	50
- الأشعة التي تنعكس Reflect أو تمر Transmit إلى الأرض.	10 - 5
- الأشعة الممتصة من قبل الأنسجة غير الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي (جدران الخلايا النباتية، والأصبغة غير اليخضورية).	2.5
الطاقة الضوئية الممتصة من قبل النظام الضوئي الأول والثاني (التسخين، والتوهج الضوئي).	8.7
عملية نقل الإلكترونات في سلسلة نقل ألكترونات، والعمليات الثانوية في تمثيل الكربون.	22 - 19
- التنفس الضوئي.	3 - 2.5
- التنفس الظلامي في النباتات ثلاثية الكربون.	4.3 - 3.7
- التنفس الظلامي في النباتات رباعية الكربون.	5.8 - 4.9

محتوى المادة الجافة من الطاقة The Energy Content of Dry Matter

تحتوي المادة الجافة الخالية تماماً من الرماد Ash-free dry matter كمية من الطاقة تقدَّر بين 15-35 كيلو جول لكل غرام، وحقيقة فإنَّ القيم الأكثر شيوعاً هي بين 19-20 كيلو جول لكل غرام. وبشكلٍ عام، كلما كان محتوى المادة من الكربون أعلى، ازداد محتواها من الطاقة. وإنَّ المادة العضوية ذات المحتوى العالي جداً من الكربون هي المواد الدهنية Lipids، والليغنين Lignin، وبعض نواتج الاستقلاب الثانوية، مثل Isoprenoids ومشتقاتها (الجدول، 20).

الجدول رقم (20): محتوى الطاقة في بعض نواتج الاستقلاب ومشتقاتها.

المادة الجافة	محتوى الطاقة ($KJ.g^{-1}$)
Oxalic acid	**2.9**
Glycine	**8.7**
Malic acid	**10.0**
Pyruvic acid	**13.2**
Glucose	**15.5**
Polyglucans	**17.6**
Proteins	**23.0**
Lignin	**26.4**
Lipids	**38.9**
Terpenes	**46.9**

تؤثر العوامل البيئية في محتوى الطاقة في النبات بشكلٍ غير مباشر. وتُحسب كفاءة استعمال الطاقة Energy Use Efficiency (EUE) من حاصل نسبة محتوى الطاقة في صافي الإنتاج السنوي من المادة الجافة إلى كمية الطاقة الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي المتاحة خلال الفترة نفسها. وإذا ما اعتمدنا مفهوم صافي الإنتاج الأساسي Net primary production، فإنَّ كفاءة الطاقة في الأنواع النباتية رباعية الكربون المزروعة تحت ظروف النمو الطبيعية تقدَّر بنحو 3% في الذرة الصفراء، وحتى 6% في *Panicum maximum*، وذلك عندما تكون الإنتاجية أعظمية. وتتراوح هذه القيم بالنسبة إلى الأنواع النباتية ثلاثية الكربون بين 1.5-2% (بالنسبة إلى البقوليات بشكلٍ رئيس)، وقرابة 2-4% بالنسبة إلى الحبوب، والمحاصيل الجذرية، والحشائش. ولا تتجاوز كفاءة استعمال الطاقة في النظم البيئية الغابيّة، لاسيما الغابات المطرية Rain forests تحت الظروف البيئية المثلى أكثر من 2%، وأقل من 1% بالنسبة إلى جميع الغابات الأخرى، والمجتمعات النباتية العشبية Grass communities. أما بالنسبة إلى المجتمعات النباتية غير المنتجة، مثل البوادي Steppes، والمناطق البيئية شبه الصحراوية، والسافانا Tundra، فإنَّ كفاءة استعمال الطاقة تتراوح بين 0.2 – 0.5%..

الفصل الخامس

العلاقات المائية في النبات

Plant Water Relations

نشأت الحياة وتطورت في الماء، ويُعَّد الماء الوسط الأساسي الذي تحدث فيه جميع العمليات الحيوية. وتتكون النباتات بشكلٍ رئيس من الماء. وتحتوي البرتوبلاسم بشكلٍ وسطي قرابة 85-90% ماء، وحتى المكونات الخلوية الغنية بالبروتينات والمواد الدهنية، مثل الصانعات الخضراء Chloroplasts، والميتوكوندرية تحتوي على قرابة 50% ماء. وعادةً ما يكون محتوى الثمار اللحمية Fleshy fruits من الماء عالياً جداً (85-95% من الوزن الرطب)، وكذلك الحال بالنسبة إلى الأوراق الطرية Soft leaves (80-90%)، والجذور (70-95%). وتحتوي الأخشاب المقطوعة حديثاً نحو 50% من الماء. وتعد البذور الناضجة Ripe seeds الجزء من النبات الذي يحتوي على أقل كمية من الماء (10-15%)، ويمكن أن تحتوي بعض البذور المخزنة للمواد الدهنية Fast-storing seeds فقط 5-7% ماء.

العلاقات المائية في الخلايا النباتية Water Relations of Plant Cell

أشكال الماء في الخلية النباتية Water Form in the Cell

يوجد الماء في الخلية النباتية بأشكال عديدة:

1. ماء ترطيب البروتوبلاسم Water of hydration: وهو الجزء من الماء المرتبط كيميائياً بالبروتوبلاسم، وهو مرتبط مع الشوارد المعدنية Ions، ويكون منْحلاً في المواد العضوية، والبروتينات والمواد الدهنية Macromolecules، مالئاً الفراغات الدقيقة ضمن أجزاء البروتوبلاسم، وجدران الخلية النباتية.
2. الماء الاحتياطي Reserve water: وهو الماء المخزون في الفجوات Vacuoles، و Vesicles.
3. الماء الناقل (الماء الوعائي) Interstitial water: وهو يُعد الوسط الناقل ضمن الفراغات بين الخلايا، وفي الأوعية الناقلة Conducting elements (الخشب واللحاء)، ويسمى أحياناً الماء الوعائي Vascular water.

ماء الترطيب Water of hydration: انطلاقاً من خاصية القطبية الثنائية Dipole، فإنَّ جزيئات الماء تتجمع على السطوح القطبية على شكل مجاميع Clusters. وإنَّ الشوارد المعدنية المشحونة بقوة، وذات حجم جزيئات الماء نفسه تربط جزيئات الماء بقوةٍ أكبر، وكلما كانت الشحنة أكبر وقطر العنصر أقل، كانت قدرتها على ربط جزيئات الماء أكبر. وترتبط جزيئات الماء بقوةٍ كبيرة على سطوح الشوارد المعدنية بفضل قوى الجذب الكهربائي الساكنة Electro-Static forces. وتلاحظ الحالة نفسها على سطوح البروتينات السكريات العديدة Polysaccharides. وتصبح جزيئات الماء مرتبطة مع المجموعات القطبية Polar groups (مثل مجموع الماءات Hydroxyl، والكاربوكسيلات Carboxyl، ومجموعات الأمين Amino groups) وتشكل طبقات عديدة من مجاميع المياه، وكلما كانت جزيئات الماء أكثر بعداً عن مركز المجموعة كانت أكثر قابلية للاستبدال. ويشكل ماء الترطيب قرابة 5-10% من إجمالي ماء الخلية النباتية، ولكن هذه الكمية من الماء مهمة جداً لحياة الخلية النباتية، ويسبب أي انخفاض مهما كان طفيفاً في ماء الترطيب تغييراً في تركيب البروتوبلاسم، يمكن أنْ يؤدي إلى موت الخلية النباتية. ويكون عظم ماء الترطيب مرتبطاً بالقوى الشعرية Capillary forces في البروتوبلاسم وجدران الخلية النباتية. وتمسك جدر الخلايا النباتية الماء بقوة جذب Tension تعادل 1.5-15 ميغا باسكال. وتُسمى القوى التي تمسك الماء إلى سطوح العناصر الداخلة في تركيب الخلية (جدر الخلية، والعزويات السيتوبلاسمية). اصطلاحاً جهد الحشوة Matrix Pressure.

الماء المُخزَّن Stored water: وهو الماء الموجود في المكتنفات الخلوية التي تؤدي دور الخزانات للمحاليل المائية Solutions، وهو الماء الذي يمكن أنْ ينقل بسهولة بالغة. وإنَّ أكثر من نصف كمية المياه الموجودة في الأوراق مخزونة بهذه الطريقة، ولكن حتى هذا الماء غير قابل للحركة بشكلٍ كامل، لأنه مرتبط حلولياً Osmotically bound ببعض المواد الذائبة، مثل السكريات Sugars، والأحماض العضوية Organic acids، ومواد النبات الثانوية، والشوارد المعدنية. ويزداد الجهد الحلولي Osmotic(Ψ_{π}) Pressure للمحلول بزيادة درجة الحرارة المطلقة Absolute temperature(T)، وتركيز الذائبات المنحلة Dissolved particles، عند درجة حرارة 25ْم، وإنَّ محلولاً مثالياً لنحو 1 Osmol. كغ$^{-1}$، يمتلك جهداً حلولياً يعادل 2.48 ميغا باسكال. ويمكن أن لا يؤدي تراكم بعض المركبات العضوية التوافقية بكمياتٍ كبيرة في السيتوبلاسم إلى رفع قيمة الجهد الحلولي، لأنّها لا تتشرد (تتأين)، وإنّما تذوب.

الجهد المائي في الخلية النباتية The water Potential of cells

يُعبَّر الجهد المائي عن الحالة الكيميائية للماء، ويُعبّر عن قوة العمل اللازمة لرفع الماء المرتبط إلى مستوى من الجهد للماء النقي الخالي تماماً من الذائبات. ويعبر عنه بكمية الطاقة في وحدة الكتلة من الماء ($J.m^{-3}$)، ويمكن أن تحول إلى جهد Potential من خلال العلاقة $1Mpa = 1MJ\ m^{-3}$. وعادةً ما يكون الماء في المحاصيل مرتبطاً بالذائبات (حلولياً)، ويصبح متاحاً فقط عندما تضاف الطاقة. وإنَّ الجهد الحلولي Osmotic potential(Ψ_π) في المحلول المحتوي على أية كمية من الذائبات، يكون أقل بالمقارنة مع الجهد الحلولي للماء النقي، وبما أنَّ الجهد المائي يعبر عن عدد جزيئات الماء الحرة في المحلول، فعادةً ما يكون عدد جزيئات الماء الحرة في الماء النقي 100%، وبالتالي تؤدي إضافة الذائبات، التي تعمل على "مسك" Holding جزيئات الماء إلى تقليل عدد جزيئات الماء الحر المتاحة، فتقل تبعاً لذلك قيمة الجهد الحلولي، والمائي، ويكون سالباً، لأنَّ قيمة الجهد المائي للماء المقطَّر تساوي الصفر. وإنَّ الماء المرتبط بالغرويات Colloids، والسطوح المحبة للماء Hydrophilic surfaces (جدر الخلايا النباتية)، يكون له جهداً سالباً، يُسمى جهد الحشوة Matric potential(Ψ_t). وعندما يوضع الماء تحت الضغط فإنَّ طاقته الحرة تزداد، ويصبح الجهد المائي موجباً بالمقارنة مع الماء غير المضغوط. ويُعبِّر عن إتاحة الماء Water availability من خلال قيمة فرق التدرج في الجهد المائي ($\Delta\Psi$) Water potential gradient بين النظام المائي سواءً كان في الخلية النباتية، أو مكونات الخلية النباتية، أو المحاليل الخارجية، والجهد المائي للماء النقي. وبشكلٍ عام، ينتقل الماء من الوسط ذي الجهد المائي العالي (الأقل سلباً) إلى الوسط ذي الجهد المائي المنخفض (الأكثر سلباً). بمعنى آخر، كلما كان الجهد المائي للمحلول أكثر سلباً، كانت كمية الماء الحر المتاح أقل، وهذا ما يفسر تراجع معدل امتصاص الماء من قبل المجموعة الجذرية تحت ظروف الجاف Drought، أو في المحاليل المتملحة Saline solutions.

التوازن الديناميكي للماء الخلوي The Dynamic Equilibrium of Cellular Water

يمكن تشبيه عملية انتقال الماء من وسط إلى آخر تماماً بعملية انتقال التيار الكهربائي ضمن النظام الكهربائي تبعاً لفرق التوتر من النقطة ذات التوتر العالي إلى النقطة ذات التوتر المنخفض. وينتقل بشكلٍ مماثل الماء، من الوسط ذي الجهد المائي العالي إلى الوسط ذي الجهد المائي المنخفض، ويُسمى ذلك بفرق الجهد Potential($\Delta\Psi$).

وعندما لا توجد عوائق لانتشار الماء حسب فرق التدرج في الجهد المائي difference ضمن مكونات الخلية النباتية، فسرعان ما تصل تلك المكونات إلى حالة التوازن المائي ضمن الخلية، وبين الخلايا النباتية، وبينها وبين الوسط المحيط. ويتوقف تدفق الماء من وسطٍ إلى آخر عندما يتساوى الجهد المائي في كلا الطرفين. ويؤدي وضع الخلايا النباتية ضمن وسط فقير ببخار الماء Water vapor deficit، أو ضمن أوساط ذات جهد مائي منخفض جداً Hypertonic medium (ماء البحر، أو ماء التربة المالح)، فسيؤدي ذلك إلى خروج الماء من الخلايا النباتية إلى الوسط المحيط، ما يؤدي إلى تراجع الجهد المائي داخل الخلايا النباتية، وانكماش البروتوبلاسم، وتراجع حجم الخلايا النباتية. وبشكلٍ معاكس، إذا كان الجهد المائي داخل الخلايا النباتية أكثر سلباً بالمقارنة مع الوسط المحيط، فسوف ينتقل الماء من الوسط المحيط إلى داخل الخلايا النباتية، فيزداد الجهد المائي داخلها، ويستمر تدفق الماء إلى حين وصول الجهد المائي إلى حالة الاتزان. عموماً، يمثل الجهد المائي للخلية النباتية (Ψ_{cell}). الفرق بين الجهد الحلولي ($\Psi_{л}$)، وجهد الامتلاء (Ψ_{p}).

$$\mathbf{\Psi_{cell} = (-)\ \Psi_{л} + (+)\ \Psi_{p}}$$

فعادةً ما يكون الجهد الحلولي سالباً، في حين تكون عادةً قيمة جهد الامتلاء موجبة، أو صفراً، ويمكن أنْ تكون سالبة في بعض الحالات الاستثنائية. وعندما تكون قيمة الجهد المائي للخلية النباتية سالبة، فهذا يعني أنَّ الخلايا النباتية تُعاني من إجهاد مائي Water tension (انخفاض الجهد المائي)، وبما أنَّ قوى الترطيب عادةً ما تكون فعَّالة داخل الخلايا النباتية، فيمكن أنْ تتضمن المعادلة السابقة جهد الحشوة (Ψ_{T})، الذي عادةً ما يكون سالباً.

$$\mathbf{\Psi_{cell} = (-)\ \Psi_{л} + (+)\ \Psi_{p} + (-)\ \Psi_{T}}$$

ولكن بما أنَّ قيمة جهد الحشوة عادةً ما تكون صغيرة جداً، وغير ذات قيمة Negligible، فعادةً ما يتم إسقاطها من المعادلة، وخاصةً في الأنواع النباتية الراقية. وعندما تكون الخلية مشبعة بالماء فسوف تنتبج البروتوبلاسم وتصل إلى أقصى حجم لها، وتمارس بذلك ضغطاً على جدران الخلية النباتية، ويُسمى هذا الضغط اصطلاحاً بضغط الامتلاء Turgor pressure، وعند هذه النقطة التي يتعادل فيها ضغط الامتلاء مع الجهد الحلولي لنسج الخلية، سوف يتوقف تدفق الماء إلى داخل الخلية النباتية، وتصبح قيمة الجهد المائي للخلية النباتي تساوي الصفر**($\Psi_{cell} = 0$).**

$$\Psi_{p} = 0 = \Psi_{л} = \Psi_{cell}$$

وتتوقف مقدرة الخلية النباتية على استيعاب الماء (C_{cell}) على مقدار التغير الحاصل في حجم الخلية النباتية $d\ V_{cell}$، وذلك عند تغير الجهد المائي للخلية النباتية بشكلٍ طفيف $d\ \Psi_{cell}$.

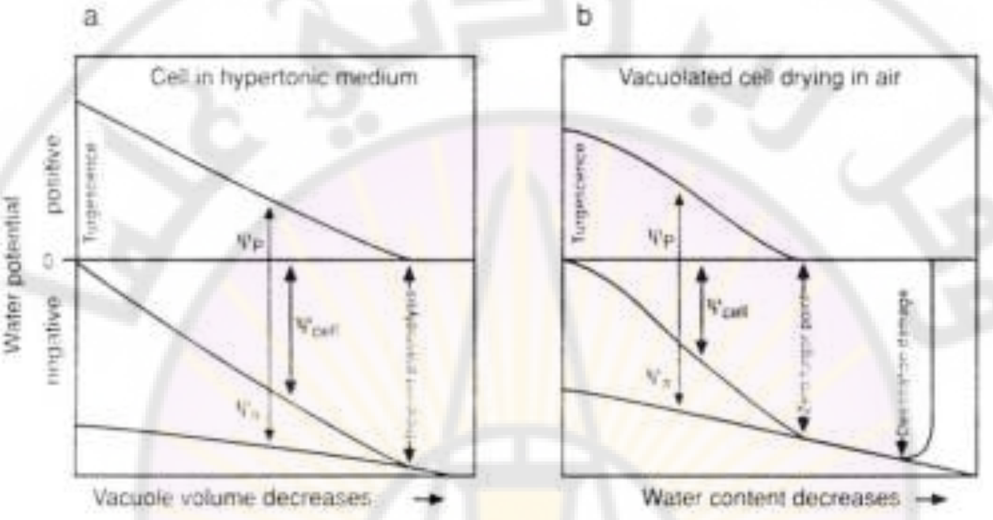
$$C_{cell} = \frac{d\ V_{cell}}{d\ \Psi_{cell}} \quad (m^3\ Mpa^{-1})$$

وتعتمد هذه الخاصية بشكلٍ رئيس على مدى مرونة جدران الخلايا النباتية Elasticity of cell wall، التي تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$\text{(مرونة جدران الخلية)}\ \varepsilon = \frac{d\ P}{d\ V/V} \quad (Mpa)$$

أي تمثل نسبة التغير في ضغط الامتلاء (dP) الذي يرتبط بالتغير النسبي في حجم الخلية النباتية. عموماً، تكون جدران الخلايا النباتية في أوراق الأنواع النباتية الحولية العشبية الطرية Herbaceous species أكبر، حيث يسبب ضغط الامتلاء تباعد جدر الخلية النباتية، ومن ثُمَّ زيادة حجم الخلية النباتية، وكلما كان التغير في حجم الخلية النباتية نسبياً أكبر، كانت جدران تلك الخلايا النباتية أكثر مرونة، ما يؤمن حيزاً إضافياً يمكن أن يُملأ بكمياتٍ إضافية من الماء، أي أنَّ مثل هذه الخلية يمكن أنْ تخزن كميات أكبر من الماء، تماماً مثل مبدأ البالونة. وفي مثل هذه الأنواع النباتية، يمكن أن تصل قيمة مرونة جدران الخلايا حتى 5 ميغا باسكال ($\varepsilon = 5M_{pa}$). أما بالنسبة إلى أوراق الأشجار والشجيرات، التي تكون عادةً أكثر صلابة More rigid، فيمكن أن تصل قيمة مرونة جدران الخلايا النباتية إلى قرابة 10-20 Mpa، أي تحتاج إلى ضغط امتلاء أكبر لدفع جدران الخلايا النباتية، هذا بالنسبة إلى أوراق الأشجار والشجيرات متساقطة الأوراق، ويمكن أن تصل حتى 30-50 Mpa في أوراق الأشجار والشجيرات دائمة الخضرة Evergreen leaves. ويؤدي بشكلٍ عام فقد الماء من الخلية النباتية إلى تراجع حجم الخلية النباتية Vacuolar volume، وازدياد تركيز الذائبات ضمن الخلية النباتية. ويتراجع تدريجياً الضغط المطبق من قبل الجدر الخلوية على البروتوبلاسم حتى ينخفض حجم الخلية النباتية إلى قيمة حرجة Threshold value، لا يمكن بعدها أنْ ينكمش الجدار الخلوي أكثر من ذلك (النقطة التي تصبح عندها قيمة ضغط الامتلاء مساوية للصفر). وإذا كانت الخلية النباتية ضمن وسط مائي، فيمكن أنْ تؤدي هذه الحالة إلى انفصال البروتوبلاسم عن

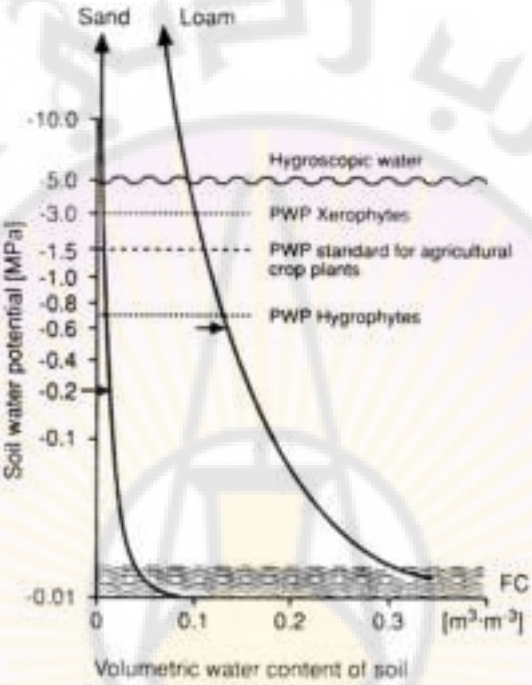
جدر الخلية، وتصبح الخلية النباتية متبلزمة Incipient plasmolysis (الشكل، 38a,b). وعندما تكون الخلية في مثل هذه الحالة $(\Psi_p = O : \Psi_{cell} = \Psi_\pi)$.



الشكل رقم (38): تراجع الجهد المائي في الخلايا النباتية المحتية على فجوات ضمن محلول ذي جهد مائي منخفض (a)، وفي الهواء الجاف (b).

مقدرة التربة على الاحتفاظ بالماء Water-holding capacity of the soil: إنَّ محتوى التربة المائي عند نقطة التشبع في الترب الزراعية الطبيعية، الذي يبقى في التربة بعد نفاد كامل ماء الجاذبية يُسمى السعة الحقلية Field capacity، ويعبر عنه غ ماء لكل 100 مل من حجم التربة. وعادةً ما يكون محتوى التربة المائي، ومن ثمَّ مقدرة التربة على الاحتفاظ بالماء أكبر في الترب الطينية، والترب ذات المحتوى العالي من الغرويات، والغنية بالمادة العضوية، بالمقارنة مع الترب الرملية الفقيرة بالطين والمواد العضوية. وتزداد السعة الحقلية وفق الترتيب الآتي: الرمل، الطمي، الطين، الدبال Humus. وعند هطول الأمطار لفترةٍ زمنيةٍ طويلة، ومباشرةً بعد ذوبان الثلوج في الربيع، فإنَّ بعض ماء الجاذبية يبقى لفترةٍ زمنية طويلة في طبقات التربة العلوية، ومن ثمَّ سيكون متاحاً للنباتات في منطقة انتشار الجذور، ويُسمى الماء المتاح Available gravitational water. وبشكلٍ عام، تكون كمية المياه المتاحة للنبات أكبر في الترب ذات المقدرة الأعلى على الاحتفاظ بالماء High water retention capacity، وخاصةً خلال فترات الجفاف

(انحباس الأمطار)، تحت ظروف الزراعة المطرية. ويبين الشكل (39) العلاقة بين الجهد المائي ومحتوى التربة المائي في كل من الترب الرملية والطمية.



الشكل رقم (39): العلاقة بين الجهد المائي في التربة والمحتوى المائي في الترب الرملية والطميية.

من المعروف أنَّ القيمة الحرجة التقليدية للجهد المائي Water potential عند السعة الحقلية هي - MPa 0.015، ولنقطة الذبول الدائم (PWP) 1.5- MPa، وعندما تنخفض قيمة الجهد المائي (تصبح أكثر سلباً) لتصل إلى قيمة 5- MPa، فهنا سيكون الماء مرتبط بقوة بجزيئات التربة، وغير متاح للنباتات Hygroscopic water، ولا يمكن أن ينمو عند هذا المستوى من محتوى التربة المائي أي نوع نباتي (Slavikova, 1965; Laatsch, 1954; Krames, 1949).

امتصاص الماء بواسطة الجذور Water uptake by Roots: تستطيع النباتات أنْ تستخلص الماء من التربة طالما أنَّ الجهد المائي في خلال الجذور أكثر سلباً بالمقارنة مع الجهد المائي في محلول التربة المحيط بالجذور. ويزداد معدل امتصاص الماء من التربة بازدياد حجم المجموعة الجذرية، ودرجة تشعبها (سطوح الامتصاص) -Water

absorbing surface، وكفاءة الجذور في استخلاص الماء من جزيئات التربة، ويعطى ذلك بالمعادلة الآتية:

$$Wabs. = A . \frac{\Psi_{soil} - \Psi_{root}}{\Sigma r}$$

يُلاحظ من المعادلة، أنَّ كمية المياه الممتصة من قبل الجذور خلال واحدة الزمن (معدل امتصاص الماء) (Wabs.) يتناسب طرداً مع مساحة التبادل المائي Exchange area (مساحة سطوح الامتصاص) في منطقة انتشار الجذور في قطاع التربة، ومع فرق الجهد المائي Water potential difference بين الجذور والتربة. وتتناسب عكساً مع مجموع المقاومات لحركة الماء Transfer resistances(Σr) ضمن التربة، وعند مرور الماء من التربة إلى داخل الجذور. ويمكن ان يختلف معدل امتصاص الماء بتقدم مراحل النمو، حيث تتغلظ Suberize الجذور القديمة، وتقل نسبة الجذور الفعَّالة في امتصاص الماء. عموماً، فإنَّ سطوح امتصاص الماء تزداد، بسبب استمرار النمو في نهايات الجذور.

تطور عادةً جذور النباتات جهداً مائياً سالباً، ولكنه أكثر سلباً بأجزاء من عشرة Few tenths ميغا باسكال بالمقارنة مع محلول التربة، وهذا عادةً ما يكون طفيفاً وغير كافٍ لامتصاص الجزء الأكبر من الماء الشعري من قطاع التربة، ولكن مع انخفاض الجهد المائي أكثر، ليصل إلى 0.2- MPa، فستكون الجذور قادرة على امتصاص أكثر من ثلثي الماء المخزون في التربة الرملية Sandy soils. وفي الترب اللومية Loamy soils، فلن تتجاوز كمية المياه المستخلصة ستكون أكثر من 50% من الماء الشعري، لأنَّ الماء عادةً يكون مرتبطاً بقوة أكبر بجزيئات التربة بسبب صغر أقطار الفراغات البينية، وذلك عندما يصل الجهد المائي في الجذور إلى 0.6- MPa. ويمكن لجذور بعض الأنواع النباتية الأخرى أن تخفض الجهد المائي داخل الجذور بشكلٍ أكبر من ذلك، ومن ثمَّ تكون قادرة على زيادة معدل امتصاص الماء،ومن ثمَّ كمية المياه الممتصة من قبل الجذور، أو تستمر بامتصاص الماء، حتى عند مستويات منخفضة جداً من محتوى التربة المائي، وذلك بفضل امتلاك المقدرة على التعديل الحلولي Osmotic adjustment. ويمكن للأنواع النباتية المتكيفة مع البيئات الرطبة Hygrophytes أنْ تخفض الجهد المائي داخل خلايا جذورها إلى 1.0- MPa، ونباتات الأنواع المحصولية المنتشرة في المناطق الرطبة حتى -1 إلى - 2.0 MPa، ونباتات الأنواع النباتية المنتشرة في البيئات شبه الرطبة Mesophytes حتى 4.0- MPa، وتستطيع الأنواع النباتية المتكيفة مع

البيئـات الجافـة Xerophytes إلـى أن تخفـض الجهـد المـائي إلـى قرابـة ‎-6.0 MPa‏، وبالمقابل يمكن لأشجار الغابات أنْ تخفض الجهد المائي في جذورها حتى‎-2.0 إلى ‎-4.0 MPa.

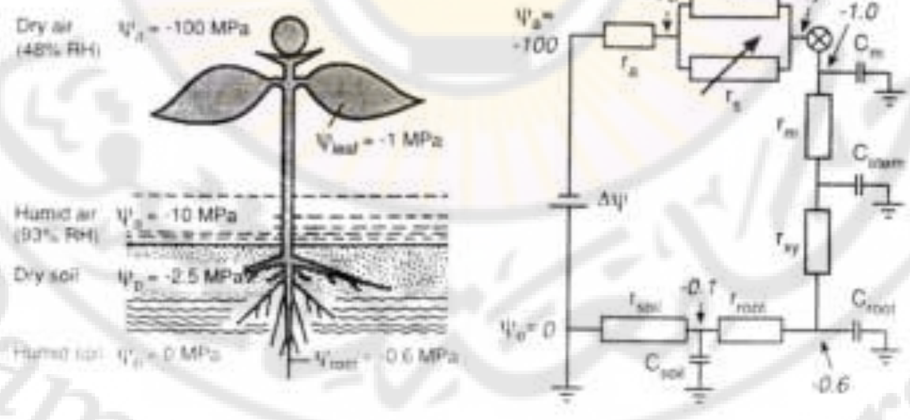
يختلف حجم المجموعة الجذرية، وطبيعة نموها وانتشارها، وتوزعها ضمن قطاع التربة باختلاف النوع النباتي، وخصائص التربة وعمق قطاع التربة. ولكن بشكلٍ عام، تنمو جذور النباتات بحثاً عن الماء، فعندما يتراجع محتوى التربة المائي، وتصبح التربة أكثر جفافاً، فإنَّ بعض أجزاء الجذور يمكن أنْ تموت، في حين تستمر أجزاء أخرى من الجذور في النمو والتشعب أفقياً وشاقولياً لبضع مترات، ما يساعد في إمكانية وصول الجذور إلى طبقات التربة العميقة الرطبة، ويُساعد بالمقابل زيادة درجة تشعب الجذور في زيادة نقاط التماس (سطوح الامتصاص) مع جزيئات التربة، الأمر الذي يُساعد في استخلاص كمية أكبر من الماء، وهذا يزيد من مقدرة النباتات على تحمل الجفاف لفترةٍ زمنية أطول. ويمكن أنْ يكون نمو الجذور وانتشارها محدوداً في الترب الضحلة Shallow، والترب المنضغطة Compacted soil، والترب الطينية الثقيلة المتغدقة، ويمكن أنْ يؤخر انخفاض درجة حرارة التربة من معدل نمو الجذور، الأمر الذي يؤدي إلى تشكيل مجموعة جذرية ضحلة وصغيرة غير قادرة على امتصاص الكمية اللازمة من المياه لتأمين احتياجات الأجزاء الهوائية المائية، أي لتعويض الماء المفقود بالنتح، والمحافظة على ميزان العلاقات المائية.

فرق التدرج في الجهد المائي بين النبات والتربة والوسط المحيط

Soil-Plant-Atmosphere Continuum

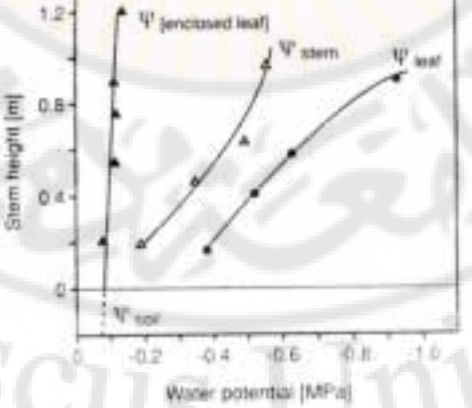
إنَّ فرق التدرج في الجهد المائي بين التربة والنبات والوسط هو القوة المحركة لانتقال الماء. يُلاحظ من الشكل (18) أنّه في الترب الرطبة، فإنَّ الجهد المائي لمحلول التربة يساوي صفراً، لأنَّ التربة مشبعة بالماء (Ψ_o = MPa 0)، في حين تكون قيمة الجهد المائي في الترب الجافة قرابة ‎-2.5 MPa ($\Psi_{outside}$ = -2.5 MPa). ويُلاحظ أنَّ الجهد المائي لخلايا الجذور، يعادل تحت ظروف النمو الطبيعية قرابة ‎-0.6 MPa (Ψ_{root} = -0.6 MPa)، وبالتالي سوف ينتقل الماء تبعاً للقاعدة الذهبية (فرق التدرج في الجهد المائي) من التربة، إلى داخل الجذور، ولكن عندما يتراجع محتوى التربة المائي، سوف ينخفض الجهد المائي في محلول التربة، وهنا يتوجب على النبات أن يخفض الجهد المائي في خلايا المجموعة الجذرية ليصبح أقل سلباً من الجهد المائي في التربة، حتى يتمكن من

الاســتمرار فــي امتصــاص المــاء بكميــةٍ تكفــي لتعــويض المــاء المفقــود بــالنتح Transpiration. وتحت ظروف النمو الطبيعية، عادةً ما يكون الجهد المائي في الأوراق أكثر سلباً من الساق، وفي الساق أكثر سلباً من الجذور، وتبعاً لذلك سوف ينتقل الماء من الجذور إلى الساق، فالأوراق، التي يكون الجهد المائي فيها قرابة (Ψ_{leaf} = -1 MPa). ويُلاحظ أنه عندما يكون الهواء المحيط بالأوراق رطباً (الرطوبة النسبية الجوية قرابة 93%)، فإنَّ الجهد المائي للوسط المحيط يعادل 10- ميغا باسكال، وبالتالي يمكن أن ينتقل الماء من الأوراق إلى الوسط المحيط، ولكن في الجو الجاف (Ψ_{air} = -100 MPa) (الرطوبة النسبية الجوية 48%)، فسوف يزداد فرق التدرج في الجهد المائي بشكلٍ كبير بالمقارنة مع ظروف النمو الطبيعية، ما يؤدي إلى زيادة معدل فقد الماء بالنتح، ويمكن أنْ تصبح كمية الماء المفقودة بالنتح أكبر من كمية المياه الممتصة عن طريق الجذور، ما لم يمتلك النبات المقدرة على التعديل الحلولي في خلايا الجذور لزيادة فرق التدرج في الجهد المائي بالمقارنة مع محلول التربة، لزيادة كمية المياه الممتصة، بحيث تكون كافية لتعويض الماء المنتوح، والمحافظة على ميزان العلاقات المائية (Kausch,1955). ولكن خلال تدفق الماء من التربة عبر النبات فالوسط المحيط (SPAC) فإنه يواجه سلسلة من المقاومات Resistances(r)، (الشكل، 40).



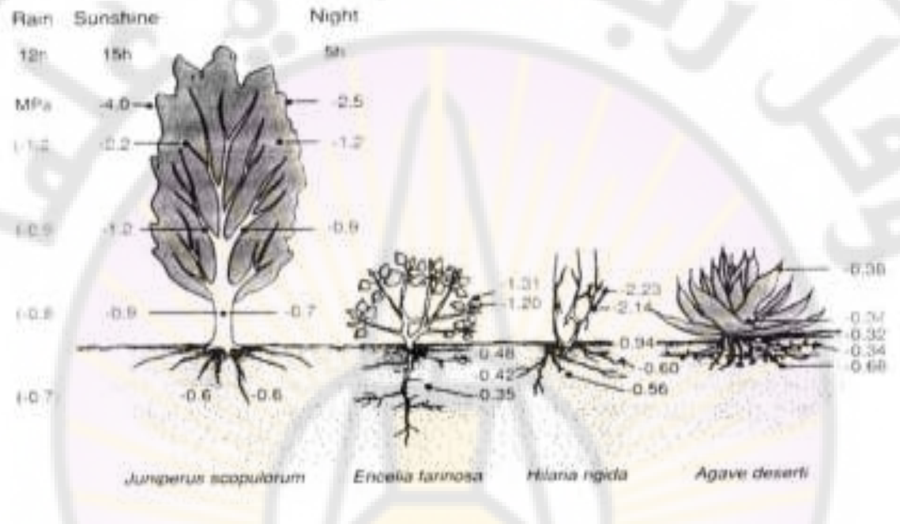
الشكل رقم (40): يبين فرق التدرج في الجهد المائي، والمقاوات التي تعيق نقل المياه من التربة إلى الجذور، فالساق فالأوراق.

يُلاحظ عندما تكون التربة مشبعة بالماء (Ψ_{out} = MPa 0)، فإنَّ مقاومة التربة لتدفق الماء إلى الجذور Soil resistance(r soil) عادةً ما تكون صغيرة جداً، تليها المقاومة لمرور الماء إلى داخل الجذور Transport resistance in roots (r_{root})، والمقاومة لانتقال الماء في خلايا الأوعية الخشبية في الجذور Xylem of roots(r_{xy})، والمقاومة لنقل الماء في الأوعية الخشبية لحوامل الأوراق Leaf petioles، والعروق Veins، ومن ثمَّ المقاومة لتدفق الماء ضمن خلايا النسج المتوسط في الأوراق Mesophyll(r_m) resistance. ثمَّ المقاومة للأدمة الخارجية Cuticular resistance (r_c) والمقاومة المسامية Stomatal resistance(r_s) (وهي متباينة حسب درجة انفتاح المسامات)، ثمَّ أخيراً مقاومة طبقة الهواء المحيطة بسطوح الأوراق Boundary layer(r_a) (الشكل، 40). وبشكلٍ عام، فإنَّ فرق التدرج في الجهد المائي بين التربة وأجزاء النبات المختلفة يزداد بازدياد معدل فقد الماء بالنتح (الشكل، 41). يُلاحظ من الشكل أنَّ معدل فقد الماء بالنتح من الأوراق المغلفة بأكياس من النايلون يكاد يكون معدوماً، لأنّ الوسط المحيط بالورقة يكون مشبع ببخار الماء، وبالتالي فإنَّ فرق التدرج في الجهد المائي محدود جداً. لذلك لا يُلاحظ انخفاض ملموس في جهد الأوراق المائي، في حين يُلاحظ حدوث تراجع ملحوظ في جهد الأوراق المائي في الأوراق غير المغلفة بأكياس النايلون، نتيجة زيادة معدل فقد الماء بالنتح، ويُلاحظ بشكلٍ عام، أنَّ الجهد المائي في الأوراق دائماً أقل (أكثر سلباً) بالمقارنة مع الساق، لأنَّ كمية الماء المنتوحة من الأوراق عادةً ما تكون أكبر من الساق، وهذا يضمن وجود فرق في التدرج في الجهد المائي، يسمح باستمرار تدفق الماء من الساق إلى الأوراق.



الشكل رقم (41): التباين الشاقولي في الجهد المائي في الأوراق والساق لنباتات التبغ.

ويُلاحظ من الشكل (42) أنَّ التدرج في الجهد المائي بين التربة وأجزاء النبات المختلفة (الجذور، والساق، والأوراق) والوسط المحيط، هو القوة المحركة لانتقال الماء من التربة إلى النبات فالوسط المحيط، وذلك عند أنواع نباتية مختلفة ثلاثية الكربون (*Encelia farinosa*)، ورباعية الكربون (*Hilaria rigidia*) (Nobel and Jordan,1983).



الشكل رقم (42): التدرج في الجهد المائي بين التربة وأجزاء النبات المختلفة في أنواع نباتية مختلفة.

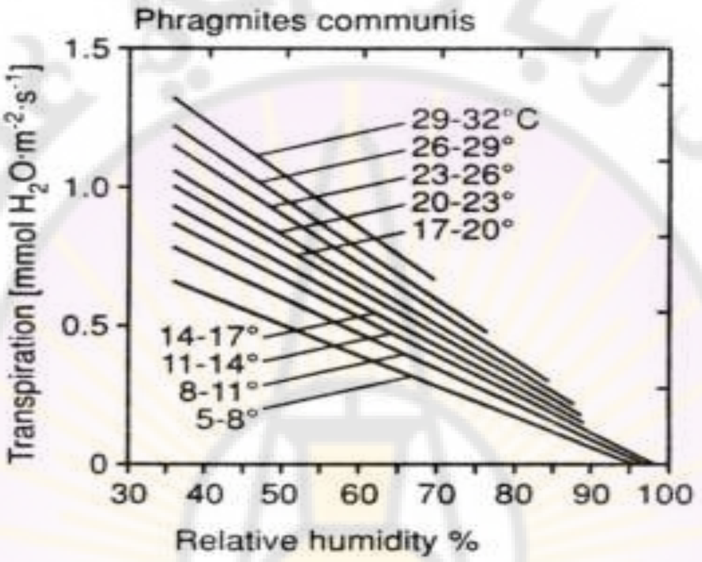
فقد الماء من النبات Water loss from Plants: تفقد النباتات الماء على هيئة بخار Vapor بواسطة عملية النتح، وأحياناً على هيئة ماء سائل، ولكن بكمياتٍ قليلة جداً، من خلال عملية الإدماع Guttation. وإنَّ مساهمة عملية الإدماع في ميزان الماء طفيفة جداً، وعادةً ما تُهمل، لذلك فإنَّ أية إشارة إلى عملية فقد الماء لاحقاً، إنما يُقصد بها النتح.

فقد المياه بالتبخر من السطوح الرطبة Evaporation from Moist surfaces:
ينشأ التدرج في ضغط بخار الماء، عندما يكون محتوى بخار في الهواء عند السطح القابل للتبخر أعلى من محتوى الهواء من بخار الماء على مسافة قريبة من سطح التبخير. ويحدث هذا عادةً عندما تكون شدة الإشعاع الشمسي عالية، وترتفع درجة حرارة سطح التربة مثلاً، ما يؤدي إلى زيادة فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين سطح التربة والوسط المحيط، فيزداد تبعاً لذلك معدل فقد الماء بالتبخر Evaporation. ويُسمى التبخر تحت ظروف توافر مصادر المياه، وفي حال عدم وجود أية عوامل معيقة لإزالة المياه بالتبخر، يسمى بالتبخر الكامن Potential (Ep) Evaporation. ويمكن أنْ يصل

التبخر الكامن في المناطق شبه المدارية الجافة حتى 10-15 مم . يوم$^{-1}$ (10-15 كغ H_2O . م$^{-2}$ من سطح الأرض . يوم$^{-1}$)، ويمكن أنْ يصل في المناطق ذات المناخ المتوسطي Mediterranean climate إلى قرابة 5-6 مم. يوم$^{-1}$ (5-6 كغ H_2O . م$^{-2}$. يوم$^{-1}$)، وفي المناطق الاستوائية Equatorial zone إلى قرابة 3-4 مم . يوم$^{-1}$. وفي المناطق المعتدلة Temperate zones، فيمكن أنْ يصل التبخر الكامن، خلال الأيام المشمسة الصافية السماء (بدون غيوم) خلال فصل الصيف، إلى 4 مم . يوم$^{-1}$، في حين أنَّ متوسط التبخر الكامن خلال كامل موسم النمو لا يتجاوز 2 مم. يوم$^{-1}$ خلال الصيف، ولا يتعدى 0.1-0.2 مم . يوم$^{-1}$ خلال فصل الشتاء. وإنَّ معدل فقد الماء بالتبخر المقاس (الحقيقي) Current evaporation من سطح التربة الرطب عادةً ما يكون أقل من التبخر الكامن، لأنَّ الماء لا يمكن أنْ يُعوض بالسرعة نفسها التي يفقد بها.

النتح كعملية فيزيائية Transpiration as a Physical Process: يتبخر الماء من النبات من كامل السطوح الخارجية التي توجد على تماسٍ مباشر مع الهواء، ومن كامل السطوح الداخلية التي تكون على تماسٍ غير مباشر مع الهواء. وفي النباتات الوعائية (الراقية) Vascular plants، فإنَّ النتح الخارجي External transpiration يحدث عن طريق خلايا الأدمة الخارجية Cutinized epidermis، ويُسمى Cuticular transpiration، ومن السطوح المتغلظة Suberized surfaces، يُسمى Peridermal transpiration. وضمن أعضاء النبات، فإنَّ الماء يتبخر من سطوح الخلايا الموجودة على تماس مباشر مع الفراغ الداخلي Intercellular air space، إذ يتحول أولاً الماء من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية، ثمَّ يفقد الماء على هيئة بخار ماء عن طريق المسامات Stomata، ويُسمى بالنتح المسامي Stomatal transpiration، ثمَّ ينتشر الماء، من سطوح أوراق النبات إلى طبقة الهواء الساكنة المحيطة بالأوراق Boundary air layer، ومنها إلى الوسط المحيط Open air، (Nobel,1999; Nultsch, 2001). ويتأثر معدل فقد الماء بالنتح بشكلٍ رئيس بالعوامل الخارجية، التي يمكن أنْ تغير حدَّة Steepness فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين سطوح النبات والهواء المحيط. وتبعاً لذلك، تزداد شدة فقد الماء بالنتح بازدياد درجة جفاف الهواء، وبارتفاع درجة حرارته (الشكل، 43). ويؤدي أيضاً ارتفاع درجة حرارة سطوح الأوراق نتيجة الإشعاع الشمسي القوي إلى زيادة فرق التدرج في ضغط بخار الماء، ومن ثمَّ زيادة معدل فقد الماء بالنتح، لذلك يمكن أنْ يحدث النتح حتى لو كان الهواء المحيط مشبع ببخار الماء، وذلك في حال حدوث التحميل الحراري الزائد للأوراق Heat aver loading. وهذا أمرٌ مهم لاستمرار عملية امتصاص الماء والعناصر المعدنية المغذية Minerals الداخلة مع تيار الماء، ولاسيما في البيئات الرطبة Humid regions. وتعمل الرياح أيضاً على

إزاحة طبقة الهواء المشبعة ببخار الماء حول سطوح الأوراق وتستبدلها بهواء جديد جاف نسبياً، الأمر الذي يُسهم في إحداث فرقٍ في ضغط بخار الماء، ومن ثمَّ زيادة معدل فقد الماء بالنتح.



الشكل رقم (43): معدل فقد الماء بالنتح بالعلاقة مع الرطوبة النسبية الجوية و الحرارة.

وعادةً ما تكون مقاومة طبقة الهواء المحيط مباشرة بسطوح الأوراق Air boundary (ra)Layer resistance كبيرة عندما تكون الرياح هادئة Calm air، وتزداد قيمتها حينئذٍ بازدياد المسطح الورقي، ولكن تضمحل الفروقات في قيمة مقاومة طبقة الهواء الساكنة المحيطة بالأوراق حتى باختلاف مساحة الورقة، بازدياد سرعة الرياح Wind velocity، وعندما تتجاوز سرعة الرياح 2.0 م . ثا$^{-1}$، تصبح هذه المقاومة غير ذات قيمة Negligible بالمقارنة مع المقاومة المسامية (r_s) (أقل من 0.5 ثا. سم$^{-1}$). عموماً، في حال وجود كثافة نباتية عالية، وعندما تكون تيجان الأشجار كثيفة، فعادةً ما يؤدي ذلك إلى تقليل سرعة الرياح، فتزداد سماكة طبقة الهواء الساكنة المحيط بسطوح الأوراق، فتزداد مقاومتها لحركة بخار الماء، وتصبح البيئة الدقيقة مشبعة ببخار الماء، فيقل فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط، ويتراجع معدل فقد الماء بالنتح.

النتح كعملية انتشار Transpiration as a Diffusion Process: تُسمى عملية فقد الماء بالنتح على هيئة بخار ماء عن طريق المسامات بعملية التبادل الغازي Gas exchange process، حيث يفقد بخار الماء من داخل الأوراق إلى الهواء المحيط بالانتشار Diffusion. ويتحدد تبعاً لذلك معدل النتح Transpiration rate بحاصل جداء فرق ضغط بخار الماء Vapour pressure difference (ΔH_2O) -. ويُعبر عنها بكمية الماء في وحدة الحجم: (غ. م$^{-3}$ أو مول. م$^{-3}$)، وسرعة انتقال بخار الماء Conductance of water vapor (gH_2O)، ويعبر عنها بواحدات السرعة سم . ثا$^{-1}$ أو ميلليمول .م$^{-2}$. ثا$^{-1}$):

$$J\,H_2O = gH_2O \times \Delta(H_2O)$$

وبما أنَّ الناقلية Conductance لبخار الماء، هي عكس المقاومة Resistance للانتشار (Seybold,1933). وعلى مستوى الأوراق فإنَّ مقاومة الانتشار لبخار الماء هي مجموع مقاومة طبقة الهواء الساكنة المحيطة بالأوراق (ra) ومقاومة الأدمة الداخلية للأوراق Epiderma leaf resistance. وتتكون مقاومة الأدمة الداخلية (r leaf) من المقاومة المسامية Stomatal resistance(rs) ومقاومة الأدمة الخارجية Cuticular (r cut.) resistance لبخار الماء:

$$\frac{1}{r_{leaf}} = \frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_{cut.}}$$

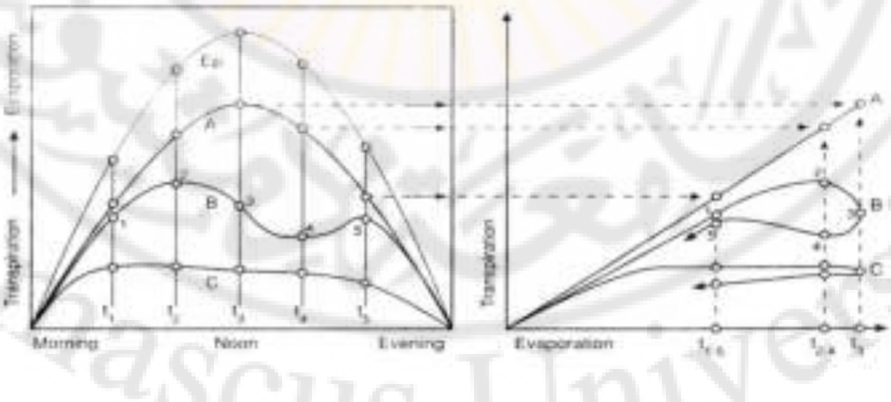
ومن هذه المعادلة يمكن أنْ نشتق المعادلة الخاصة بناقلية الأوراق لبخار الماء:

$$G_{cut.\,H_2O} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.(m\ mol\ m^{-2}\ s^{-1}) + g_{leaf\,H_2O} = g_s\,H_2O$$

وتزداد الناقلية لبخار الماء عبر الأوراق بازدياد درجة انفتاح المسامات (الناقلية المسامية g_s^{H2O}). وتتحدد الناقلية المسامية القصوى بالخصائص التشريحية Anatomical features، مثل الحجم Size، والتركيب Structure. عموماً، تبدي نباتات الأنواع المحصولية ناقلية أوراق عالية جداً (400-500 ميللي مول . م$^{-2}$. ثا$^{-1}$)، في حين تتراوح

القيم بالنسبة إلى الحشائش Grasses بين 200-350 ميللي مول . م$^{-2}$. ثا$^{-1}$. (وعادة ما تكون ناقلية الأوراق لبخار الماء في الأنواع الحولية العشبية أعلى في الأنواع النباتية رباعية الكربون بالمقارنة مع ثلاثية الكربون). وسُجلت أدنى قيمة لناقلية الأوراق لبخار الماء في الأنواع النباتية المتكيفة مع البيئات الجافة، والأوراق العصارية Succulent leaves. وتفقد عادةً الأزهار الماء بسرعةٍ أقل بكثير من الأوراق، لأنَّها عادةً تحتوي على عدد قليل جداً من المسامات، أو تغيب فيها المسامات كلياً، أو أنَّ المسامات فقدت وظيفتها.

ضبط النتح فسيولوجياً Physiological Control of Transpiration: إنَّ مقدرة النبات على التحكم بدرجة انفتاح المسامات (الناقلية المسامية) تمكنه من ضبط عملية فقد الماء بالنتح عن طريق المسامات، بما يضمن المحافظة على ميزان العلاقات المائية. وعادةً ما تقل الناقلية المسامية عند انخفاض الشدة الضوئية، أو عندما يصبح الهواء جافاً وحاراً، أو عندما تزداد سرعة الرياح بشكلٍ كبير، أو تحت ظروف العجز المائي، أو حال تعرض النباتات لإجهاد الحرارة المرتفعة، أو الغازات السامة. وتختلف استجابة المسامات للعوامل الخارجية، وسرعة انغلاق المسامات، ومدى فعَّالية ضبط الناقلية المسامية باختلاف النوع النباتي، ودرجة تكيف نباتاته مع ظروف الوسط المحيط Degree of adaptation. ويمكن قياس التبدلات الخاصة في الناقلية المسامية باستعمال جهاز لقياس الناقلية المسامية Steady state porometer. ويُلاحظ من الشكل (44) التباين اليومي في معدل فقد الماء بالنتح من قبل نبات مروي بشكلٍ جيد (A)، ومن قبل نبات يتعرض لإجهاد مائي خلال فترة الظهيرة (B)، ومن قبل نبات تحت ضبط مستمر لانفتاح المسامات (C) بالمقارنة مع فقد الماء بالتبخر الكامن Potential evaporation(EP).



الشكل رقم (44): التباين اليومي في معدل فقد الماء بالنتح.

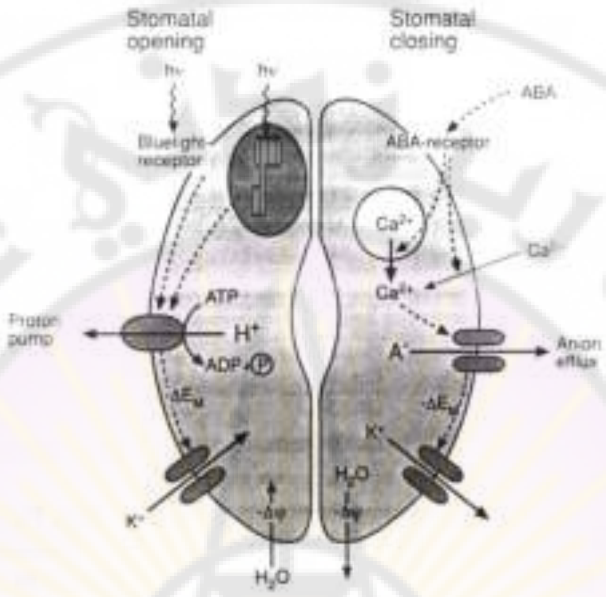
ويبين الشكل المجاور نسبة فقد الماء بالنتح إلى التبخر. وتختلف استجابة المسامات للتبدلات الحاصلة في العوامل الفيزيائية المحيطة باختلاف النوع النباتي، وحتى باختلاف الأصناف التابعة للنوع نفسه. وتختلف استجابة المسامات على مستوى النبات نفسه باختلاف عمر الورقة، والظروف البيئية السائدة خلال تطور كل ورقة، ومكان توضع الأوراق على الساق. وإنَّ حركة المسامات لا تحدد فقط معدل فقد الماء بالنتح، وإنما تحدد أيضاً معدل انتشار CO_2 من الوسط المحيط عبر المسامات وصولاً إلى مراكز التثبيت ضمن الصانعات الخضراء. تُسمى هذه العملية بعملية التبادل الغازي، لذلك يمكن القول: إنَّ إحدى الوظائف المهمة لعملية فقد الماء بالنتح، هي للحصول على غاز الفحم (CO_2) الضروري لتصنيع السكريات بعملية التمثيل الضوئي، وعادةً ما تكون كمية الماء المفقودة خلال واحدة الزمن أكبر بكثير من كمية الكربون المنتشرة، لذلك يمكن القول مجازاً إنَّ النباتات عموماً تفقد المياه كضريبة للحصول على CO_2. وإنَّ عدد المسامات في وحدة المساحة الورقية، وتوزيعها، وحجمها، وطبيعة حركتها (الانفتاح والانغلاق) تختلف باختلاف النوع النباتي. علماً أنَّ هذه الخصائص للنوع نفسه يمكن أن تختلف باختلاف العوامل البيئية السائدة في المنطقة التي ينتشر فيها النوع النباتي نفسه. ويمكن أن تتباين هذه الخصائص بين النباتات المذكرة والنباتات المؤنثة في الأنواع النباتية الخنثى Dioecious species، فمثلاً المسامات على أوراق الأشجار المؤنثة للنوع *Acer negundo* عادةً ما تكون أكثر كثافة في وحدة المساحة الورقية، وأكثر حساسية لجفاف التربة والهواء بالمقارنة مع المسامات على أوراق الأشجار المذكرة من النوع النباتي نفسه. ويُسمى الجزء من المسطح الورقي الذي يكون الانتشار الغازي عبر المسامات من خلاله ممكناً بمساحات الثغر Pore area. ويمكن حسابها من خلال معرفة الكثافة المسامية Pore density (عدد المسامات في مم^2 من مساحة الورقة) مضروباً بالعرض الأعظمي للفتحة المسامية Maximal pore width. وتقدر في معظم الأنواع النباتية بنحو 0.5-1.2% من مساحة الورقة، بالرغم من أنها يمكن أنْ تصل حتى 3% في أوراق الأشجار الغابات المدارية. وعادةً ما تكون صغيرة جداً في الأوراق العصارية، وأوراق الأنواع النباتية المتكيفة مع البيئات الجافة.

الآلية الفسيولوجية لحركة الخلايا الحارسة

The Physiological Mechanism of Guard Cell Movement

إنَّ انفتاح المسامات وانغلاقها يتحدد باختلاف ضغط الامتلاء بين الخلايا الحارسة والخلايا المرافقة المجاورة Subsidiary cells. وعندما يصبح جهد الامتلاء داخل

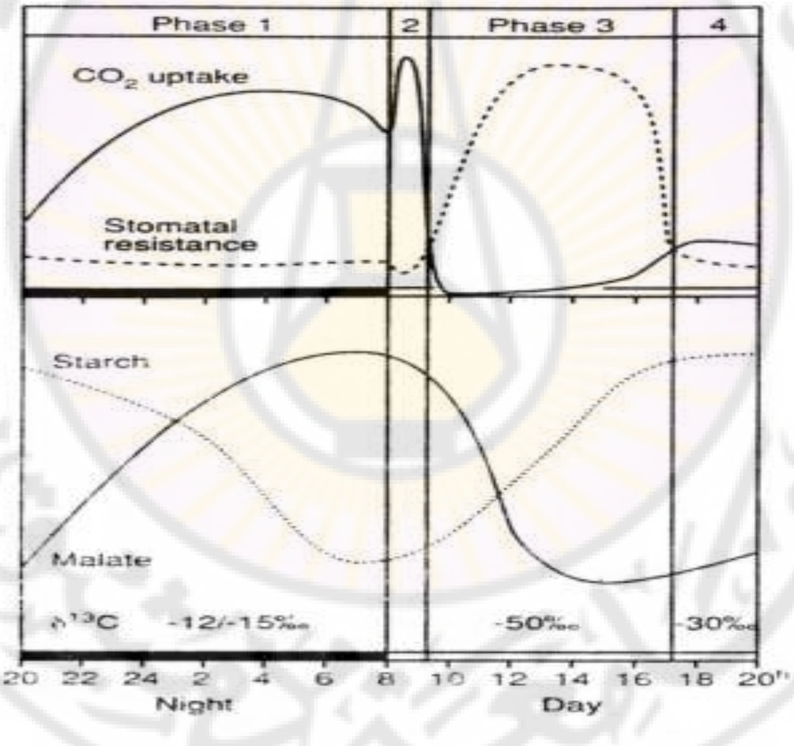
الخلايا الحارسة أكبر من الخلايا المجاورة فسوف تنفتح المسامات، وعندما يتراجع ضغط الامتلاء سوف تنغلق. عموماً، خلال النهار وتحت ظروف النمو الطبيعية (إتاحة الماء والحرارة الملائمة) فسوف تنفتح قنوات دخول الشوارد المعدنية Influx channels المرتبطة بغشاء الخلايا الحارسة Tonoplast، فينتقل البوتاسيوم من الخلايا المجاورة إلى داخل الخلايا الحارسة، فيزداد تبعاً لذلك الجهد الحلولي (يصبح أكثر سلباً)، ويتراجع الجهد المائي (يصبح أكثر سلباً) داخل الخلايا الحارسة، فيزداد فرق التدرج في الجهد المائي بين الخلايا الحارسة والخلايا المجاورة، فينتقل الماء من الخلايا المجاورة إلى الخلايا الحارسة، فيزداد جهد الامتلاء Turgor potential، الذي يضغط على جدران الخلايا الحارسة الخارجية، ما يؤدي إلى انفتاح المسامات Stomatal opening. وبشكلٍ عام، فإنَّ السيتوكينين Cytokinins من الهرمونات التي تشجع انفتاح المسامات، في حين يشجع حمض الأبسيسيك (ABA) انغلاق المسامات، حيث يؤدي تعرض النباتات للإجهاد المائي أو الملحي Salt stress، فسوف يزداد معدل تصنيع حمض الأبسيسيك في الجذور، وينتقل مع تيار الماء إلى الأوراق، ويُسمى حمض الأبسيسيك هنا مجازاً بالإشارة الكيميائية Root to shoot chemical signal، ويساعد ABA بالإضافة إلى ارتفاع تركيز شوارد الكالسيوم (Ca^{+2}) في السيتوبلاسم، في انغلاق قنوات دخول الشوارد، وفتح قنوات خروج الشوارد Efflux channels فتخرج العديد من الشوارد المعدنية الموجبة (K^+) من الخلايا الحارسة إلى الخلايا المجاورة، ما يؤدي إلى ارتفاع تركيز الذائبات في الخلايا المجاورة، ويصبح الجهد المائي أكثر سلباً بالمقارنة مع الجهد المائي في الخلايا الحارسة، فينتقل الماء من الخلايا الحارسة إلى الخلايا المجاورة فيتراجع ضغط الامتلاء داخل الخلايا الحارسة، ويقل الضغط المطبق على جدران الخلايا الحارسة الخارجية، وتنغلق المسامات Stomatal closure (الشكل، 45). ويُلاحظ من الشكل أنَّ انفتاح المسامات خلال النهار يتم بفعل الإشارة الضوئية Light signal التي تصل إلى الأصبغة اليخضورية ومستقبلات الضوء الأزرق Blue light receptors المرتبطة بأغشية الخلايا الحارسة السيتوبلاسمية، فتشجع بدورها Activate مضخات الهيدروجين Proton pumps (فتعمل على طرد شوارد الهيدروجين H^+ إلى خارج الخلايا الحارسة)، وهذا بدوره يقلل من جهد الغشاء ($-\Delta Em$)، وهذا يشجع قنوات دخول شوارد البوتاسيوم K^+ influx channel. وفي الوقت نفسه فإنَّ CO_2 الداخلي سوف يُصنع إلى مالات Malate، وتؤدي دور العنصر المرافق للبوتاسيوم، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة تركيز الذائبات في الخلايا الحارسة، ومن ثمَّ انخفاض الجهد المائي (Schopfer and Brennicke, 1999).



الشكل رقم (45): الآلية الفسيولوجية لحركة المسامات.

ضبط حركة المسامات Control of stomatal Movement: عندما يرتفع تركيز غاز الفحم CO_2 partial procure في الوسط المحيط، أو عندما يقل فرق التدرج في تركيز CO_2 الداخلي والوسط المحيط، فيمكن أنْ تتراجع الناقلية المسامية، وعندما يقل تركيز غاز الفحم الداخلي فسوف تنفتح المسامات مرة أخرى. وخلال النهار سوف ينخفض تركيز CO_2 الداخلي بسبب استهلاكه بعملية التمثيل الضوئي، ما يؤدي إلى انفتاح المسامات، ويعد هذا التأثير للضوء في انفتاح المسامات تأثيراً غير مباشر، وهناك تأثير مباشر (Blue light receptors). ويتجلى تأثير تركيز CO_2 في انفتاح المسامات وانغلاقها بشكلٍ واضح في نباتات CAM، حيث تكون مساماتها مفتوحة خلال الليل، وعندما ينخفض تركيز CO_2 الداخلي بسبب التصنيع المكثف للمالات Intensive malate formation، وتغلق المسامات خلال النهار، عندما يتحرر CO_2 نتيجة تحلل المالات، وتحرير CO_2 الذي يتراكم في الفراغ الداخلي قبل أنْ يستعمل في عملية التمثيل الضوئي، ما يؤدي إلى انغلاق المسامات (الشكل، 46). ويتمثل دور الماء في حركة المسامات خلال فترات شح المياه Water deficiency (الترب الجافة، والهواء الجاف)، حيث يؤدي ذلك إلى زيادة معدل تصنيع حمض الأبسيسيك (ABA)، الذي يثبط إمكانية

التعديل الحلولي Osmoregulation داخل الخلايا الحارسة، الأمر الذي يؤدي إلى تقليل درجة انفتاح المسامات، ويمكن أنْ تنغلق المسامات بشكلٍ كامل عند المستويات المتطرفة من الجفاف. عموماً، يؤدي الانغلاق التام للمسامات Complete Stomatal closure إلى توقف عملية فقد الماء بالنتح، ما يؤدي إلى تعطيل التأثير المبرد Cooling effect لعملية النتح، ما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الأوراق تدريجياً، وحدوث التحميل الحراري الزائد، الذي يؤدي بدوره إلى احتراق الأوراق Leaf firing، والشيخوخة المبكرة للأوراق، ما يؤثر سلباً في حجم المسطح الورقي الأخضر الفعّال في عملية التمثيل الضوئي. ويُلخص الجدول الآتي العوامل المؤثرة في انفتاح المسامات في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون ورباعية الكربون.



الشكل رقم (46): حركة المسامات، وامتصاص غاز الفحم، وتخزين النشاء في نباتات CAM.

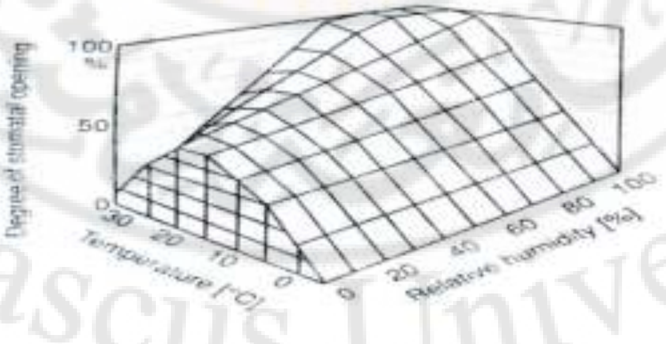
ويلخص الجدول (21) العوامل المؤثرة في انفتاح المسامات في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون ورباعية الكربون.

الجدول رقم (21): العوامل المؤثرة في انفتاح المسامات في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون ورباعية الكربون.

العامل الخارجي	التغيير الحاصل	الاستجابة (الزيادة في درجة انفتاح المسامات)
الأشعة الضوئية الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي (PhAR)	ازدياد	تزداد الناقلية المسامية حتى الوصول إلى نقطة التشبع الضوئي لعملية التمثيل الضوئي.
الحرارة	الازدياد وصولاً إلى درجة الحرارة المثلى لعملية التمثيل الضوئي.	بين 15-35ْم
الرطوبة النسبية الجوية	تزداد	أعلى من 95% RH
تركيز غاز CO_2	ينخفض تركيز CO_2 الداخلي	أقل من 30 باسكال Pa
الملوثات الجوية	تنخفض	فقط عند المستويات المتدنية جداً

المصدر: Milburn, 1979

ويبين الشكل (47) تأثير العوامل الخارجية (الحرارة، والرطوبة النسبية الجوية في درجة انفتاح المساحات في أوراق النوع *Ligustrnm japonicum* تحت الظروف البيئية المتحكم بها (Wilson, 1948).

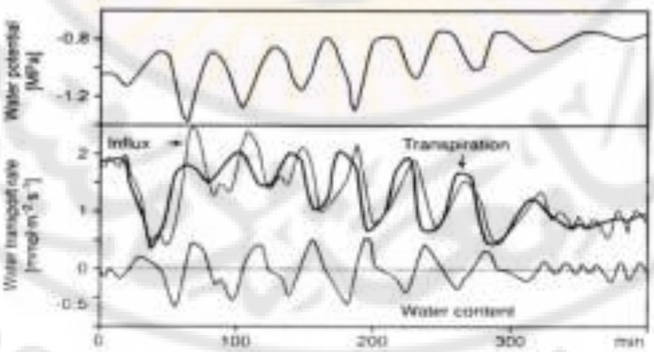


الشكل رقم (47): تأثير الحرارة، والرطوبة النسبية الجيوية في درجة انفتاح المسامات.

يُلاحظ أنَّ انفتاح المسامات (الناقلية المسامية) يزداد بازدياد درجة الحرارة (وصولاً إلى درجة الحرارة المثلى لعملية التمثيل الضوئي) وبازدياد الرطوبة النسبية الجوية.

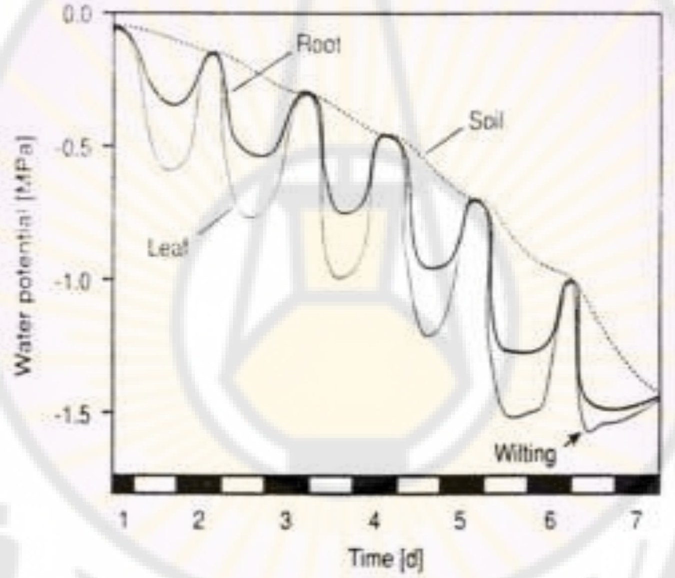
ميزان الماء في النبات The water Balance of a plant

ميزان الماء: اتزان ديناميكي: إنَّ العمليات الأساسية المحددة للميزان المائي في النبات هي امتصاص الماء Water uptake، ونقل الماء Water Conduction، وفقد الماء Water loss. ويمكن للنبات أنْ يحافظ على الميزان المائي إذا ما كان هناك توازن بين تلك العمليات الثلاثة. ويُعرف الميزان المائي Water balance: بأنّه الفرق بين كمية المياه الممتصة عن طريق المجموعة الجذرية وكمية المياه المفقودة بالنتح عن طريق المسامات. وتُعبّر قيمة هذا الفرق عن مقدار الانحراف الحاصل في الميزان المائي. ويصبح الميزان المائي سالباً عندما تكون كمية المياه الممتصة غير كافية لتعويض الماء المفقود بالنتح. ويمكن استعادة التوازن المائي في هذه الحالة، إذا ما تمكن النبات من تقليل الناقلية المسامية، ومن ثمَّ معدل فقد الماء بالنتح، ويصبح الميزان المائي موجباً خلال فترة زمنية تختلف باختلاف سرعة استجابة النبات لظروف العجز المائي. يُلاحظ مما سبق، أنَّ الميزان المائي في النبات يتأرجح بين القيم السالبة والموجبة، ولكن من المهم جداً أنْ نميز بين التأرجح القصير المدى، والاختلال طويل المدى Long-term disturbances لهذا التوازن الديناميكي. إنَّ التذبذب قصير المدى يعكس تفاعل الآليات المختلفة المنظمة للحالة المائية في النبات، وخاصةً التبدلات في الناقلية المسامية Stomatal aperture (الشكل، 48).



الشكل رقم (48): التذبذبات قصيرة الأمد في تدفق الماء، والمحتوى المائي، والجهد المائي، ومعدل النتح في أوراق نبات القطن.

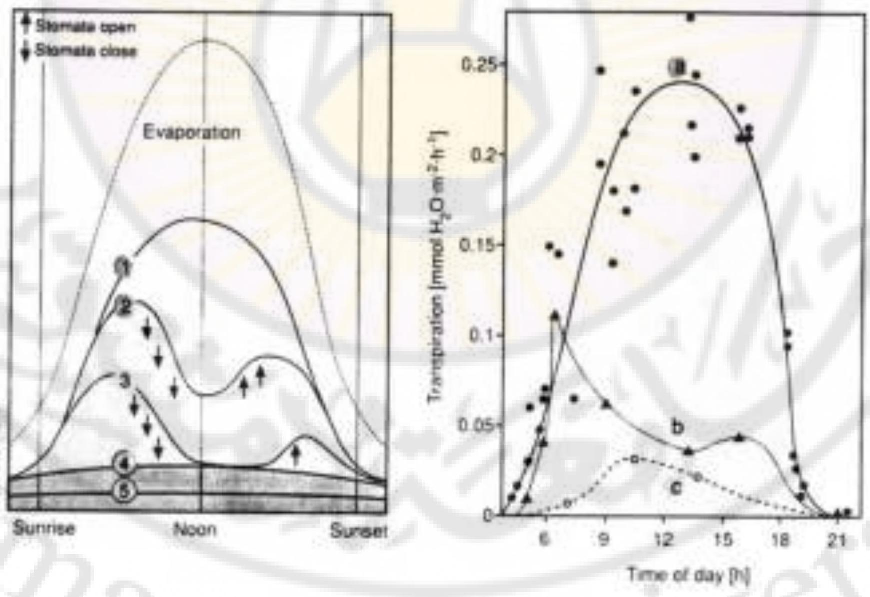
يُلاحظ من الشكل، أنّه خلال المراحل التي يكون فيها معدل فقد الماء بالنتح عالياً، ينخفض محتوى الأوراق المائي، ويصبح الجهد المائي أكثر سلباً. وهذا التأرجح في معدل فقد الماء بالنتح يعكس حالة التباين في درجة انفتاح المسامات. وعادةً ما يكون الميزان المائي خلال النهار سالباً، وتزداد حدة العجز المائي ضمن الخلايا النباتية بتقدم ساعات النهار، وصولاً إلى فترة منتصف النهارNoon time، ويستعيد النبات توازنه المائي خلال المساء، وخاصةً في حال توافر كمية كافية من المياه في التربة، بسبب تراجع الناقلية المسامية، فتصبح كمية المياه الممتصة كافية لتعويض الماء المفقود بالنتح Transpiraion (الشكل، 49).



الشكل رقم (49): الانخفاض التدريجي للجهد المائي في الأوراق، والجذور، والتربة خلال أسبوع من الجفاف.

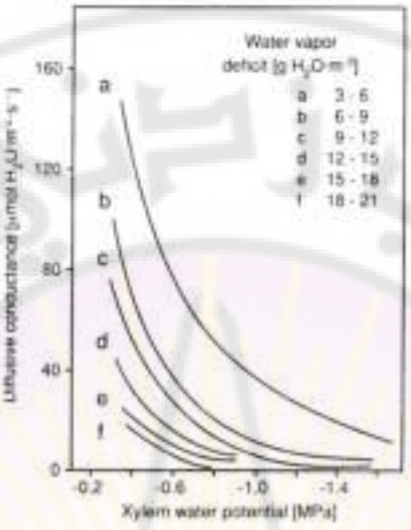
يُلاحظ من الشكل التراجع التدريجي في الجهد المائي للأوراق، والجذور، والتربة نتيجة تعرض النباتات للجفاف لمدة أسبوع كامل (سبعة أيام). ويحدث التذبذب الأكبر اليومي في الجهد المائي في الأوراق، لأنها معّرضة بشكلٍ مباشر للوسط المحيط، ومن ثمَّ يكون معدل فقد الماء بالنتح من الأوراق أعظمياً. ويُلاحظ أن النباتات لا تستعيد كامل اتزانها المائي خلال الليل، لذلك فإنَّ قيم الجهد المائي المقاسة فجراً تصبح أقل يوماً بعد يوم (Slatyer, 1967).

المحافظة على ميزان مائي موجب: الآليات التنظيمية: في المناطق الرطبة Humid regions، فإنَّ النباتات التي يتدهور فيها الميزان المائي، تبنت إستراتيجية لتقليل استهلاك الماء، من خلال تقليل درجة الناقلية المسامية، ومدة انفتاح المسامات خلال النهار. ويُساعد انغلاق المسامات خلال النهار ولاسيما عند الاقتراب من فترة الظهيرة في زيادة المقاومة المسامية لتدفق الماء عبر المسامات، فيقل معدل فقد الماء بالنتح، وإذا كانت شدة الإشعاع الشمسي عالية جداً، والحرارة مرتفعة بشكلٍ كبير فيمكن أن تنغلق المسامات بشكلٍ كامل، وتبقى المسامات مفتوحة حتى خلال مدة ما بعد الظهيرة، وطول مدة الليل، وتنفتح المسامات فقط في الصباح. وتساعد مثل هذه الآلية في حماية النباتات من التأثيرات الضارة الناتجة عن ظروف العجز المائي، حيث يساعد انغلاق المسامات في المحافظة على الحد الأدنى من الماء اللازم لترطيب البروتوبلاسم، ومنع تخريبها (الشكل، 50، اليسار). ويبين الشكل (50، اليمين) التبدل في معدل فقد الماء بالنتح لدى بادرات النوع *Pinns radiate* بعمر سنتين، تحت ظروف أتاحة المياه (المنحني a) وبعد 9 أيام من إيقاف الري (b). وبعد 12 يوماً من عدم الري (C) (Kaufman,1977).



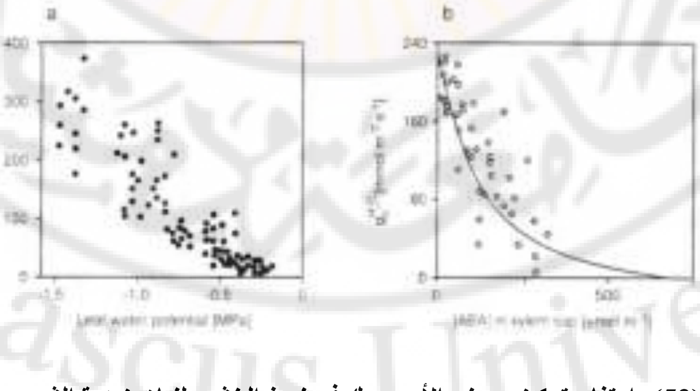
الشكل رقم (50): التغيرات في النتح مع التغير في محتوى التربة المائي (اليسار)، والتبدل في معدل فقد الماء بالنتح لدى بادرات النوع *Pinns radiate* بعمر سنتين (اليمين).

أما نباتات المناطق الجافة Arid regions فعادةً ما تستجيب لظروف تراجع محتوى التربة المائي، بتشكيل مجموع جذري متعمق، قادر على الوصول إلى طبقات التربة العميقة الرطبة، أو تمتلك أنسجة خازنة للمياه Water-storing tissues، لذلك لا تحتاج عادةً للحد من فقد الماء بالنتح طالما أنَّ لديها المقدرة على تعويض الماء المفقود بالنتح، ويمكن أنْ يستمر فيها انفتاح المسامات لفترةٍ زمنية أطول، الأمر الذي يُساعد في استمرار انتشار غاز الفحم، وزيادة كمية CO_2 المتاحة ضمن مراكز التثبيت ضمن الصانعات الخضراء CO_2-fixation sites، ما يؤدي إلى استمرار عملية التمثيل الضوئي، وتصنيع المادة الجافة وتراكمها. ولكن إذا ما استمر الجفاف لعدة أسابيع، وتراجع مخزون التربة المائي بشكلٍ، فسوف تضطر النباتات إلى تقليل الناقلية المسامية تدريجياً للحد من فقد الماء بالنتح، أو من خلال فتح المسامات لفتراتٍ زمنية قصيرة خلال النهار. عموماً، يُعد انغلاق المسامات بمنزلة خط الدفاع الفسيولوجي الأول في النبات للحد من معدل فقد الماء بالنتح، بهدف تقليل استهلاك المياه المتوافرة بكمياتٍ محدودة في التربة، والمحافظة ميزان العلاقات المائية داخل الخلايا النباتية الضروري لاستمرار سير العديد من العمليات الفسيولوجية والبيوكيميائية المرتبطة بحالة الامتلاء Turgor-dependent process، في حين تُعد المقدرة على تشكيل مجموع جذري متعمق ومتشعب بمنزلة خط الدفاع المورفولوجي الأول في النبات، الذي يُقلل من حساسية النباتية للجفاف. وتصنف الأنواع النباتية التي تعتمد على تقليل الناقلية المسامية، وغلق المسامات بهدف تقليل النتح، كأنواع مدَّخرة للماء Water reservers، في حين تُسمى الأنواع التي تمتلك المقدرة على تشكيل مجموع جذري متعمق ومتشعب بمنفقات الماء Water spenders. وتُعد الثانية أكثر أهمية من الأولى من وجهة نظر إنتاجية في النظم البيئية الزراعية، في حين تُعد الثانية أكثر أهمية من الأولى في النظم البيئية الطبيعية للمحافظة على البقاء Survival. وتحت ظروف العجز المائي Water deficiency. فإنَّ انغلاق المسامات يحدث نتيجة مجموعة من العوامل، تتمثل بازدياد عجز بخار الماء Water vapor deficit، وتراجع جهد الامتلاء داخل الخلايا الحارسة (الشكل، 51). يُلاحظ من الشكل أنَّ ازدياد عجز بخار الماء في الغلاف الجوي (a→f) يترافق مع تراجع جهد الامتلاء في الأوعية الناقلة الخشبية Xylen، الأمر الذي يؤدي إلى تراجع المسامية في الأوراق الإبرية لدى النوع النباتي Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) (Lassoie et al., 1985).



الشكل رقم (51): تراجع الناقلية المسامية في أوراق بادرات النوع Douglas fir الإبرية نتيجة تراجع الجهد المائي في الأوعية الخشبية.

ويـؤدي أيضـاً تعَّـرض النباتـات للجفـاف إلـى زيـادة معـدل تصـنيع حمـض الأبسيسـيك Abscisic acid (ABA) في الجذور، وينتقل مع تيار الماء ضمن الأوعيـة الخشـبية إلـى الأوراق ليحث المسـامات علـى الانغلاق (الشكل، 52)، حيـث يُلاحـظ مـن الشـكلين ازديـاد تركيـز حمـض الأبسيسـيك فـي النسـخ النـاقص Xylem sap لنباتـات زهـرة الشـمس Sunflower مـع انخفـاض الجهـد المـائي فـي الأوراق (يصـبح أكثـر سـلباً)، ويُلاحـظ أنَّ الناقلية المسامية تتناسب عكساً مع تركيز حمض الأبسيسيك.



الشكل رقم (52): ارتفاع تركيز حمض الأبسيسيك في نسغ الخشب لنبات زهرة الشمس Sunflower نتيجة جفاف التربة (a)، وتراجع الناقلية المسامية (b).

مؤشرات الميزان المائي في النبات Indicators of Plant Water Balance:
يمكن حساب الميزان المائي من خلال إجراء قياس كمي Quantitative measure لكلٍ من كمية المياه الممتصة عن طريق المجموعة الجذرية، وكمية المياه المفقودة بالنتح. ولكن من الصعب جداً قياس كمية المياه الممتصة عن طريق الجذور تحت ظروف الزراعة الحقلية، لذلك من الأسهل أنْ نقيس الميزان المائي السالب Negative water Balance، من خلال قياس مقدار الانخفاض في محتوى الماء Water content، والجهد المائي Water potential. ويمكن قياس التدهور الحاصل في ميزان النبات المائي من خلال التقدير المستمر لمحتوى الأوراق المائي، أو المحتوى المائي لأجزاء أخرى من المجموعة الهوائية. ويمكن قياس محتوى الماء الفعلي في الأوراق Actual water content($W_{act.}$) في وقتٍ معين بالعلاقة مع محتوى الماء القياسي Standard water Content(w_{sat}) المسجل تحت ظروف الإشباع المائي. ويسمى هذا اصطلاحاً محتوى الماء النسبي Relative water content (RWC%)، وكان يُسمى بقابلية الترطيب Hydrability (Ochi,1952)، ويعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$(\%)\ \mathbf{RWC} = \frac{\mathbf{Wact.}}{\mathbf{Wsat.}}$$

ويُحسب المحتوى الفعلي في الأوراق من خلال طرح الوزن الجاف للأوراق (Dwt.) من الوزن الرطب (Fwt.)، في حين يُحسب المحتوى المائي عند التشبع من خلال طرح الوزن الجاف للأوراق من الوزن الرطب المشبع (Sat.wt.)، وتكتب المعادلة السابقة على النحو الآتي:

$$\text{محتوى الماء النسبي في الأوراق}(\%) = \frac{\text{الوزن الرطب} - \text{الوزن الجاف}}{\text{الوزن الرطب المشبع} - \text{الوزن الجاف}} \times 100$$

ويمكن قياس عجز الإشباع المائي Water Saturation Deficit (WSD) الذي يُعبر عن مقدار نقص الماء في الأنسجة النباتية بالمقارنة مع محتواها المائي عند التشبع (Stocker,1929: Iljin,1923). وفق المعادلة الرياضية الآتية:

$$(\%)\ WSD = \frac{Wsat. - Wact.}{Wsat.} \times 100$$

$$\text{عجز الإشباع المائي (\%)} = \frac{\text{الوزن الرطب المشبع – الوزن الرطب}}{\text{الوزن الرطب المشبع – الوزن الجاف}} \times 100$$

(عن العودة، 1995).

ويمكن أنْ يُعّبر عن محتوى الأوراق المائي، بمفهوم محتوى الماء المطلق (AWC%) Absolute water content (عن العودة،1995)، ويعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{محتوى الماء المطلق (\%)} = \frac{\text{الوزن الرطب – الوزن الجاف}}{\text{الوزن الجاف}} \times 100$$

إنَّ التبدلات في محتوى الماء النسبي في الأوراق تؤثر بشكلٍ دائم في تركيز الذائبات في الخلية النباتية، ومن ثمَّ جهد الامتلاء، ويمكن أنْ يؤثر ذلك بدوره في معدل نمو الأنسجة النباتية، لأنَّ ضغط الامتلاء يُعد بمنزلة القوة الفيزيائية التي تدفع جدر الخلايا النباتية على الاستطالة، لذلك يؤدي تعرض النباتات إلى ظروف الإجهاد المائي إلى تراجع معدل استطالة الأوراق ونموها، ما يؤثر سلباً في حجم المسطح الورقي الأخضر الفعَّال في عملية التمثيل الضوئي، لذلك تُعد عملية المحافظة على ميزان العلاقات المائية داخل الخلايا النباتية من الصفات الفسيولوجية المهمة المرتبطة بالتحمل.

العلاقات المائية في الأنواع النباتية المختلفة Water Relations in Different Plant Types: اعتماداً إلى طبيعة استجابة الأنواع النباتية المختلفة للظروف البيئية المتاحة في المواطن البيئية المنتشرة فيها، يمكن تقسيمها إلى نوعين، هما:

1. **الأنواع النباتية المستقرة مائياً Hydrostable:** وهي الأنواع النباتية التي تتمكن نباتاتها من المحافظة على ميزان مائي مناسب، نتيجة حساسية مساماتها المفرطة لنقص الماء في التربة، وامتلاكها مجاميع جذرية متعمقة ومتشعبة Extensive، وفعَّالة في امتصاص كمية من الماء كافية باستمرار لتعويض الماء

المفقود بالنتح. وعادةً ما تكون التبدلات اليومية والفصلية في الجهد الحلولي والجهد المائي في أنسجة مثل هذه النباتات ضيقة جداً ومحدودة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أنْ تمتلك هذه النباتات مدخرات مائية إضافية مخزونة في الأعضاء الخازنة Storage organs، والجذور، وفي الخشب Wood، والقلف Bark في أفرع الأشجار وجذوعها، تُعد بمنزلة عناصر داعمة Capacitive elements تُسهم في التعديل الداخلي للميزان المائي. وتتضمن الأنواع المائية Aquatic species، والأنواع العصارية Succulents، والأنواع المتكيفة مع البيئات الرطبة جداً Sciophytes، والأشجار المنتشرة في المناطق الرطبة Humid regions (Prado et al., 2000).

2. **الأنواع النباتية غير المستقرة مائياً Hydrolabile plants:** تتعرض هذه النباتات إلى خطر فقد كمياتٍ كبيرة جداً من المياه، وارتفاع ملموس في تركيز الذائبات في الخلايا النباتية، ومن ثمَّ انخفاض كبير في الجهد المائي (يصبح أكثر سلباً). وتستطيع نباتات مثل هذه الأنواع أنْ تتحمل تقلبات كبيرة في الجهد المائي (أنواع حقيقية التحمل للجفاف وتتحمل كذلك الذبول المؤقت. وعادةً ما تتمكن النباتات من استعادة توازنها المائي بشكلٍ سريع بعد تعرّضها إلى مستوياتٍ شديدة من الجفاف، حيث تمتلك نسبة عالية من الجذور إلى الأجزاء الهوائية Root/shoot ratio، وأنظمة نقل للماء فعَّالة جداً، ويشمل العديد من النباتات العشبية Herbs المنتشرة في البيئات المشمسة، والحوليات العشبية في البوادي، والنباتات الخشبية Woody plants. وتعد أيضاً الأشنيات Mossos، والحزازيات Lichens من الأنواع غير المستقرة مائياً بشكلٍ كبير (الجدول، 22).

الجدول رقم (22): الجهد المائي الأدنى (Mpa) للأعضاء التمثيلية في مجموعات نباتية مختلفة بيئياً.

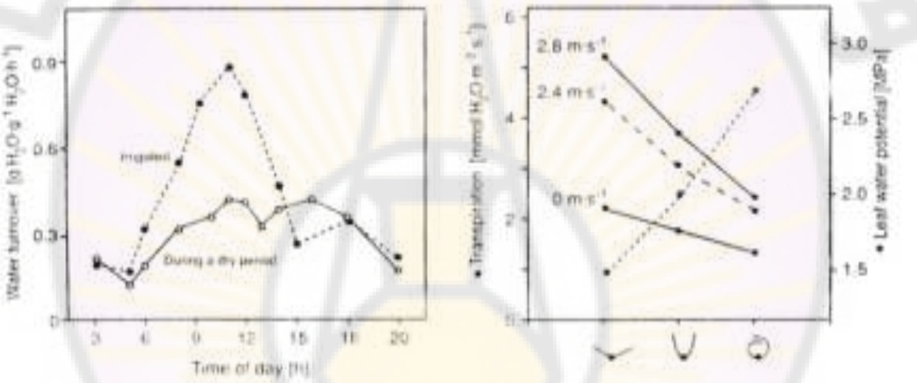
المجموعة النباتية	الجهد المائي الأدنى Ψmin
النباتات المائية	-1.2
الأنواع النباتية الحولية العشبية المتكيفة مع البيئات الرطبة.	-1.5 — -2.5
الأشجار في الغابات المطرية المدارية.	-1.5 to -4
النباتات الخشبية للمناطق ذات البيئات المعتدلة	-1.5 to -2
(الأشجار والشجيرات متساقطة الأوراق) ▪ المخروطيات Conifers ▪ الأشجار في البيئات شبه الرطبة ▪ الشجيرات في البيئات المتوسطة	-1.5 to -2.5 -3.5 to -8.5 -4 to -8
الشجيرات الصحراوية	-5 to -8(-16)
الأنواع العصارية	-0.8 to -2
المانغرف Mangroves	-5 to -6
الأنواع النباتية المتكيفة مع البيئات المتملحة Halophytes	-3 to -6(-9)

المصدر: Borchert, 1994 ؛ Prado et al., 2000

الأهميـة الوظيفيـة للميـزان المـائي Functional Importance of Water Balance: عندما تكون المياه متاحة بكميـاتٍ وافرة، تعمد الأنـواع النباتيـة المتكيفيـة مع البيئات الرطبة Mesophytes بفقد الماء بـالنتح خـلال كامل فترة النهـار بـدون أي عامل محدِّد، بمعدل يتحدد بفرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط (قوة التبخر) Evaporative power. وهذا النوع من النتح المفرط الذي يشكل نوعـاً من هدر المـاء Wasteful transpiration، يحدث فقط في نباتـات الأنـواع النباتيـة القـادرة على

امتصاص كمياتٍ كبيرة من المياه كافية بشكلٍ مستمر لتعويض الماء المفقود بالنتح، نتيجة امتلاكها مجموعاً جذرياً متعمقاً ومتشعباً، ولديها المقدرة على نقل المياه الممتصة بسرعة كبيرة إلى الأوراق لمنع حدوث العجز المائي ضمن خلايا الأوراق، أو في الأنواع التي تتحمل مستويات عالية جداً من الجفاف. وإنَّ لعملية فقد الماء بالنتح بشكلٍ مستمر أهمية بالغة في تنظيم درجة حرارة الأجزاء الهوائية، لما لعملية فقد المياه بالنتح من تأثير مُبّرد Cooling effect. وتبعاً لذلك، فإنَّ الأنواع النباتية التي تمتلك مثل هذه المقدرة الوظيفية (النتح المستمر) عادةً ما تنتشر في المواقع المكشوفة والحارة Open and hot sites، مثل المنحدرات المعرَّضة للإشعاع الشمسي المباشر والقوي. ويوجد أنواع أخرى تقل فيها الناقلية المسامية مع بداية الإجهاد المائي خلال فترة منتصف النهار، ثمَّ تزداد الناقلية المسامية من جديد بعد انقضاء مدة الظهيرة، إذا ما كانت النباتات قادرة على استعادة التوازن المائي من خلال امتصاص كمية من الماء كافية لتعويض الماء المفقود بالنتح. ومن الأمثلة على هذه الأنواع النباتية، النوع النباتي *Petasites amplus*، الذي يمتلك أوراقاً ضخمة وأجزاء هوائية متفرعة بشكلٍ كبير، وكذلك النوع المسمى *Fallopia schalinensis*، يمكن أن تنتج كمية من المياه تُقَّدر بنحو 5-9 ليتراً يومياً للنبات الواحد، ومع ذلك تحافظ الأوراق على محتوى مائي يعادل 90-94% من الوزن الرطب، ولا تجف التربة إلى مستوىً كبير، ولكن بالرغم من التنظيم المسامي الجيد فيمكن أنْ يصل مستوى العجز المائي في الأوراق إلى نحو 20%، ويمكن أنْ تذبل الأوراق بشكلٍ مؤقت. أما بالنسبة إلى الأنواع النباتية المتكيفية مع الظل، المنتشرة في الطوابق السفلية من الغابة Hygrophytes، التي يكون فيها الهواء رطباً، فهي تستجيب للتغيرات المستمرة في الإضاءة المتقطعة الواصلة إليها Passing sun flecks، من حركة متذبذبة بشكلٍ قوي للمسامات. ويمكن أنْ يتباين النتح خلال فترة زمنية قصيرة جداً بنحو 3-5 أضعاف. وهذه الأنواع النباتية غير قادرة على تحمل التعرض المباشر لأشعة الشمس لفترةٍ طويلة، لأنّها حتى في حال الانغلاق التام للمسامات، فإنّها تستمر بفقد كميات كبيرة من الماء بشكلٍ مباشر من **الأدمة** الخارجية Cuticular transpiration. ولا تمتلك مجموعاً جذرياً متطوراً بشكلٍ جيد، والأنظمة الناقلة للماء من الجذور إلى الأوراق غير كافية لضمان وصول كميات كافية من الماء إلى الأوراق لتعويض الماء المفقود بالنتح، والحيلولة دون حدوث العجز المائي. أما بالنسبة إلى الأنواع النباتية المنتشرة في النظم البيئية الحرجة، مثل البوادي Spring geophytes، فعادةً ما تكمل نباتات هذه الأنواع دورة حياتها قبل جفاف التربة بشكلٍ كامل، وهي من الأنواع النباتية المستقرة مائياً، وذات معدلات متدنية جداً من فقد الماء بالنتح، وعادةً ما تبدي الأوراق تبدلات طفيفة جداً في محتواها المائي.

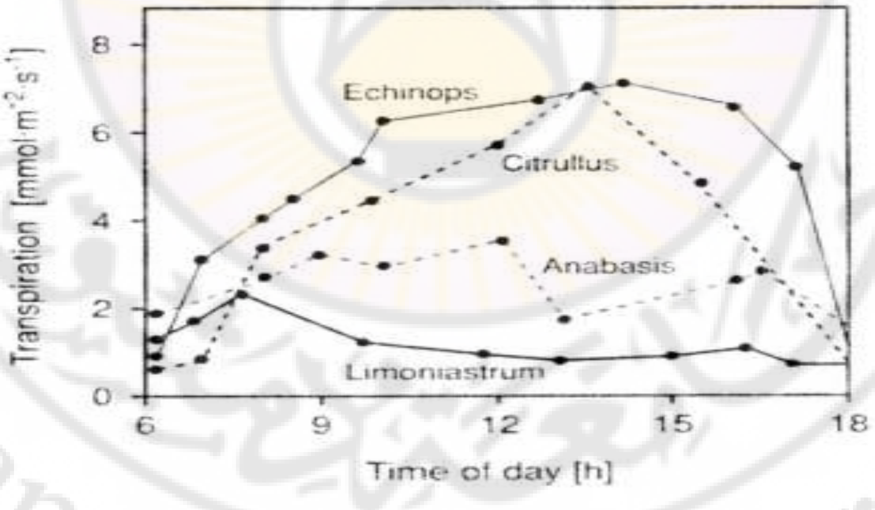
وتعمد النباتات عندما يصل الإجهاد المائي إلى مستويات شديدة Severe drought إلى التخلص من أوراقها لتقليل المسطح الورقي القابل للنتح، والمحافظة بسهولة على الميزان المائي (الشكل، 53). يُلاحظ من الشكل معدل فقد الماء اليومي لدى نباتات النوع الحولي *Stipa joannis* المنتشر في البادية خلال الفترة الجافة من شهر تموز July بالمقارنة مع معدلات النتح في النباتات المروية (Rychnovaska,1965). ويبين الشكل (53، اليمين) تأثير التفاف الأوراق لنبات الرز في معدل فقد الماء بالنتح تحت ظروف الهواء الساكن، وعندما تتعرض النباتات إلى سرعات رياح تقدّر بنحو 2.4 م . ثا$^{-1}$، و2.8 م . ثا- (Hsiao et al., 1984)[1].



الشكل رقم (53): التغير في معدل النتح على مدار اليوم خلال الفترة الجافة من شهر تموز July بالمقارنة مع معدلات النتح في النباتات المروية (اليسار)، تأثير التفاف الأوراق لنبات الرز في معدل فقد الماء بالنتح تحت ظروف الهواء الساكن.

يُشير الشكل (53، اليمين) إلى حقيقة أنَّ العديد من الأنواع النباتية الحولية يمكن أنْ تقلل من مساحة المسطح الورقي المعرّض بشكلٍ مباشر لأشعة الشمس، ومن ثمَّ تقليل معدل فقد المياه بالنتح من خلال صفة التفاف الأوراق Leaf rolling استجابة لظروف الجفاف. وعندما تشيخ الأوراق، الذي يحدث في السافانا Savanna مع بداية الموسم الجاف، تصبح المسامات قاسية Rigid، وتفقد النباتات مقدرتها على التحكم بحركة المسامات، وضبط الميزان المائي، لذلك تبقى المسامات مفتوحة، وتستمر بفقد الماء بالنتح إلى أن تصل إلى حالة متقدمة من العجز المائي، فتجف الأوراق وتموت بالنسبة إلى الأنواع الحولية الصحراوية Ephemerals، فهي لا تستطيع أن تضبط حركة المسامات، وتستمر بعملية فقد الماء بالنتح إلى أن ينفد محتوى التربة المائي، وتجف النباتات وتموت.

وعادةً ما تنتهي مثل هذه الأنواع النباتية دورة حياتها بشكلٍ مبكر (نضج قسري)، وتشكل عدداً قليلاً من البذور للحفاظ على النوع النباتي من الانقراض. أما الأنواع النباتية المعمرة Perennials، فتعتمد على آليتين متعاقبتين: فخلال فصل الربيع عندما تكون التربة رطبة فهي تتصرف مثل الأنواع غير المستقرة مائياً Hydrolabile، في حين تتصرف خلال فصل الصيف الجاف والحار مثل الأنواع المستقرة مائياً Hydrostable، وبذلك تتجنب خطر التعرُّض للجفاف، من خلال تقليل معدل فقد الماء بالنتح بشكلٍ كبير. وخلال الموسم المطري (خلال الشتاء والربيع) تحصل النباتات على الماء عن طريق لمجموع الجذري، الذي يمتد عدة أمتار أفقياً وعمودياً، وصولاً إلى طبقات التربة العميقة الرطبة. ولا يشكل الهواء الجاف مشكلة لهذه النباتات طالما أنَّ التربة قادرة على مدّ النباتات بكمياتٍ كافية من المياه، ولكن خلال هذا الوقت من السنة فعادةً ما يقلل النباتات معدل فقد الماء بالتبخر بشكلٍ قليل، من خلال تقليل الناقلية المسامية، وهذا يُسهم في تقليل معدل فقد الماء بالنتح دون أنْ يؤثر سلباً في معدل التمثيل الضوئي (الشكل، 54). يبين الشكل معدل فقد الماء بالنتح Transpiration rate لدى بعض الأنواع النباتية المنتشرة في الصحراء الجنوبية في الجزائر، عند بداية الموسم الجاف.



الشكل رقم (54): معدل فقد الماء بالنتح Transpiration rate لدى بعض الأنواع النباتية المنتشرة في الصحراء الجنوبية في الجزائر، عند بداية الموسم الجاف.

ويبين الجدول الآتي معدل النتح اليومي خلال موسم الأمطار والموسم الجاف، ونسبة الانخفاض في معدل النتح لدى بعض الأنواع النباتية الصحراوية.

معدل النتح اليومي الكلي			
النوع النباتي	**الموسم الماطر**	**الموسم الجاف**	**نسبة الانخفاض(%)**
الأنواع النباتية الصحراوية في شمال أفريقيا			
a spinosa	**240**	**150**	**62**
Zygophyllun Coccineum	**165**	**80**	**48**
Haloxylon persicum	**280**	**100**	**36**
Artemisia herb-alba	**(6)**	**(106)**	**27**
الأنواع النباتية المحبة للملوحة الصحراوية في ولاية Utah الأمريكية			
(C4) *Atriplex confertifolia*	**155**	**30**	**19**
(C3) *Certatoides lanata*	**154**	**2.2**	**1.4**
الأنواع الشوكية في صحراء كاليفورنيا			
Ferocactus acanthodes	**17**	**0.35**	**2**

المصدر: Nobel1977.

وبالنسبة إلى القيم بدون أقواس، فإنَّ معدل فقد الماء بالنتح يقَّدر بالواحدة $mol\ H_2O\ m^{-2}.day^{-1}$، أما القيم ضمن أقواس، فتقدر معدل النتح بالواحدة $gH_2O.\ g^{-1}$ Frah weight. عموماً، خلال فصل الصيف والحار، تُعد صفة الأمان والمحافظة على الحياة Safety أكثر أهمية من الإنتاجية Productivity، لذلك تبقى المسامات مغلقة خلال كامل هذه الفترة، بالإضافة إلى آليات التكيف الأخرى، مثل زيادة سماكة الكيوتين على خلايا الأدمة Cutinized epidermis، وتشكل الترسبات الشمعية Wax layers، وتصبح المسامات غائرة Sunken stomata، وتلتف الأوراق Rolling of leaves. تُسهم كل هذه التكيفات في تحسين المقدرة التكيفية لنباتات هذه الأنواع، ما يساعدها على تجنب خطر التعرض للتجفاف الشديد، بالرغم من الحرارة المرتفعة والجو الجاف.

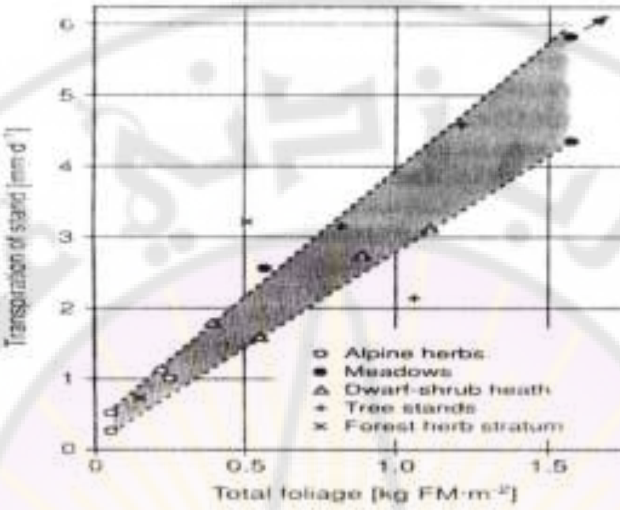
العلاقـات المائيـة فـي المجتمعـات النباتيـة Water Relations in Plant Communities

علاقة الميزان المائي The Water Balance Equation: إذا فرضنا جدلاً، وبهدف التبسيط أنَّ المصـدر الوحيد هـو ميـاه الأمطـار Precipitation، ولا يوجـد مصـدر آخـر للمياه، فإنَّ كمية المياه الممتصة Water intake (متوسط الهطول المطري الكلي Pr)، تتحدد بكمية المياه المفقودة من النبات والتربة Evapo-transpiration (L_{ET}). وكمية المياه المفقودة بالجريان السطحي والصرف العميق (L_{RP})Surface run-off and percolation. وخلال مدة زمنية قصيرة فإنَّ كمية المياه المخزنة في النظام البيئي يمكن أنْ تزداد (ΔW +)، أو تنقص (ΔW -)، حيث تكون أحياناً كمية الأمطار الهاطلة أكبر من كمية المياه المفقودة بالتبخر- نتح، والجريان السطحي والصرف العميق، أو يمكن أنْ يكون نتيجة هطول كمية من الأمطار قليلة وغير كافية لتأمين احتياجات النباتات المائية. وتعطى معادلة التوازن المائي على النحو الآتي:

$$Pr = \Delta W + L_{ET} + L_{RP} \text{ (مم)}$$

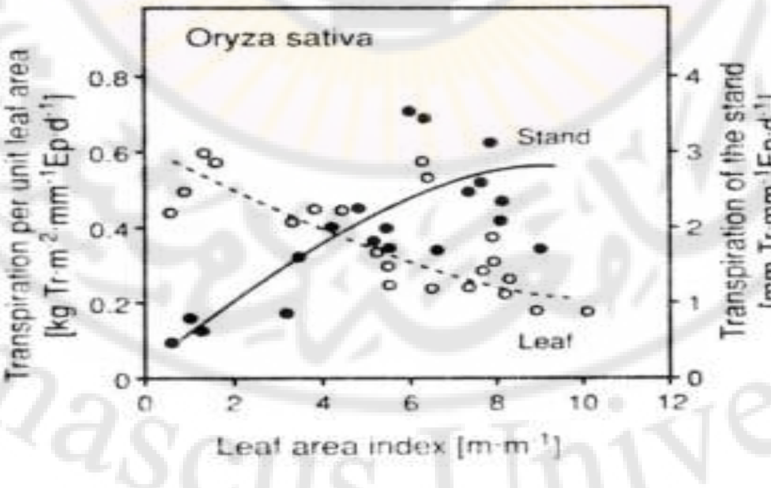
الهطول المطري المتاح Available precipitation: إنَّ مياه الأمطار المتاحة للنباتات للمحافظة على الميزان المائي، هي تلك الكمية الواصلة إلى الأرض والراشحة فيها. وعندما تكون الكثافة النباتية كبيرة Dense plant stand، فلا تصل كامل كمية الأمطار الهاطلة فوق مساحة محددة من إلى الأرض، إلى سطح التربة. ويصل فقط الجزء من مياه الأمطار الذي يمر من خلال الفراغات بين النباتات Gaps في الغطاء النباتي Canopy through fall، والقطرات الساقطة من الأوراق Drips off the leaves، والماء المنساب على طول الساق نحو الأرض Stem flow. وتُسمى كمية مياه الأمطار المتاحة للنباتات بصافي الهطول المطري.

كمية المياه المفقودة بالتبخر- نتح Evapo-transpiration from a stand: إنَّ كمية المياه المستهلكة من المجتمع النباتي في وحدة المساحة يتناسب تقريباً طرداً مع الكتلة الحية الخضراء Green mass (الشكل، 55). وبالرغم من أنَّ معدل فقد الماء بالنتح عن طريق الأوراق المفردة يتناقص بازدياد الكثافة النباتية، حيث إنَّ البيئة الدقيقة، ضمن الكثافة النباتية Microclimate within stands. عادةً ما تكون غير مناسبة لفقد الماء بالنتح، بسبب انخفاض الشدة الضوئية ودرجة الحرارة، وسرعة الرياح، وارتفاع الرطوبة النسبية الجوية.



الشكل رقم (55): متوسط الاستهلاك المائي اليومي بالعلاقة مع الكتلة الحية الخضراء.

ويُلاحظ من الشكل (56) أنَّ معدل فقد الماء بالنتح في وحدة المساحة الورقية للأوراق المفردة Individual leaf ينخفض بازدياد دليل المساحة الورقية Leaf Area Index، في حين يزداد معدل فقد الماء بالنتح لمجموعة نباتات الرز في وحدة المساحة من الأرض (Sugimoto,1973).



الشكل رقم (56): معدل النتح النسبي لأوراق الرز المفردة بالعلاقة مع دليل المساحة الورقية.

كمية المياه المفقودة بالجريان السطحي والرشح العميق Surface Runoff and Percolation:

حقيقةً، ليس كل الماء الواصل إلى التربة يكون متاحاً للنبات لعملية التبخر-نتح، ولكن بعض من هذا الماء يفقد بالجريان السطحي، وتزداد كمية المياه المفقودة بالجريان السطحي بازدياد ميل (انحدار) الأرض، وفي الأراضي الجرداء Bare soil غير المغطاة بالبقايا النباتية، وفي حال وجود قشرة سطحية كتيمة Crust، وفي الأراضي الحساسة للانجرافين الريحي والمائي، وخاصةً إذا كان بناء التربة مخرباً (صغر حجم الكتل الترابية وثباتيتها). ويفقد جزء آخر من المياه بالرشح إلى طبقات التربة العميقة ليصل إلى المياه الجوفية Ground water، بعيداً عن منطقة انتشار الجذور. ولكن في المناطق البيئية التي يكون فيها معدل الهطول المطري قليلاً، فإنَّ الماء يمتص من قبل طبقات التربة السطحية، ولا يفقد إلاَّ جزءاً يسيراً جداً إلى طبقات التربة العميقة. عموماً، تعد إتاحة المياه، ولاسيما في بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط، تحت ظروف الزراعة المطرية من أهم العوامل البيئية المحدودة لكفاءة البيئة الزراعية الإنتاجية، لذلك لا بدَّ من مراعاة جميع الممارسات الزراعية التي يمكن أن تُحسِّن من كفاءة استعمال المياه (إنتاجية المياه) Water Productivity، وذلك من خلال تقليل الفواقد المائية غير المنتجة (فقد المياه بالتبخر المباشر من التربة، وفقد المياه بالجريان السطحي، والصرف العميق) وزيادة الفواقد المائية المنتجة Productive losses، مثل فقد المياه بالنتح، لأنَّ عملية فقد الماء بالنتح عن طريق المسامات أثناء عملية التبادل الغازي يقابلها انتشار لغاز الفحم (CO_2) اللازم لعملية التمثيل الضوئي، أي لا بدَّ من تحويل كل قطرة ماء من مياه الأمطار الشحيحة الثمينة إلى مادة جافة "More crop per drop".

الفصل السادس

تأثير الإجهادات اللاأحيائية في نمو النباتات وتطورها وإنتاجيتها

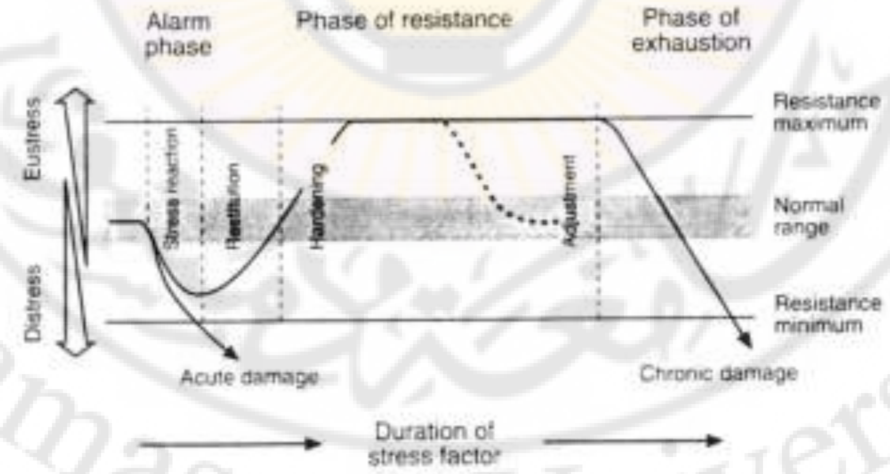
The Influence of A biotic Stresses on Plant Growth, Development and Productivity

تتعرض النباتات أينما وجدت إلى مجموعة من الإجهادات الأحيائية Biotic stresses (الأمراض، الحشرات)، والإجهادات اللاأحيائية (الجفاف، والحرارة المرتفعة، والملوحة...الخ)، يمكن أنْ تؤثر سلباً في نموها وتطورها وإنتاجيتها، وتهدد بقاءها على قيد الحياة Survival.

ما هو الإجهاد What is Stress؟

يُعرَّف الإجهاد بأنَّه انحراف معنوي عن الظروف المثالية للحياة. ويتجلى الإجهاد بحدوث تبدلات واستجابات على كل المستويات الوظيفية Functional levels للكائن الحي. ويمكن أنْ تكون مثل هذه التبدلات والاستجابات للإجهاد قابلة للعكس Reversible، أي يتمكن الكائن الحي من استعادة المستويات الوظيفية الطبيعية، ولكن يمكن أنْ تُصبح مثل هذه التغيرات، والاستجابات دائمة (Larder,1981). وحسب المفهوم الديناميكي للإجهاد، فإنَّ الكائن الحي الذي يتعرض للإجهاد يمرُّ عبر مراحل متتالية. تتمثل هذه المراحل بمرحلة الإنذار Alarm phase، وهي تُمثل بداية الاختلال، ويعقبها عدم استقرار بالشروط التركيبية Structural (البروتينات، الأغشية الحيوية، ... وغيرها)، والوظيفية Functional (العمليات البيوكيميائية، واستقلاب الطاقة) اللازمة لاستمرار حدوث العمليات الحيوية بشكلٍ طبيعي. وفي الحالة التي يصبح فيها الضرر شديداً، وسريعاً جداً، فيمكن أن يحدث انهيار حاد في سلامة الخلية Cell integrity، لا يمكن تجنبه ما لم يمتلك الكائن الحي وسائل دفاعية Defensive measures يمكن أنْ تحد من ذلك. وتبدأ مرحلة الإنذار "تفاعل الإجهاد" Stress reaction، التي يسود فيها الهدم، ويصبح خلالها معدل الهدم Catabolic أكبر من معدل البناء Anabolism. وإذا لم تتغير شدة الإجهاد (العامل المجهد) Stimulus، فيمكن أنْ يبدأ الكائن الحي بعملية إعادة التأهيل، من خلال عمليات الإصلاح Repair process، مثل تصنيع البروتينات، أو التصنيع الحيوي للمواد الدفاعية. وتعود هذه العملية إلى مرحلة المقاومة Resistance phase، التي تزداد خلالها المقاومة للعامل المجهد رغم استمرار الإجهاد، وتُسمى العملية

اصطلاحاً التقسية Hardening. ونتيجة المحافظة على استقرار الظروف الوظيفية والتركيبة في خلايا الكائن الحي رغم استمرار الإجهاد، فيمكن أنْ تستعيد معظم العمليات الفسيولوجية والبيوكيميائية خصائصها الطبيعية Normalization، وهذا ما يُسمى اصطلاحاً بالموازنة Adjustment. ويمكن أنْ تستمر المقاومة للإجهاد حتى بعد انقضاء العامل المجهد بفترة زمنية محددة. وإذا ما استمرت حالة الإجهاد لفترةٍ زمنية أطول، أو إذا ما ازدادت شدة الإجهاد، فيمكن أنْ يصل الكائن الحي في نهاية المرحلة إلى حد الإعياء Exhaustion، ويصبح تبعاً لذلك الكائن الحي حساساً Susceptible للإصابات Infections التي تحدث جرّاء فقد العائل لمقاومته نتيجة انهيار جميع الخطوط الدفاعية، الأمر الذي يؤدي إلى انهيار وتداعي الكائن بشكلٍ مبكر (قسري)، Premature collapse. عموماً، إذا كان الضرر مؤقتاً، فيمكن أن تستعيد الحالة الوظيفية مستواها الأصلي الطبيعي بعد انقضاء العامل المسبب للإجهاد. وإنَّ الضرر الحاصل في أحد المكونات الخلوية، أو المركبات العضوية، يمكن أنْ يتم إصلاحه خلال مرحلة استعادة النمو/ إعادة التجديد Regeneration phase. (Lichterthaler, 1996) (الشكل، 57). وإذا ما تجاوز الإجهاد (مدةً، وشدةً) مستوى التحمل لدى النبات، أو تعدى حدود المقدرة الوراثية التكيفية Adaptive capacity، فإنَّ النبات سوف يُصاب بالإرهاق Overtaxed، ويحدث الضرر الدائم Permanent damage، أو حتى يمكن أنْ يموت النبات في نهاية المطاف.



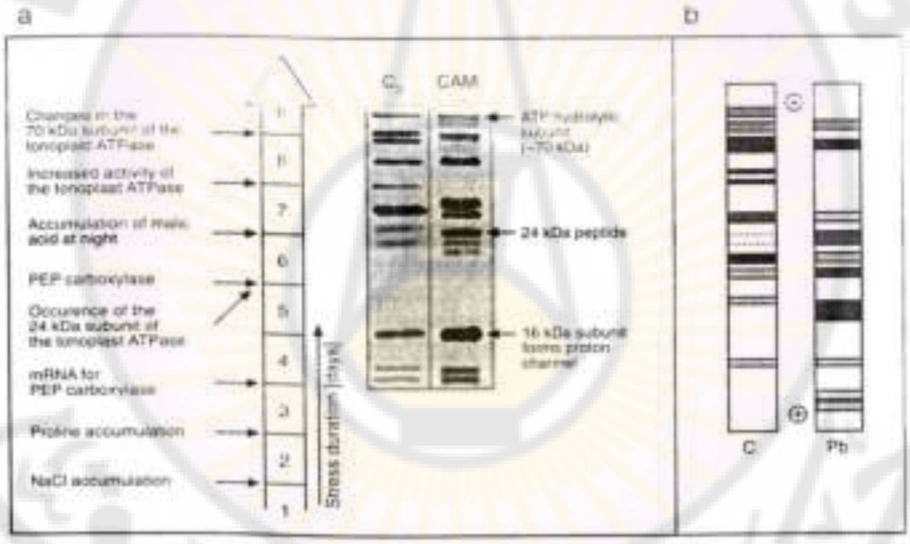
الشكل رقم (57): الأنموذج المرحلي لأحداث الإجهاد والاستجابة.

كيف تميز الإجهاد How to Recognize Stress

تستجيب الأنواع النباتية المختلفة بشكلٍ متباين لإجهادٍ بيئي معين، تبعاً للتركيب الوراثي "Reaction norm". وتختلف أيضاً طبيعة الاستجابة ودرجتها على مستوى النباتات الضرورية لإجهاد بيئي معين تبعاً لعمر النبات Plant age، ومقدرتهِ التكيفية Adaptability، وطبيعة النشاط اليومي والفصلي. وبالرغم من وجود علاقة ارتباط جيدة بين شدة الإجهاد ومقدار الاستجابة، لكن لا يمكن أنْ نفترض دائماً أنَّ درجة الضرر التي يُعاني منها النبات بتأثير الإجهاد تتناسب طرداً مع شدة الإجهاد، لأنّه ليست كل التغيرات الحاصلة في النبات بتأثير الإجهاد هي ضارة أو وقائية بشكلٍ صريح ومباشر.

وللوقوف على حجم الضرر الناجم عن إجهادٍ بيئي معين، لا بدَّ من مقارنة أداء النباتات تحت ظروف النمو الطبيعية، لمعرفة نسبة الانخفاض الحاصلة في صفةٍ ما. ويمكن تمييز الضغوط غير الطبيعية على النباتات جرَّاء الإجهاد، بوساطة العديد من الأعراض Symptoms. وعادةً ما تتجلى علامات الإجهاد بحدوث اختلالات غير مرئية في العمليات الفسيولوجية والبيوكيميائية، والجزيئية، ودلائل شكلية واضحة للعين المجردة، وقد تتمثل بعض هذه التبدلات ببعض الآليات المرتبطة بتحسين التحمل للإجهاد البيئي. ويمكن القول إنَّ لكل إجهاد بيئي تأثيرات محددة Stressor-specific effects في النبات. فعلى سبيل المثال، تسبب الشدة الضوئية العالية Intense radiation ضرراً مباشراً في أغشية الصانعات الخضراء الداخلية Thylakoid membranes، ويؤثر ارتفاع تركيز الشوارد المعدنية السامة (Na^+, Cl^-)، والعناصر المعدنية الثقيلة بشكلٍ مباشر في بروتينات الأنزيمات. ويمكن أنْ تتضمن التغيرات التي تطرأ على مستوى الآليات المرتبطة بالتحمل، وتغيير في مستوى نشاط بعض المورثات، ويتجلى ذلك بزيادة معدل تصنيع بعض البروتينات الدفاعية المُصنّعة استجابةً لظروف الإجهاد البيئي Stress-responsive proteins، أو نظائر أنزيمية خاصة Isoenzymes (الشكل، 58). ومن الصفات المميزة للإجهادات البيئية، أنَّ التبدلات الحاصلة استجابة لظروف إجهاد بيئي ما، قد لا تكون خاصة بهذا الإجهاد أو ذاك، ولكنها تُعبّر فقط عن شدة الإجهاد، أو مستوى الخلل الحاصل في الوظائف النباتية. ومن الأمثلة على الأعراض العامة، وغير الخاصة بإجهاد ما دون غيره Non-specific indications، التغيرات التي تحصل في النشاط الأنزيمي Enzyme activity، ولاسيما الأنزيمات التي تحدّ من السمية الناجمة عن الجذور الحرة Detoxifying enzymes، مثل البيروكسيداز Peroxidase، و Glutathione reduction، و Dehydroascorbate reductase، وتراكم موانع الأكسدة، مثل حمض الأسكوربيك Ascorbic acid، والتوكوفيرول. وتراكم بعض

الذائبات العضوية التوافقية Compatible Osmotically active substances، مثل البرولين Proline، والجلايسين بيتين Glycine betaine، و Polyole. والتصنيع الحيوي للبروتينات الدفاعية (LEA، HSP,s)، والأمينات العديدة Pdyamines، وبعض الهرمونات، وخاصة حمض الأبسيسيك (ABA)، وJasmonate، والإثيلين Ethylene. ويمكن أن تتمثل التغيرات غير المحددة بطبيعة الإجهاد، بحدوث تغيرات في خصائص الأغشية الحيوية (الجهد الكهروكيميائي، ونقل بعض المركبات...الخ)، وازدياداً في معدل التنفس Respiration، وتثبيط عملية التمثيل الضوئي، وتراجع تراكم المادة الجافة Dry matter accumulation، وهرمونات النمو، وتدني خصوبة الأعضاء التكاثرية، وحدوث الشيخوخة المبكرة Premature senescence.



الشكل رقم (58): تصنيع الببتيدات العديدة والأنزيمات المرافقة بتأثير الإجهاد.

الإجهاد وحياة النبات Stress and Plant Life:

إنَّ تعَّرض جزء أو أكثر من النبات إلى الإجهاد سوف يؤثر في كامل النبات. وحالما يتعرض جزء ما من النبات، سيؤدي ذلك إلى حدوث تغير في النظام الهرموني Hormone system، وتؤدي هذه التغيرات إلى حدوث تبدلات أيضية قصيرة المدى، وتغيرات شكلية ووراثية مديدة، تسمح بتقليل التأثيرات الضارة الناجمة عن الإجهاد، وتضمن بقاء النبات حياً لفترةٍ زمنية. فعلى سبيل المثال، إذا ما تعرّضت منطقة انتشار

الجـذور Rhizosphere للجفـاف، أو نقـص العناصـر المعدنيـة المغذيـة، أو نقـص الأوكسجين Anoxia، سيؤدي ذلك إلى استجابة النبات بمجموعة من التكيفات، مثل زيـادة نسبة المجموعة الجذرية إلى المجموعة الهوائية Root/shoot ratio لزيادة كمية المياه والعناصر المعدنية المغذية الممتصة، ويمكن أنْ يعمل النبات على تقصير طول فترة النمو الخضري، والإزهار بشكلٍ مبكر "Emergency flowering"، ويحدث أيضاً سقوط للأوراق Leaf abscission، لتقليل مساحة المسطح القابل للنتح. وحقيقةً، تحت ظروف النمو الطبيعية، فنادراً ما تتعرض النباتات إلى نوع واحد من الإجهادات البيئية، ولكن عادةً ما تتعرض إلى تداخل العديد من الإجهادات Multiple stresses، لذلك لا يُمكن أن تعزى التغيرات التي تطرأ على النباتات إلى نوع واحد من الإجهاد. فعلى سبيل المثال، فعادةً ما تتعرض النباتات في المواطن البيئية المفتوحة Open habitats للإشعاع الشمسي القوي Strong radiation، والحرارة المرتفعة Heat stress، والجفاف Drought، والملوحة Salt stress، حيث يؤدي السطوع الشمسي العالي وانخفاض الرطوبة النسبية الجوية، وازدياد سرعة الرياح إلى زيادة فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين النباتات والوسط المحيط، فيزداد كلٌّ من معدل فقد الماء بالتبخر والنتح، الأمر الذي يؤثر سلباً في محتوى التربة المائي، ما يؤدي إلى تعرّض النباتات للجفاف، وعندما تصبح كمية المياه المفقودة بالنتح أكبر من كمية المياه الممتصة، ستتعرض الخلايا النباتية إلى العجز المائي Water deficit، الأمر الذي يدفع النبات إلى تقليل الناقلية المسامية، وانغلاقها بشكلٍ كامل للحد من فقد المياه بالنتح، ولكن يؤدي انغلاق المسامات إلى تعطيل التأثير المبرد Cooling off لعملية النتح، فترتفع درجة حرارة الأوراق بشكلٍ تدريجي حتى تصل إلى مرحلة التحميل الحراري الزائد Overheating، ما يؤدي إلى احتراقها، وشيخوختها بشكلٍ مبكر. ويؤدي بالمقابل تراجع محتوى التربة المائي، وتركز الأملاح الذوَّابة إلى تملح محلول التربة المائي. وعادةً ما تكون استجابة النباتات للإجهادات اللاأحيائية أفضل تحت الظروف الطبيعية بالمقارنة مع الظروف المتحكم بها في المخبر أو البيوت الزجاجية. وتختلف أيضاً استجابة النباتات للإجهادات اللاأحيائية باختلاف مرحلة النمو، وباختلاف العوامل البيئية السائدة خلال موسم النمو (الشدة الضوئية، درجة الحرارة...الخ).

من المعروف إنَّ الإجهادات اللاأحيائية تسبب اختلالاً في جميع وظائف النبات، ويضطرب التنسيق بين العمليات المختلفة على المستوى الجزيئي، والخلوي، والنبات ككل. ويتطلب استعادة التوازن الوظيفي، واستقرار المركبات العضوية، والمحافظة على سلامة المكتنفات الخلوية، ولاسيما الحساسة منها (الأجهزة التمثيلية، والميتوكوندرية...الخ)، واكتساب مقدرة أكبر على التكيف والتحمل، صرف المزيد من

الطاقة ونواتج الاستقلاب. ويتمثل سلوك النباتات في البيئات المعَّرضة للإجهاد بمحاولة التوفيق بين البقاء على قيد الحياة وإعطاء غلة اقتصادية مناسبة، وتُسمى هذه الإستراتيجية بإستراتيجية البقاء على قيد الحياة. وعادةً ما تُلاحظ علاقة ارتباط سالبة بين الكفاءة الإنتاجية ومستوى التحمل، لذلك من أولويات مربي النبات إجراء توصيف دقيق للبيئة المستهدفة لتحديد شدّة التحمل بما يتناسب فقط مع شدة الإجهاد، للمحافظة على الطاقة الإنتاجية، وذلك من خلال تجميع مجموعة من الصفات المرتبطة بالتحمل، بطريقة تكفي لتحمل الإجهاد دون التفريط بالإنتاجية، لأنَّ المقدرة على البقاء، والتحمل العالي للإجهادات غير مهمة في النظم البيئية الزراعية الإنتاجية الاقتصادية، ولكنّها ذات أهمية بالغة في النظم البيئية الطبيعية Natural ecosystems.

ومن أهم الإجهادات اللاأحيائية التي تُؤثر في الغلاف الجوي، وفي التربة، والمياه، هي إجهاد الإشعاع الشمسي العالي أو المنخفض، وإجهاد الحرارة المرتفعة أو المنخفضة بشكلٍ كبير، والإجهاد المائي الناجم عن تراجع محتوى التربة المائي، نتيجة قلَّة معدل الهطول المطري، أو عدم كفاية مياه الري العذبة المتاحة، والرياح القوية. ويمكن أيضاً أن تتعرض النباتات لإجهاد نقص العناصر المعدنية المغذية Mineral deficiency في التربة الفقيرة، وفي حال عدم تعويض ما يفقد منها من العناصر المعدنية المغذية المستخلصة من قبل جذور نباتات المحصول السابق المزروع. وتشكل الترب الحامضية Acidic soils، أو القلوية Alkaline soils بشكلٍ زائد مهداً غير ملائم لنمو النباتات وتطورها، وتشكل أيضاً زحف الرمال، والجريان السطحي للمياه Water runoff عوامل إجهاد ميكانيكية. وعادةً ما تعاني النباتات في الترب الطينية الثقيلة الغدقة، من نقص في الأكسجين. أمّا الإجهادات الأحيائية Biotic stresses فعادةً ما تكون أكثر شيوعاً في الكثافات النباتية العالية، وعندما تكون النباتات مستعملة بشكلٍ كبير من قبل الحيوانات والكائنات الحية الدقيقة. وبالإضافة إلى العوامل الطبيعية المسببة الإجهادات الأحيائية واللاأحيائية، توجد الإجهادات الناجمة عن فعل الإنسان، التي تُحدث إجهادات فيزيائية، وميكانيكية، بالإضافة إلى التلوث الكيميائي. وسيتم لاحقاً مناقشة هذه الإجهادات كلاً على حدة، ولكن هذا لا يعني أنَّ الإجهادات تحدث بشكلٍ مستقل عن بعضها البعض، ولكن عادةً ما تتعرض النباتات إلى مزيج مركب من الإجهادات تحت الظروف البيئية الطبيعية.

العوامل البيئية المعيقة Environmental constraints: يمكن تلخيص أهم العوامل المجهدة للنباتات بالمخطط الآتي:

Stress factors عوامل الإجهاد

Abiotic عوامل غير حيوية

Radiation الإشعاع

- نقص الماء والعناصر المعدنية المغذية.
- تغدق التربة Water lagging.
- الأشعة فوق البنفسجية UV radiation

Temperature الحرارة

- الحرارة المرتفعة Heat.
- الحرارة المنخفضة Cold.
- الصقيع Frost.

Water الماء

الرطوبة النسبية الجوية المنخفضة Dry air.

التربة الجافة Dry soil.

الفيضان Flooding.

Gases الغازات

- نقص الأكسجين.
- الغازات البركانية

Minerls العناصر المعدنية

- نقص العناصر.
- تركيز زائد من العناصر Excess.
- اختلال التوازن المعدني.
- العناصر المعدنية الثقيلة.
- حموضة التربة Acidity.
- قلوية التربة Alkalinity.

Mechanical effects التأثيرات الآلية

- الرياح Wind.
- Solifluction.
- المخلفات المدفونة Burial.
- الغطاء الثلجي Snow cover.
- صفائح الجليد Ice sheets.

Biotic عوامل حيوية

Plants النباتات

- الكثافة النباتية العالية (المنافسة).
- التأثير التضادي Alebpathy.
- النباتات الطفيلية.

Microorganisms الكائنات الحية الدقيقة

- الفيروسات Viruses.
- البكتريا Bacteria.
- الفطريات Fungi.

Animals الحيوانات

- الرعي الجائر Over grazing.
- وطء أقدام الحيوانات Trampling.

Anthropogenic orgin العوامل الناجمة عن فعل الإنسان

- التلوث Pollution.
- المركبات الكيميائية الزراعية Agrochemicals.
- انضغاط التربة Soil compaction.
- الحرائق Fire.
- الأشعة المتأرِ... Ionizing radiation

المصدر: Kreeb,1974a; Levitt,1980

Damascus University

أولاً- إجهاد الإشعاع الشمسي Solar Radiation Stress

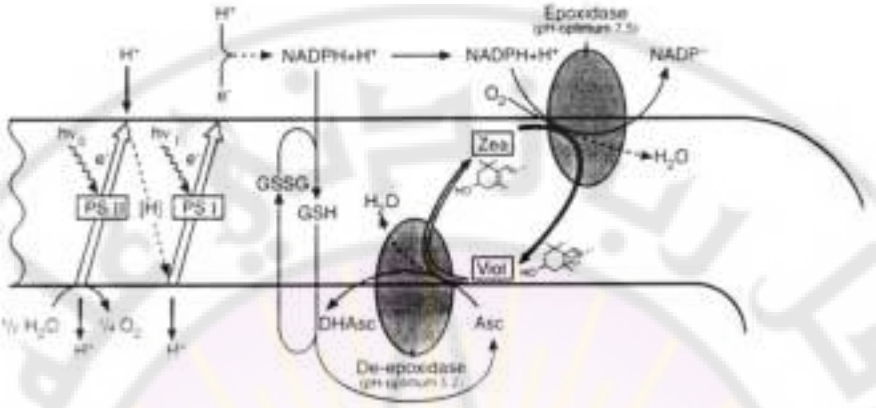
إنّ وجود كمية زائدة من الأشعة الضوئية الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي (PAR)، وامتصاص كمية كبيرة من الأشعة فوق البنفسجية UV Radiation سيؤدي إلى تعَّرض النباتات إلى إجهاد الإشعاع الشمسي Radiation stress.

إجهاد الضوء Light stress: إنَّ الجهاز التمثيلي في النباتات يتسم بكفاءةٍ عالية في امتصاص الضوء واستعماله في تصنيع المركبات العضوية. ولكن الشدة الضوئية القوية تُقدّم لأوراق النباتات كمية من الطاقة الضوئية تفوق الكمية التي تستطيع استعمالها في عملية التمثيل الضوئي. ويُسبب التحميل الزائد للأشعة الضوئية حدوث ما يُسمى التثبيط الضوئي Photoinhibition. ويمكن أن يؤدي وجود شدة ضوئية عالية إلى تخريب الأصبغة التمثيلية، وأغشية الصّانعات الخضراء الداخلية، ويُسمى هذا اصطلاحاً الضرر الضوئي Photo damage. وعادةً ما يحدث الضرر الضوئي في الصّانعات الخضراء الموجودة في خلايا الطبقة العليا من النسيج المتوسط العمادي Palisade parenchyma، وهو ما يكون مسؤولاً جزئياً عن التراجع الحاصل في كفاءة الأوراق المفردة التمثيلية. وإنَّ العديد من الكائنات الحية الأولية Cryptogams (مثل الطحالب Algae، والأشنيات lichens Sciophytic، والحزازات Mosses، والسرخسيات Ferns) وبعض الأنواع النباتية الراقية الوعائية، التي تكون مغمورة بالمياه Submersed، وجميع الأنواع النباتية التي تعيش في البيئات المظللة، عادةً ما تكون حسّاسة بشكلٍ كبير للإشعاع الشمسي، ويمكن أنْ تتضرر حتى لو تعرّضت لفترةٍ قصيرة جداً لإشعاع ضوئي متوسط الشدة. أما الأنواع النباتية الطافية في المياه Phytoplankton فتستجيب للشدة الضوئية العالية بأن تنسحب نزولاً إلى طبقات المياه الأعمق، وإنّ النباتات التي تعيش ضمن الطوابق السفلية المظللة من الغابات، يمكن أن تُعاني من صدمة ضوئية Light shock عندما تتعرض بشكلٍ مفاجئ للإشعاع الضوئي الساطع Bright sunlight، وذلك بعد سقوط بعض الأشجار بتأثير العواصف، أو بعد عمليات قطع الأشجار. ويمكن أنْ تشكل حتى الإضاءة المتقطعة Sun flecks النافذة من خلال تيجان الغطاء النباتي إجهاداً ضوئياً يؤثر سلباً في نمو بادرات الأشجار.

قاعدة عامة: كلّما كانت كفاءة معقد الأصبغة Pigment Complex أكبر في أسر الضوء الوارد إلى النبات، كان النبات أكثر حساسية للإشعاع الشمسي القوي. وإنَّ الأنواع النباتية التي اعتادت على النمو في الأرض المكشوفة، مثل النمو في الجبال المرتفعة، وفي البوادي، والصحاري، وشواطئ البحار، وفي الأراضي البور، وفي الحقول، فإنَّ النباتات

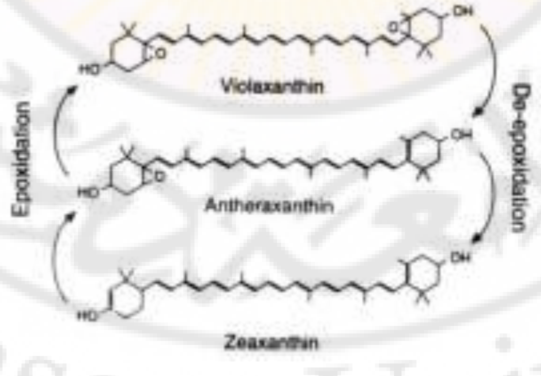
الفتية عادةً ما تكون متكيفة مع الشدة الضوئية العالية، وقادرة على تحمل المستويات العالية من الإشعاع، فهي مستقرة ضوئياً Photo stable. ولكن يمكن أنْ يحدث التثبيط الضوئي، والضرر الضوئي حتى في مثل هذه النباتات في حال تمَّ منع نقل الطاقة إلى حلقة كالفن (NADPH, ATP) اللازمة لتثبيت الكربون لأي سبب، أو حتى في حال تقليل معدل نقل الطاقة. ويمكن أن تتطور مثل هذه الحالات إذا تعرضت النباتات بشكلٍ مسبق للإجهاد، أو في حال حدوث إجهاد إضافي، ولاسيما إذا ما تعَّرضت النباتات إلى إجهاد الحرارة المرتفعة، أو إجهاد الحرارة المنخفضة، أو الجفاف Drought، أو الإجهاد الملحي Salinity stress، أو في حال نقص التربة ببعض العناصر المعدنية المغذية الكبرى، وخاصةً الآزوت، أو العناصر النادرة، أو حالات الإصابة بالمسببات المرضية، أو التعرض لمواد سامة Toxic substances. عموماً، يحدث التثبيط الضوئي في حال وجود شدة ضوئية عالية، وعندما تكون عمليات التمثيل الضوئي الثانوية غير قادرة على الاستمرار وفق معدلاتها الطبيعية (خلال فترات الجفاف، والبرودة)، وهذا عادةً ما يكون مرتبطاً بتراجع كفاءة العمليات الأساسية Primary processes لعملية التمثيل الضوئي. ويعود أيضاً الانخفاض في عملية التمثيل الضوئي خلال فترة منتصف النهار Midday depression إلى إجهاد الإشعاع الضوئي.

إجهاد الإشعاع الشمسي العالي- عملية حركية High Light Stress- a Dynamic Process: يتمثل التأثير المباشر للإشعاع الشمسي العالي في مركز التفاعل للنظام الضوئي الثاني، الأمر الذي يؤدي إلى تعطيل عملية نقل الإلكترونات، ويؤدي إلى خفض النظام الضوئي الثاني. ويعمد النبات في مثل هذه الحالة إلى التخلص من الأشعة الضوئية المحرّضة الزائدة على شكل توهج ضوئي Fluorescence، أو التخلص منها على شكل حرارة Heat، ويتم التخلص من المقدرة الإرجاعية الزائدة Reductive capacity في الصّانعات الخضراء من خلال حلقة الكزانثوفيل Xanthophylls cycle (الشكل، 59).



الشكل رقم (59): مخطط مبسط لحلقة الكزانثوفيل في الأغشية الداخلية للصانعة الخضراء.

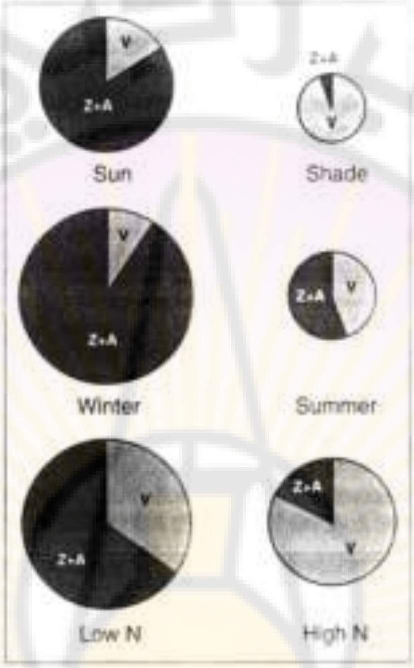
وتحت مشاركة الأسكوربات Ascorbate، ومركب NADPH فإنَّ مركب Di-epoxide violaxanthin سوف يختزل/ يُرجع Reduced إلى Zeaxanthin عن طريق anthraxanthin Mono-epoxide (الشكل، 60). وإنَّ عملية تحويل violaxanthin إلى Zeaxanthin تتم خلال بضع دقائق بوجود الإشعاع الشمسي القوي. وإنَّ عملية إعادة التحول من جديد إلى violaxanthin، التي تستهلك أيضاً مركبات مرجعة، يمكن أن تتم بشكلٍ سريع بوجود شدة ضوئية منخفضة أو في الظلام (Hager,1975;1980).



الشكل رقم (60): التحول Zeaxanthin، وAnthraxanthin ، وViolaxanthin.

عموماً، تحت ظروف النمو الطبيعية نادراً ما تمتص النباتات كمية من الطاقة الضوئية أكثر مما تحتاج لدفع عملية التمثيل الضوئي. وإنَّ الأوراق المعرَّضة بشكلٍ مباشر للشمس عادةً ما تمتص كمية زائدة من الأشعة الضوئية، وخاصةً خلال ساعات منتصف النهار عندما تكون الشدة الضوئية في أوجها. وإنَّ أي عامل بيئي غير مناسب يمكن أنْ يتسبب في تخفيض معدل التمثيل الضوئي يمكن أنْ يقلل من كفاءة النبات في استعمال الأشعة الضوئية المحرِّضة الممتصة، وإذا ما تجمعت مثل هذه الطاقة الضوئية المحرّضة الزائدة فيمكن أنْ تؤدي إلى حدوث الضرر التأكسدي Oxidative damage للأجهزة الضوئية، ويمكن أنْ يؤدي في المحصلة إلى موت الخلايا النباتية بالكامل، ولكن جميع الأنواع النباتية مجهزة بوسائل وقائية Protective means تمكنها من التخلص من الطاقة الضوئية الزائدة بأمان، وتحويلها إلى طاقة حرارية غير ضارة (Demming-Adams and Adams;1996 a). وبيّنت الدراسات في النباتات الراقية أنَّ التخلص من الأشعة الضوئية الزائدة على شكل حراري يتم بشكلٍ رئيس بوساطة أصبغة الكزانثوفيل Xanthophyll pigments. وهي (Z)Zeaxanthin. و (A)Antheraxavethin (Niyogi et al.,1998). فعندما تتعرض الأوراق إلى أشعة ضوئية زائدة- فإنَّ هذه الأصبغة سوف تتشكل خلال دقائق، خلال حلقة الكزانثيوفيل من المادة الأولية المسماة (V)Violaxanthin. وتنشط الأنزيم المكون من violaxanthin de-epoxidase نتيجة ارتفاع حموضة الجزء الداخلي لغشاء الصانعة الخضراء الداخلي Lumen acidification، وذلك عند وجود طاقة ضوئية زائدة (درجة الحموضة المثلى لنشاط الأنزيم هي 5.2). ولكن تشكل Z+A وحده غير كافٍ للقيام بدوره في التخلص من الأشعة الزائدة، ولكن نتيجة ازدياد حموضة الجزء الداخلي لغشاء الثايلاكويد، سيؤدي إلى هدرجة Protonation معقدات حصد الطاقة الضوئية Light-harvesting complexes، ما يؤدي إلى حدوث تغيرات تركيبية في هذه المعقدات تحفز Z+A على التخلص من الطاقة الزائدة، ولكن حقيقةً لا تزال آلية تحويل الطاقة الضوئية المحرّضة الزائدة إلى طاقة حرارية غير ضارة غامضة Elusive. وتبعاً لذلك، فعادةً ما تكون مستويات تشكيل مركبات Z+A، ومن ثمَّ معدل التخلص من الطاقة الزائدة أكبر في الأنواع النباتية الأكثر حساسية للأشعة الضوئية الزائدة، أي ذات معدلات التمثيل الضوئي المنخفضة. وكلما ازدادت كفاءة النباتات في التخلص من الطاقة الضوئية الممتصة في أنظمة حصد الطاقة الضوئية، قلَّت كفاءة تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية Photochemistry، ويعبَّر عن ذلك بزيادة شدة التوهج (Fv/Fm)Fluorescence (الشكل، 61). وإنَّ تعَّرض النباتات إلى إجهادات إضافية مثل الجفاف، والحرارة المرتفعة، ونقص الآزوت،

سوف تحرض أكثر على تصنيع Z+A، ومن ثمَّ كفاءة التخلص من الطاقة Energy dissipation (Li et al; 2000; Rorat, 2001).



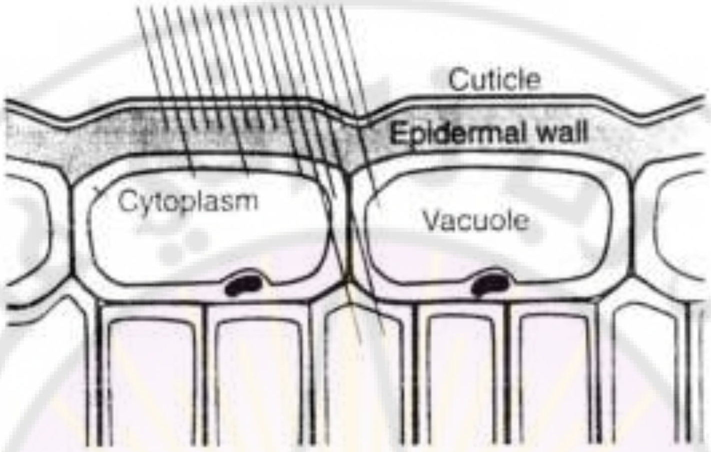
الشكل رقم (61): نسب Zeaxanthin(Z)، وAntheraxavethin(A)، و(A+Z) في الأوراق المتكيفة لبيئاتٍ متباينة.

التكيف مع الشدة الضوئية العالية Adaptation to Stress from Strong Light

يمكن التخفيف من تأثير الأشعة الضوئية الزائدة بوساطة حركات الهروب Escape movements، مثل تغيير زاوية توضع الأوراق، بحيث تشكل زاوية حادة جداً مع الأشعة الشمسية الواردة، لتقليل كمية الأشعة الضوئية الممتصة، أو من خلال زيادة درجة التفاف الأوراق، لتقليل مساحة السطح المعرَّض بشكلٍ مباشر لأشعة الشمس، أو من خلال حركة الصّانعات الخضراء ضمن الأنسجة التمثيلية. وتُساعد أيضاً زيادة سماكة الطبقة الشمعية على سطوح الأوراق في تقليل كمية الأشعة الضوئية الممتصة، من خلال عكس Reflection جزء كبير منها. وتعمل أصبغة الأنثوسيانين Anthocyanin في الأوراق غير الملتفة Unfolding leaves، وخاصةً في المناطق المدارية كمصفاة تعتيم

Darkening filter، وتحمي خلايا النسيج المتوسط التي تتركز فيها الصّانعات الخضراء. عموماً، تحت ظروف الشدة الضوئية العالية فإنَّ كمية الأصبغة الوقائية Protective pigments، مثل الكاروتينات Carotene، واللليوتين Lutens عادةً ما تزداد في الصّانعات الخضراء.

الأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet Radiation: يحتوي الإشعاع الشمسي الذي يمر عبر الغلاف الجوي الأشعة فوق البنفسجية، التي تتضمن الأشعة فوق البنفسجية من النوع A (UV-A)، بطول موجة 315-400 نانومتر)، والأشعة فوق البنفسجية من النوع B (UV-B)، (بطول موجة 280-315 نانومتر)، وتزداد شدة الأشعة فوق البنفسجية بازدياد الارتفاع فوق سطح البحر وعند خطوط العرض الجغرافي الأدنى. وعادةً ما تكون شدة الأشعة UV-B متدنية، وتزداد شدتها كلما قلّت فعالية طبقة الستراتوسفير المحتوية على طبقة الأوزون. وتسبب الأشعة فوق البنفسجية الطويلة الموجة (UV-A) تأثيرات مؤكسدة ضوئية Photo oxidative، وتسبب الأشعة فوق البنفسجية قصيرة الموجة (UV-B) بالإضافة إلى تأثير الأكسدة الضوئية، قروحاً ضوئياً Photo lesions، ولاسيما في الأغشية الحيوية. وتتمثل الآلية الجزيئية للضرر الحاصل في الأغشية الحيوية بتأثير الأشعة فوق البنفسجية بتحطيم روابط الكبريت المضاعفة Disulfide bridges في جزيئات البروتين، و Dimerizing مجموعة التايمين Thymine groups في الحمض النووي الريبي منقوص الأوكسجين (DNA)، الأمر الذي يؤثر سلباً في عملية النتح. وتعمل أيضاً الأشعة فوق البنفسجية على تثبيط الأنزيم Violaxonthin de-epoxidase، وإذا ما ترافق ذلك مع شدة ضوئية عالية، فسوف تفشل حلقة الكزانثوفيل في أداء دورها الوقائي. ويمكن أنْ يكون الضرر الناجم عن الأشعة فوق البنفسجية في النبات بحدوث تبدلات في نشاط الأنزيمات، حيث يزداد نشاط الأنزيم Peroxidase، وتثبيط نشاط أنزيم Cytochrome Oxidase، وانخفاض كمية الطاقة المتاحة في الخلايا، وتدني الغلة التمثيلية، واختلال النمو (تراجع معدل استطالة الخلايا في الأوراق، واستطالة أنبوبة اللقاح Pollen tube elongation)، الأمر الذي يؤثر سلباً في حجم المسطح الورقي الأخضر الفعّال في عملية التمثيل الضوئي، بالإضافة إلى فشل عملية الإخصاب والعقد، ما يؤثر سلباً في عدد البذور المتشكلة. ونتيجة الامتصاص الفعَّال للأشعة فوق البنفسجية من قبل الترسبات الشمعية Epicuticular waxes، والكاروتينويدات Carotinoids، والفلافونيدات المنحلة بنسغ الخلية Cell sap، فإنَّ البروتوبلاسم في خلايا النباتات الراقية عادةً ما تكون محمية بشكلٍ كبير من أضرار الإشعاع (الشكل، 62). عموماً، فإنّ تصنيع الأصبغة الوقائية، غالباً ما يتم بتحريض الأشعة البنفسجية، وتتراكم بازدياد شدة الإجهاد.



الشكل رقم (62): الأشعة فوق البنفسجية تمتص بشكلٍ رئيس من قبل الكيوتيكل، والجدران الخارجية للخلايا، وفجوات خلايا الأدمة الخارجية، وهذا يضمن وقاية النواة القريبة من جدران الخلايا الداخلية.

إجهاد الحرارة المتطرفة Stress Due to Extreme Temperatures

تُسَّرع الحرارة المرتفعة Heat من حركة الجزيئات، وتضعف الروابط بين المركبات العضوية، وتجعل الطبقات الدهنية في الأغشية الحيوية أكثر سيولة More fluid. وبشكلٍ معاكس، فإنَّ الحرارة المنخفضة تجعل الأغشية الحيوية أكثر صلابة More rigid، وتزداد احتياجات الطاقة لتفعيل العمليات البيوكيميائية. وإنَّ التجمد Freezing هو تحول الماء من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة، لذلك تُعد هذه الظاهرة من أكثر الظواهر المحددة للعمليات الحيوية في النبات. وإنَّ الحرارة المرتفعة والبرودة يمكن أنْ تُحدثا ضرراً في النشاط الأيضي، وتتباين حدّة الضرر حسب شدة الإجهاد ومدتهِ، كما تؤثران في النمو، وحيوية النباتات، وبالتالي تُعد الحرارة من أكثر العوامل البيئية المحدد للانتشار الجغرافي للأنواع النباتية. ويبين الجدول الآتي تحمل أوراق النباتات الوعائية للحرارة المرتفعة والمنخفضة على أساس العتبة الحرجة من الحرارة التي تسبب ضرراً مقداره 50% وذلك بعد تعرض الأوراق لساعتين أو أكثر لمعاملة البرودة، و 30 دقيقة لمعاملة الحرارة المرتفعة (Bucher and Neuner, 2001):

المجموعة النباتية	العتبة الحرجة للحرارة المنخفضة	العتبة الحرجة للحرارة المرتفعة
الأنواع النباتية المدارية		
- الأشجار.	+5 إلى 2-	55 – 45
- الأشجار في الطوابق السفلية للغابة.	+5 إلى 3-	48 – 45
- نباتات المناطق الجبلية العالية.	-5 إلى 15- (20-)	45
الأنواع النباتية تحت المدارية		
- النباتات الخشبية دائمة الخضرة.	8- إلى 12-	60 – 50
- النباتات الخشبية متساقطة الأوراق.	10- إلى 15-	60 – 50
- الأنواع النباتية العصارية	5- إلى 10-	60 – 55
- الحوليات رباعية الكربون.	1- إلى 5- (8-)	64 – 60
- الحوليات الشتوية الصحراوية.	6- إلى 10-	55 – 50
المناطق المعتدلة - النباتات الخشبية مستديمة الخضرة للمناطق الساحلية ذات الشتاء المعتدل.	10- إلى 15- (25-)	52 – 48
الأنواع النباتية المتكيفة مع البيئات الرطبة		
- المواطن البيئية المشمسة.	10- إلى 20- (30-)	52 – 47
- المواطن البيئية المظللة.	10- إلى 20- (30-)	45 - 40
الأنواع الحولية في البوادي	30- إلى 196-	65 – 60
الأنواع النباتية المتكيفة مع البيئات المتملحة Halophytes	10- إلى 20-	65 – 60
الأنواع العصارية	10- إلى 25-	62 – 55

الأنواع النباتية المائية	5- إلى 12-	38 – 44
الأشنيات Ferns	10- إلى 40-	46 – 48
المناطق ذات الشتاء البارد - المخروطيات مستديمة الخضرة. - شجيرات المناطق القطبية القرمة. - الأنــواع النباتيــة العشـبية للمنــاطق القطبيــة والجبال الشاهقة.	40- إلى 90- 30- إلى 70- 30- إلى 196-	44 – 50 42 – 55 45 – 52 (55)

196 – درجة مئوية هي درجة حرارة الآزوت السائل Liquid nitrogen.

إنَّ أخفض درجة حرارة هواء على سطح الأرض تقدَّر بنحو 90- درجة مئوية، وقد سُجلّت في المناطق القطبية Antarctica. وتتراوح درجة الحرارة الدنيا للهواء في الوديان والأراضي المنخفضة في شرق سيبيريا بين 66- إلى 68- درجة مئوية. ويمكن أنْ نتوقع حدوث الصقيع الشديد Severe frost (متوسط درجة حرارة الهواء الدنيا تكون أقل من 20-ْم) على نحو 42% من سطح الأرض، وفقط ثلث مساحة الأرض تكون آمنة بشكلٍ مطلق من خطر الصقيع.

إجهاد الحرارة المرتفعة Heat Stress:

الاضطرابات الوظيفية Functional Disturbances: إنَّ الارتفاع الطفيف في متوسط درجة الحرارة (30-35ْم) يمكن أنْ يضر Impair الأعضاء التكاثرية للنبات، في بعض الأنواع النباتية، مثل القمح Wheat، والذرة الصفراء Corn، والدخن Millet، وأصناف الرز Rice varieties، والفول السوداني Peanut، والخردل Rape، والبندورة Tomato. ويسبب التعَّرض للحرارة المرتفعة خلال مرحلة تشكلِ الأزهار وتطور البذور Sees development في حدوث العقم لحبوب الطلع Pollen sterility، الأمر الذي يؤثر سلباً في نسبة الإخصاب، والعقد، ومن ثمَّ عدد البذور المتشكلة، وتزداد نسبة الأزهار المجهضة. وتسبب الحرارة المرتفعة تبدلات عكوسة في الحالة الفيزيوكيميائية للأغشية الحيوية، وتخريب البروتينات الداخلة في تركيبه. ونظراً إلى حساسية غشاء الصانعة الخضراء الداخلي العالية للحرارة المرتفعة، فإنَّ تراجع معدل التمثيل الضوئي هو أول علامات التعرض لإجهاد الحرارة المرتفعة. ففي البداية، يتم تثبيط النظام الضوئي الثاني Photosystem II، ثمَّ يختل استقلاب الكربون. ويؤدي استمرار التعرض للحرارة المرتفعة إلى تثبيط بعض الأنزيمات غير المستقرة حرارياً،

الأمر الذي يؤثر في استقلاب الأحماض النووية، والبروتينات، ما يؤدي إلى تشكيل غشاء غني بالفجوات، ما يؤثر سلباً في خاصيتها الاصطفائية Selectivity، الأمر الذي يؤدي إلى خروج العديد من الذائبات المعدنية والعضوية المفيدة، فتموت الخلية النباتية (الجدول، 23).

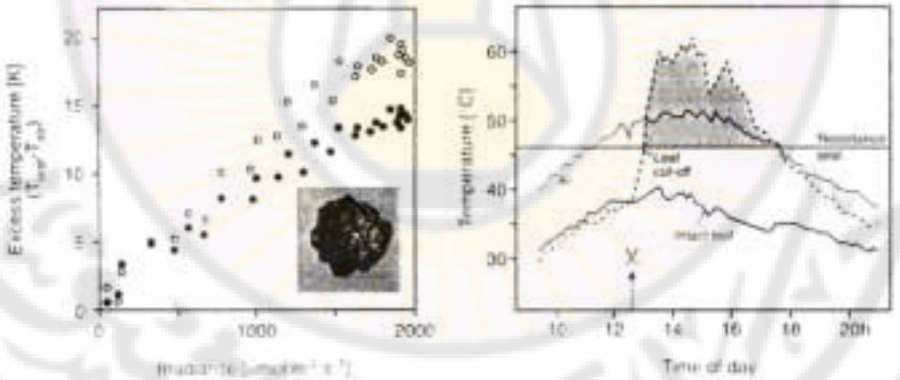
الجدول رقم (23): يبين العتبة الحرجة من درجات الحرارة (°C) التي تسبب خللاً وظيفياً (تثبيط بنسبة 10%) في أوراق بعض الأنواع رباعية الكربون الصحراوية، مثل الرغل *Atriplex sabulosa*، و *Tidesromia ciblongifolia*، بعد التعَّرض مدة 10 دقائق للحرارة المرتفعة.

الوظيفة	النوع النباتي	
	Atriplex	**Tidestromia**
وظائف الأوراق		
- صافي التمثيل الضوئي.	**43**	**51**
- التنفس الظلامي.	**50**	**55**
- الاصطفائية للشوارد المعدنية.	**52**	**56**
وظائف الصانعات الخضراء		
- النظام الضوئي الأول PSI.	**55 <**	**55 <**
- النظام الضوئي الثاني PSΠ.	**42**	**49**
- RUBP carboxylase.	**49**	**56**
- PEP carboxylase.	**48**	**54**
- 3-PGA kinase.	**51**	**51**
- Adenylate kinase.	**47**	**49**
- Phosphohexose isomerase.	**52**	**55**
- RU5P kinase.	**44**	**52**

المصدر: Berry and Raison,1981.

المقدرة على البقاء تحت ظروف إجهاد الحرارة المرتفعة Survival Capacity Under Heat Stress: تبقى النباتات على قيد الحياة تحت ظروف إجهاد الحرارة المرتفعة من خلال تجنب الإجهاد، بوساطة التخفيف من شدة الإجهاد Mitigation، أو وقاية المكتنفات الخلوية من تأثير الحرارة المرتفعة، أو بواسطة تحمل Tolerance البروتوبلاسم للإجهاد. يتمثل التخفيف من التسخين الحراري الزائد الناجم عن الإشعاع الشمسي القوي لدى نباتات بعض الأنواع النباتية من خلال:

1. تقليل زاوية الأوراق مع الساق الرئيس (بشكل زاوية حادة)، الذي يُساعد في تقليل كمية الأشعة الضوئية الواصلة إلى الأوراق Erect leaves.
2. زيادة درجة التفاف الأوراق Curling up of leaves، لتقليل مساحة المسطح المعرَّض بشكلٍ مباشر لأشعة الشمس، ما يُسهم في تقليل كمية الأشعة الضوئية الممتصة.
3. خلال فترات الجفاف الشديد، فإنَّ النباتات التي تكون فيها الطوابق الورقية متقاربة جداً، بحيث تأخذ شكل الوردة Rosette plants، فإنَّ الأوراق السفلية تحيط بالأوراق الفتية، والميرستيم القمي Apical meristem، فتحمي بذلك الأجزاء النباتية الأكثر حساسية من تأثير الحرارة المرتفعة (الشكل، 63).



الشكل رقم (63): التخفيف من الحرارة المرتفعة بوساطة حركة الأوراق في النباتات ذات الطوابق الورقية المتقاربة جداً (اليسار)، والتاثير المبرد لعملية النتح تحت الري الكامل في البيئات الصحراوية (اليمين).

حيث يبين الشكل آلية التخفيف من تأثير الحرارة المرتفعة نتيجة حركة الأوراق السفلية في النوع النباتي Alpine (*Saxifraga paniculata*) الذي يأخذ شكل الوردة. وتتمثل بقيام الأوراق السفلية القديمة بإحاطة/ لف مركز الوردة، محيطةً بذلك الأوراق الفتية، والبرعم القمي، وذلك عند ازدياد شدة الإشعاع الشمسي فإنَّ الأوراق الفتية المحاطة تبقى

مظللة (●)، والخلايا الجنينية القمية تحافظ على درجة حرارة أقل Cooler من درجة حرارة الأوراق الخارجية (○) (Neuner et al., 1999).

4. يمكن أنْ تحافظ النباتات على المعدلات الطبيعية لدرجة حرارة أجزائها الهوائية، من خلال استمرار انفتاح المسامات وفقد الماء بالنتح، لما لعملية النتح من تأثير مبرد Cooling effect (الشكل، 40، اليمين). يُلاحظ من الشكل التأثير المبرد للنتح من خلال أوراق نبات *Citrullus colocynthis* المروي بكمياتٍ كافية من المياه تحت الظروف الصحراوية. ويُلاحظ أنَّ درجة حرارة الأوراق التي يكون فيها معدل النتح عالٍ أقل بكثير (أبرد) من درجة حرارة الهواء المحيط رغم وجود شدة ضوئية عالية (الأوراق غير المقطوعة Intact). ويلاحظ أنَّ درجة حرارة الوراق المقطوعة Cut-off (لا تقوم بعملية النتح) ارتفعت بشكلٍ سريع، وأصبحت أعلى من درجة حرارة الهواء المحيط، ووصلت درجة الحرارة إلى المستوى الذي ألحق ضرراً في الأوراق (بقع رمادية اللون)، نتيجة تعطيل التأثير المبرد لعملية فقد الماء بالنتح، حيث يؤدي التحميل الحراري الزائد Overheating إلى احتراق الأوراق Leaf firing، وحدوث الشيخوخة المبكرة لها (Lange,1959).

يعتمد تأثير الحرارة المرتفعة على مدتها، بمعنى آخر فإنَّه يتبع قانون الجرعة Dose law، الذي يقول إنَّ الحرارة المرتفعة بشكلٍ قليل Lower heat لفترةٍ زمنيةٍ طويلة تسبب ضرراً يساوي الضرر الناجم عن الحرارة المرتفعة بشكلٍ كبير لفترة زمنية قصيرة. وتقسم الأنواع النباتية تبعاً لتحملها للحرارة المرتفعة إلى ثلاث مجموعات:

1) **الأنواع الحساسة للحرارة المرتفعة Heat-sensitive species:** وتضم جميع الأنواع النباتية التي تتضرر عندما ترتفع الحرارة إلى 30-40ْم، وكحدٍ أعلى 45ْم. وتمثل الطحالب حقيقيات النوى Eukaryotic algae، و Submerged cormaphytes، والحزازيات في الحالة المجففة Lichen in hydrated state، ومعظم نباتات اليابسة طرية الأوراق Soft-leaved terrestrial plants. وأيضاً بعض أنواع البكترية الممرضة للنباتات، والفيروسات، التي يمكن أنْ تموت عند درجات حرارة منخفضة نسبياً (مثال، فيروس ذبول البندورة Tomato wilt virus، الذي يمكن أن يُقتل عند درجة حرارة 40-45ْم). وجميع هذه الأنواع يمكن أنْ تستعمر المواطن البيئية، التي لا تتعرض فيها للتسخين الحراري الزائد، ما لم تكنْ قادرة على تبريد أجزائها بوساطة فقد الماء بالنتح Transpirational cooling.

2) **حقيقيات النوى المتحملة نسبياً للحرارة المرتفعة Relatively heat-Resistant eukaryotes:** إنَّ الأنواع النباتية المنتشرة في المناطق البيئية المشمسة والجافة يمكن أن تكتسب التقسية للحرارة المرتفعة، وتستطيع أنْ تتحمل حرارة مرتفعة تصل إلى قرابة 50-60ْم مدة نصف ساعة.

3) **طلائعيات النوى المتحملة للحرارة المرتفعة Heat tolerant prokaryotes:** يمكن لبعض طلائعيات النوى المحبة للحرارة العالية Thermophilic أن تصمد وتبقى حية حتى عند درجات حرارة مرتفعة جداً. ويمكن لبعض أنواع البكتريا Cyanobacteria أنْ توجد في سوائل الحمم البركانية وسخانات المياه. وإنّ مثل هذه البكتريا المأخوذة من مستعمرات بكتيرية منتشرة في المناطق الحارة يمكن أنْ تتحمل درجة حرارة تصل حتى 75ْم، وتتحمل أنواع بكتيرية أخرى حتى 90ْم، في حين تتحمل أنواع البكتريا المحبة بشكلٍ كبير للحرارة المرتفعة Hyberthermophilic archaebacteria الموجودة في أعماق المحيطات (مثال: Pyrodictium, Pyrococcus, Pyrobaculum) درجات حرارة تصل 110ْم. وفي جميع هذه الكائنات تكون الأحماض النووية acids Nucleic، والبروتينات، والأغشية الخلوية متحملة بشكلٍ كبير للحرارة المرتفعة.

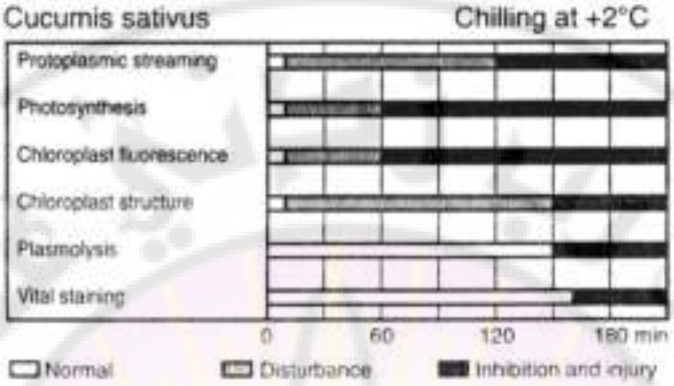
التأقلم مع الحرارة المرتفعة Acclimatizotion to heat: يحدث التأقلم للحرارة المرتفعة بسرعة استجابةً لإجهاد الحرارة المرتفعة، وتستغرق عملية الانتقال إلى المستوى الأعلى من تحمل الحرارة عدة ساعات في الأيام الحارة، ويكون تحمل الحرارة المرتفعة أكبر خلال فترة بعد الظهر Afternoon، بالمقارنة مع فترة الصباح. وإنَّ عملية فقد التقسية، أو فقد المقدرة على تحمل الحرارة المرتفعة تحدث بشكلٍ أبطأ في البيئات التي يكون المناخ فيها أبرد Cooler weather، وتنتهي تماماً خلال عدة أيام. وحتى نتمكن من تقسية نبات ما (زيادة مقدرته على تحمل الحرارة المرتفعة)، فيجب أنْ يُعَّرض إلى درجة حرارة مرتفعة بشكلٍ كافٍ (محرِّضة: غير مميتة) لإحداث تفاعل الإجهاد Stress reaction في البوتوبلاسم. وعادةً ما يزيد هذا المستوى الحراري المحرض للتقسية عن 35ْم في معظم الأنواع النباتية التي تعيش على اليابسة، في حين تحتاج الأعشاب Grasses درجة حرارة أعلى من 38-40 مْ، وتتقسى الأنواع النباتية العصارية بشكلٍ أفضل عندما تتعرض لدرجات حرارة مرتفعة خلال الليل High nocturnal temperatures. وعادةً ما يحدث التأقلم السريع لإجهاد الحرارة المرتفعة نتيجة امتلاك النوع النباتي المقدرة على تصنيع بروتينات الصدمة الحرارية Heat shock proteins(HSP's)، وتتراوح أوزانها الجزيئية بين 15-110 كيلو دالتون، وأهمها HSP20, HSP60, HSP70, HSP90، و Ubiquitine، ويحدث ذلك خلال ساعة

واحدة، حيث تتم صياغة الشيفرة لهذه البروتينات في النواة، ثمَّ تُصنع في السيوبلاسم، ثمَّ تُنقل إلى الصّانعات الخضراء والميتوكوندرية لحمايتها من ضرر الحرارة المرتفعة. ويتمثل دور هذه البروتينات في المحافظة على استقرار الكروماتين Chromatin structures، والأغشية السيتوبلاسمية، وإعادة تأهيل وإصلاح البروتينات والآليات المتضررة. ولكن عند زوال إجهاد الحرارة المرتفعة، وعودة الظروف إلى طبيعتها، فإنَّ هذه البروتينات الدفاعية تختفي خلال مدة أقصاها يوم واحد.

وتتوقف المقدرة على التحمل على كفاءة النوع/ الطرز الوراثي في تصنيع كمية أكبر من الوسائل الدفاعية (HSP,s)، وتوظيف هذه البروتينات الدفاعية لوقاية المكتنفات الخلوية الأكثر حساسيةً لإجهاد الحرارة المرتفعة Localization. ويتحدد مستوى التحمل بمقدار كفاءة الخلايا النباتية على استعادة النمو Recovery growth، الذي يتناسب طرداً مع نسبة الخلايا النباتية التي تبقى حية في نهاية فترة الإجهاد.

إجهاد الحرارة المنخفضة والصقيع Low Temperature and Frost Stress

يؤدي انخفاض الحرارة إلى تراجع سرعة التفاعلات الكيميائية، الأمر الذي يؤدي بشكلٍ متزايد إلى انتقال تفاعلات الاتزان Equilibrium reactions باتِّجاه تحرير الطاقة Energy release. وتبعاً لذلك، سوف تقل كمية الطاقة الاستقلابية المتاحة، الأمر الذي يؤثر سلباً في معدل امتصاص الماء والعناصر المعدنية المغذية، ويتراجع معدل التصنيع الحيوي، ويتراجع معدل التمثيل الضوئي وتصنيع المادة الجافة، الأمر الذي يؤثر سلباً في نمو النباتات. وتزداد وطأة إجهاد الحرارة المنخفضة بازدياد وتيرة تكرارها، ومدتها، وشدتها. وتتباين حساسية الوظائف الخلوية المختلفة استجابةً لظروف الحرارة المنخفضة. ويتمثل التأثير الأوَّل الملاحظ للحرارة المنخفضة في توقف جريان البروتوبلاسم Protoplasmic streaming، وتتحدد هذه الظاهرة بشكلٍ مباشر بكمية الطاقة المتاحة عن طريق العمليات التنفسية، وأيضاً بمدى توافر المركبات الفوسفاتية الغنية بالطاقة (NADPH, ATP). ويلي ذلك مباشرةً، تدهور عملية التمثيل الضوئي، ويعزى ذلك بشكلٍ رئيس إلى تراجع الناقلية المسامية، ومن ثمَّ معدل عملية التبادل الغازي، الأمر الذي يؤثر سلباً في صافي انتثار الكربون، ومن ثمَّ كمية غاز الفحم المتاحة في مراكز التثبيت ضمن الصّانعات الخضراء، بالإضافة إلى تراجع كفاءة النبات في تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية، ويدلل على ذلك من ارتفاع قيم التوهج الضوئي اليخضوري Chlorophyll fluorimetry، وتُعد هاتان الظاهرتان من طرق الكشف المبكر عن تأثير إجهاد الحرارة المنخفضة (Kisljuk,1964) (الشكل، 64).

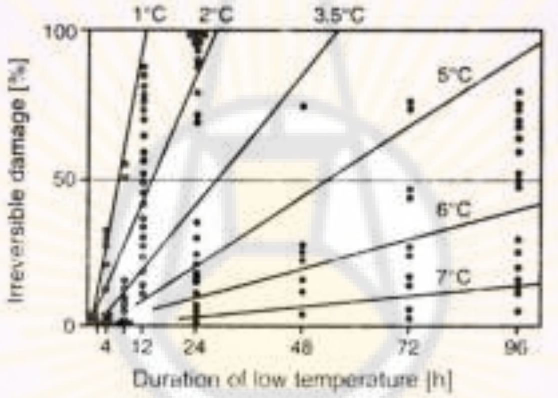


الشكل رقم (64): تضرر العديد من وظائف الخلية النباتية في أوراق الخيار الحساسة للصقيع عند زيادة فترة التعريض للحرارة المنخفضة.

ويعزى التأثير المباشر للأضرار الحاصلة في الخلايا النباتية إلى الحرارة المنخفضة، حيث تُعاني الأنواع النباتية الحساسة للبرودة Chilling-sensitive plants من أضرار مميتة إذا ما انخفضت درجة الحرارة بشكلٍ كبير، ووصلت إلى 4-6ْم. ويُعزى ذلك كما هو الحال في الحرارة المرتفعة إلى تمزق الأغشية السيتوبلاسمية، وانقطاع مصدر الطاقة الخلوي، ما يؤدي إلى توقف العديد من العمليات الحيوية المعتمدة على الطاقة Energy-dependent processes. وإنَّ النباتات المتحملة لدرجات الحرارة المنخفضة (فوق نقطة التجمد)، يمكن أنْ تتضرر إذا ما انخفضت درجة الحرارة إلى ما دون نقطة التجميد، نتيجة تشكل البللورات الثلجية Ice formation. وإنَّ الأنسجة النباتية الحساسة لتشكل البلورات الثلجية تموت مباشرةً فور تشكل هذه البللورات، في حين يمكن أنْ تبقى أنسجة النباتات المتحملة للتجمد Freezing-tolerant على قيد الحياة لفترة زمنية محددة حتى بعد تشكل البللورات الثلجية، ثمَّ لا تلبث أنْ تموت تدريجياً.

أشكال الضرر في النباتات الحساسة للبرودة Injury Patterns in Chilling-Sensitive Plants: إنَّ بعض الأنواع النباتية ذات الأصل المداري Tropical origin، وكذلك ثمار بعض الأنواع التي تكون الأعضاء الخضرية فيها متحملة بشكلٍ كبير للبرودة، يمكن أنْ تتضرر بشكلٍ مميت Lethally damaged عند درجات حرارة تتراوح بين 5-10 ْم. ويعتمد حجم الضرر، وسرعة تطوره، على درجة البرودة، وطول فترة التعرض للبرودة، وسرعة التحول من البرودة إلى إعادة التسخين Rewarming.

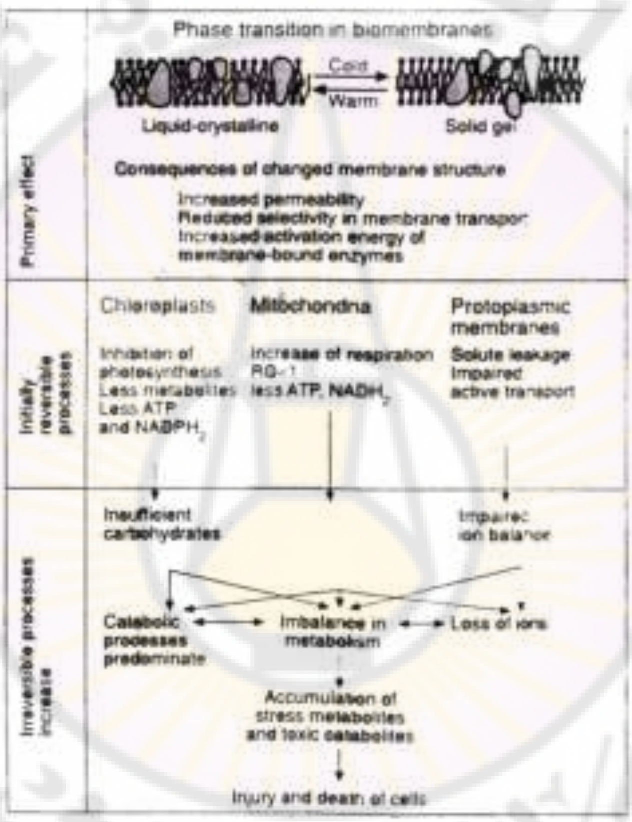
ويؤدي حدوث التغيير المفاجئ في درجة الحرارة إلى موت النبات مباشرةً، بتأثير الصدمة الحرارية Temperature shock. ويلاحظ من الشكل (65) أنَّ مقدار الضرر غير العكوس Irreversible المتمثل بعدد البقع المتموتة Necroses ومساحتها على أوراق نبات Saintpaulia يزداد بانخفاض درجة الحرارة، وزيادة مدة التعَّرض للحرارة المنخفضة. ولا يحدث أي ضرر Damage إلى الأوراق إذا كانت درجة الحرارة أعلى من 8ْم (Larcher and Bodner,1980). ويمكن أنْ يتطور ضرر البرودة Chilling damage ليصل إلى البروتوبلاسم بشكلٍ تدريجي في الأنواع النباتية الحساسة. وتستغرق عملية التطور الكامل للضرر الناجم عن البرودة من بضعة أيام إلى بضعة أسابيع، وذلك تبعاً لدرجة تحمل النوع النباتي.



الشكل رقم (65): ازدياد عدد البقع المتموتة في الأوراق بازدياد شدة ومدة الحرارة المنخفضة.

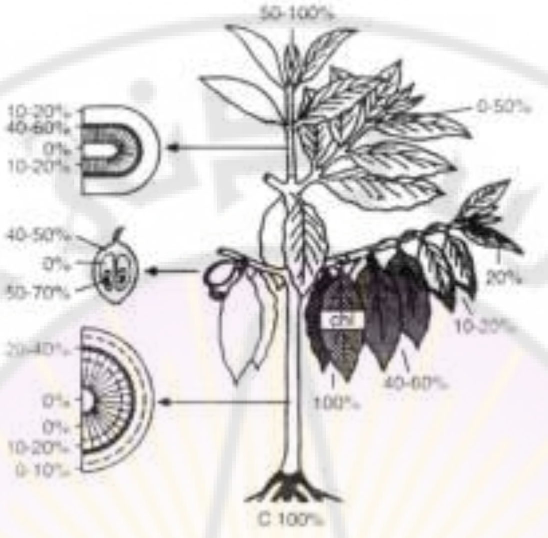
ويتمثل التأثير الأولي في تحول المكونات الدهنية Lipid components في الأغشية الحيوية من الحالة السائلة البللورية Liquid-crystalline الطبيعية، إلى الحالة الهلامية الصلبة Solid gel، يتبعه انفصال بروتينات الأغشية الحيوية. ويتمخض عن التبدلات الحاصلة في تركيب الأغشية الحيوية، حدوث ازدياد في نفاذية Permeability الأغشية الحيوية، نتيجة فقد خاصيتها الاصطفائية، فتفقد الأغشية الحيوية سيطرتها على دخول الذائبات المعدنية والعضوية وخروجها، وعملية تبادل نواتج الاستقلاب Metabolites، والشوارد المعدنية بين مكونات الخلية المختلفة، ويمكن أنْ تنزح العديد من مكونات الخلية المهمة (شوارد معدنية، أحماض عضوية، أحماض نووية، فيتامينات...الخ) إلى خارج الخلية النباتية. ونظراً إلى اختلال توازن حدوث العمليات الأيضية المختلفة بشكلٍ منسجم

مع بعضها البعض، وانخفاض كفاءة إنتاج المركبات الغنية بالطاقة ($NADH_2$,ATP)، والتحول إلى التنفس اللاهوائي Anaerobic respiration، فسوف تتراكم المركبات السامة Toxic intermediates، ما يؤدي إلى تدهور الخلية النباتية وموتها (Laroher,1985; Levitt,1980a) (الشكل، 66).



الشكل رقم (66): مراحل الضرر المؤدية للضرر في خلايا الأوراق الحساسة للحرارة المنخفضة.

تتباين الأنواع النباتية في حساسيتها للبرودة، فبعضها حساس بشكلٍ كامل، حيث يكون في مثل هذه الأنواع النباتية كل عضو نباتي حساس للبرودة، والبعض الآخر حساس بشكلٍ جزئي Partially sensitive (مثال، يقتصر فيها الضرر على البداءات الزهرية Flower primodia، والثمار الناضجة). وتتباين الحساسية أيضاً بين أجزاء النبات الواحد (الشكل، 67).



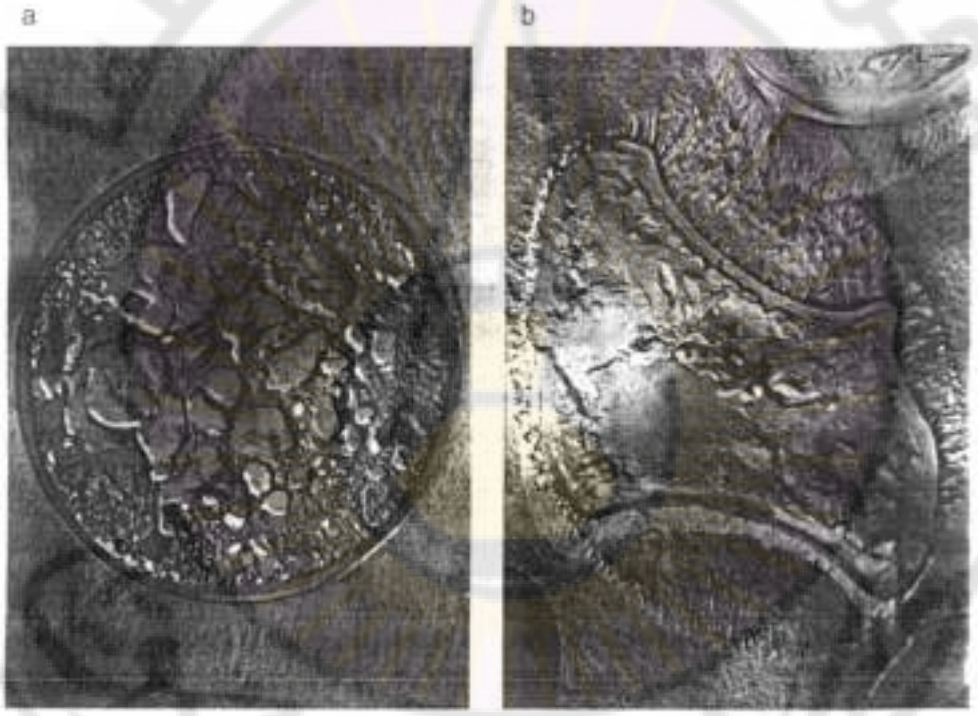
الشكل رقم (67): تباين حساسية الأعضاء والأنسجة النباتية في نباتات القهوة العربية *Coffea* (*Arabica*) بعمر ثلاث سنوات استجابةً للحرارة المنخفضة.

وتختلف الحساسية أيضاً باختلاف مرحلة النمو، حيث تعد مرحلة تشرب الماء من قبل البذور Seed water imbibition، والإنبات Germination، والشيخوخة Senescence من أكثر مراحل حياة النبات حساسية للبرودة (Sakai and Larcher,1987). يبين الشكل السابق تباين حساسية الأجزاء النباتية المختلفة للبرودة لدى نباتات القهوة العربية Coffee Arabica بعمر ثلاث سنوات، عندما عُرّضت لحرارة منخفضة (1ْم) مدة 36 ساعة، ويُلاحظ من الشكل أنَّ الجذور، والمنطقة الوعائية Cambial zone، والأوراق المصفرة والقديمة Sclerotic senescent leaves، والبراعم الزهرية المتفتحة Opening buds، هي من أكثر الأنسجة حساسية للبرودة (نسبة الضرر 100%)، يليها أجنة البذور Embryos (50-70%).

أشكال التجمد وضرر التجمد Freezing Patterns and Freezing injury:

يتشكل الجليد بدايةً في الأجزاء النباتية التي تبرد بسرعة، وتكون محتوياتها قابلة للتجمد. وتتمثل تلك الأنسجة بالحزم الوعائية، والفراغات بين الخلوية التي يتشكل فيها الماء بفعل التكاثف Condensation. ويحدث التجمد تدريجياً عند انخفاض درجة الحرارة إلى ما دون الصفر المئوي. وتنتشر البللورات الثلجية بشكلٍ سريع عبر الحزم الوعائية Vascular bundles والأنسجة المتجانسة، ويمكن أنْ تحول الفراغات الهوائية دون

استمرار نمو الجليد، وكذلك يتوقف تطور الجليد عندما يصطدم بالجدر الخلوية المتغلظة (نتيجة تراكم الكيوتين واللغنين) Cutinized cell walls. ويمكن أنْ تتجمد البروتوبلاسم إذا كانت تحتوي على نسبةٍ عالية من الماء، وإذا لم تتم تقسيتها من قبل، من خلال تعريضها للتبريد العميق بشكلٍ مسبق، وتتشكل البللورات الثلجية Ice crystals بشكلٍ مفاجئ ضمن الخلية النباتية، ويمكن أنْ تؤدي إلى تخريب البروتوبلاسم وموت الخلية (الشكل، 68).



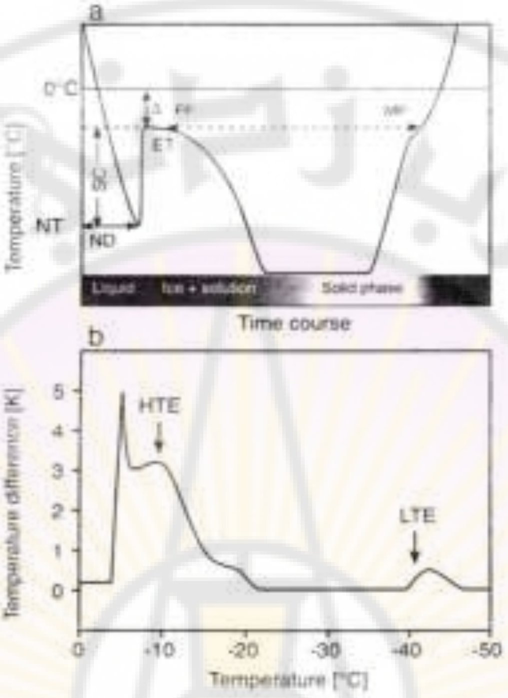
الشكل رقم (68): تشكل البللورات الثلجية في الفراغات الداخلية والخارجية للخلايا النباتية.

يُلاحظ من الشكل تجمد خلايا الخميرة Yeast نتيجة تشكل البلورات الثلجية ضمن الخلايا Intracellular ice formation، ما يسبب تدميراً كاملاً للتراكيب البرتوبلاسمية Protoplasmic structures، في حين يؤدي تشكل البللورات خارج الخلايا Extracellular إلى انكماش البروتوبلاسم بسبب خروج الماء منها إلى خارج الخلية،

ويسبب تشكل البلورات الثلجية أولاً ضمن الفراغات بين الجدر الخلوية والأغشية السيتوبلاسمية إلى رسم الحدود الأصلية للخلية (Moor,1964). عموماً، يحدث تشكل الجليد أولاً ضمن الفراغات الخلوية Intercellular spaces، ثمَّ يتطور ليملأ المساحة بين الجدر الخلوية والبرتوبلاسم، وهذا يسمى اصطلاحاً Extracellular ice formation. وإنَّ تشكل الجليد له تأثير مشابه لتأثير الهواء الجاف، لأنَّ ضغط بخار الماء فوق الجليد أقل من ضغط بخار الماء فوق المحلول السائل فائق البرودة Supercooled solution. وهذا سيؤدي إلى خروج الماء من البروتوبلاسم، التي تنكمش إلى أقل من ثلثي حجمها، ويزداد تبعاً لذلك تركيز الذائبات فيها. وتستمر عملية حركة الماء وتشكل الجليد إلى حين الوصول إلى حالة من التوازن الحراري Thermodynamic equilibrium بين طبقة الجليد Ice layer ونُسغ الخلية. وتتوقف النقطة التي يحدث عند الاتزان الحراري على درجة الحرارة، حيث يحدث عند جهد يعادل 6MPa- عند درجة حرارة 5-ºم، وعند جهد يعادل 12MPa- عند درجة حرارة 10-ºم. وعندما تتعرض البروتوبلاسم لإجهاد البرودة، أو التجفاف Dehydration فسوف يزداد تركيز الشوارد المعدنية، والأحماض العضوية في الجزء المتبقي غير المتجمد من المحاليل، ويكون لها تبعاً لذلك تأثيرات سامة Toxic effects، تُعطِّل النشاط الأنزيمي. وتحدث مثل هذه الظروف فإنَّ الأغشية الحيوية سوف تُرهق Overtaxed، بسبب ازدياد الجهد الحلولي وانكماش حجم البرتوبلاسم، ما يؤدي إلى تحطم المواد الدهنية الداخلة في تركيبها، وتتفكك البروتينات، ويتراجع نشاط أنزيم ATPase. ويؤدي التجفاف الشديد للبروتوبلاسم بسبب خروج الماء منها باتجاه طبقة الجليد إلى تخربها، ومن ثمَّ موت الخلية النباتية (Thomashow,1998). يتمثل التأثير الأول للحرارة المنخفضة في اختلال استقرار الأغشية الحيوية Destabilization. وتؤدي البرودة العالية High strain إلى تحول المواد الدهنية المفسفرة في الأغشية الحيوية من الحالة البللورية السائلة إلى الحالة الهلامية الصلبة، ويزداد نشاط الأنزيم المحلل للمواد الدهنية Phospholipase-D، فتزداد سرعة تحطم المواد الدهنية المفسفرة، وتتخرب الأغشية، وتموت الخلايا النباتية. أما في حال البرودة المعتدلة Moderate strain، فإذا ما تمكنت الخلية من تجاوز المرحلة الحرجة كعدم استقرار الأغشية الحيوية، فسوف يزداد نشاط الأنزيم Phospholipase-D-transferase، الذي يؤدي إلى تشكل بعض المركبات المسؤولة عن استقرار الأغشية الحيوية، مثل Phoaphatidyl ethanolamine، و Phosphatidyl choline، التي تُكسب النبات تحملاً أكبر للبرودة من خلال المحافظة على استقرار الأغشية الحيوية وسلامتها Membrane integrity.

آليات مقارعة إجهاد الصقيع Surviving Frost Stress

أولاً- منع الصقيع Frost prevention: يمكن تحقيق ذلك بشكلٍ أساسي من خلال العزل الحراري Thermal insulation للأجزاء النباتية الحساسة لتقليل معدل فقد الحرارة منها. ويمكن أنْ يتم ذلك من خلال قيام الأوراق بلف الأجزاء النباتية الحساسة وتحميلها من عملية التبادل الحراري. أو من خلال سقوط الأعضاء النباتية الحساسة قبل أنْ يحدث الصقيع الشديد، مثل سقوط الأوراق القديمة في الأنواع النباتية متساقطة الأوراق. وفي المناطق الجبلية العالية في البيئات المدارية، فإنَّ أوراق النباتات الوردية الشكل الضخمة تغطي النهايات القمية للأجزاء الهوائية Shoot apices خلال الليل، لتحميها من تأثير الصقيع. ويساعد أيضاً خفض نقطة التجمد والوصول إلى نقطة البرودة الفائقة في تأخير تجمد الماء في الأنسجة النباتية، وذلك من خلال زيادة تركيز الذائبات في المحاصيل المائية، حيث إنَّ نقطة تجمد المحاليل المركزة أقل (تتراوح بين 1- إلى 5-ْم)، وذلك حسب تركيز الذائبات في المحلول/ نسغ الخلية Cell sap. ويمكن تحقيق ذلك أيضاً من خلال زيادة مقدرة سوائل الخلية على التبريد الفائق قبل الوصول إلى نقطة التجمد، أي يمكن أنْ تُبرَّد إلى درجة حرارة أقل من نقطة التجمد دون أن تتجمد بشكلٍ مباشر. عموماً، عندما تتعرض النباتات لإجهاد الحرارة المنخفضة تبدأ درجة حرارة الأنسجة النباتية بالانخفاض بشكلٍ موازٍ للتبريد الحاصل في درجة حرارة الهواء المحيط، يعقب ذلك ارتفاع مفاجئ في درجة حرارة الأنسجة النباتية، نتيجة تحول الماء إلى بللورات ثلجية Crystallization، إذ يرافق هذه العملية فقداً في الحرارة Heat release. ويدلل هذا الارتفاع في حرارة الأنسجة Exotherm إلى بداية عملية التجمد (الشكل، 69).



الشكل رقم (69): نماذج التجميد في وسط سائل لأعضاء نباتية مختلفة.

عادةً ما تكون الخلايا في النسيج الحشوي Parenchyma، وأوعية الخشب Xylem vessels كبيرة نسبياً وغنية بالماء Well-hydrated، لذلك فإنَّ المحافظة على حالة التبريد الفائق دون التجمد أمر صعب، لذلك فهي تشكل مرحلة غير مستقرة، وانتقالية للتبريد الفائق، ولا يمكن المحافظة على هذه الحالة أكثر من عدة ساعات، وبالتالي يمكن أن تضمن وقاية مؤقتة ضد الصقيع. ويمكن المحافظة على استمرار حالة التبريد الفائق دون حدوث التجمد، إذا ما احتوت الأنسجة النباتية على موانع تشكل البللورات الثلجية Nucleation barriers. ويمكن أن يُساعد وجود البروتينات المضادة للصقيع Antefixest proteins في ضبط تشكل البللورات الثلجية وتطورها، وعادةً ما تتركز هذه البروتينات في الأجزاء بين الخلوية الحية Apoplast في المحاصيل النجيلية. ويمكن في أوراق بعض الأنواع النباتية المحافظة على التبريد العميق المستمر حتى -10 إلى -12 ْم، وأحياناً حتى 30- إلى -50 ْم في النسيج الحشوي لخشب بعض الأشجار، والشجيرات المنتشرة في المناطق المعتدلة (العديد من الأشجار المثمرة وأشجار الغابات). ولكن إذا ما تمَّ تجاوز العتبة الحرجة لمستوى التبريد العميق، فإنَّ هذه الحالة المستقرة

سوف تنهار، وتبدأ البللورات الثلجية Ice crystals بالتشكل داخل الخلايا النباتية (Pearce and Fuller,2001).

وتمتلك بعض البذور، والبراعم، وأنسجة القلف Bark tissues آلية وقاية ثالثة، تُسمى التجميد في أنسجة إضافية "Extra tissue freezing"، وتتضمن هذه الآلية حركة الماء من الأنسجة النباتية إلى أنسجة مجاورة أقل حساسية للصقيع، وأقل أهميةً من الناحية الوظيفية، أو إلى فراغات أخرى، حيث يتجمد الماء فيها، وتُساعد حركة المياه من داخل تلك الأنسجة الأكثر حساسية إلى زيادة تركيز الذائبات فيها، ما يُساعد في زيادة مقدرتها على التبريد العميق، ويؤخر بدء حدوث التجمد وتشكل البللورات الثلجية.

ثانياً- تحمل التجمد Freezing tolerance: يتوجب على النباتات التي تستطيع أنْ تصمد، وتبقى حية عند تعرُّضها لخطر الصقيع أنْ تمتلك بروتوبلاسما متحملة للصقيع. ويتطلب ذلك وجود بعض المواد الدهنية المفسفرة التي تبقى مستقرة خلال فترة الصقيع Cold stable phospholipids ضمن مكونات الأغشية الحيوية، بالإضافة إلى امتلاك تلك الأنواع النباتية المقدرة على تصنيع الذائبات العضوية وتجميعها، مثل السكريات البسيطة، والسكريات العديدة وPolyols، والأحماض الأمينية الحرة (البرولين)، والأميدات العديدة (جلايسين بيتين)، والبروتينات الدفاعية Stress responsive proteins. وتعمل مثل هذه المركبات على زيَّادة تركيز الذائبات لسوائل الخلية النباتية، ومن ثمَّ زيادة درجة التبريد العميق لفترةٍ زمنية أطول (استمرار التبريد الفائق عند درجات حرارة أقل من درجة التقسية نتيجة التعبير الوراثي لبعض المورثات، في تحقيق استقرار الأغشية الحيوية، والبروتينات الداخلة في تركيبها خلال عمليات التجمد والإذابة التي تحصل خارج البروتوبلاسم، عندما تنكمش البروتوبلاسم. وهذه البروتينات هي عبارة عن ببتيدات عديدة محبة للماء ذات أوزان جزيئية تساوي $7KD_a$ إلى أكبر من 40 كيلو دالتون، مشابهة للبروتينات من النوع LEA، و Dehydrins، و Cryoprotectins. تُساعد هذه البروتينات في إكساب البروتوبلاسم مقدرة أكبر على تحمل التجفاف الناجم عن التجمد Freezing dehydration.

تقسيم الأنواع النباتية المتحملة للبرودة Types of Cold Tolerance

1- **الأنواع النباتية الحساسة للبرودة Chilling-sensitive plants:** تتضمن هذه المجموعة جميع الأنواع النباتية التي تتضرر بشكلٍ أكبر عند انخفاض درجة حرارة الوسط المحيط حتى عند مستوى أعلى من نقطة التجمد، وتشمل طحالب

المحيطـات الدافئـة، وبعـض الأنـواع الفطريـة، وبعـض أنـواع النباتـات الراقيـة المنتشرة في المناطق المدارية.

2- **الأنـواع الحساسـة للتجمـد Freezing-sensitive plants**: وهـي الأنـواع النباتية التي تمتلك بعض الآليات التـي تسمح لهـا بتـأخير حـدوث التجمـد. وتشمل الطحالـب التـي تعيش فـي الأعمـاق السحيقة للمحيطـات البـاردة، وبعض طحالـب المياه العذبة، وبعض الأنواع النباتية الراقية التي تعيش في البيئات المدارية وشبه المدارية، وبعض الأنواع النباتية التي تنتشر في البيئات المعتدلة الدافئة نسبياً.

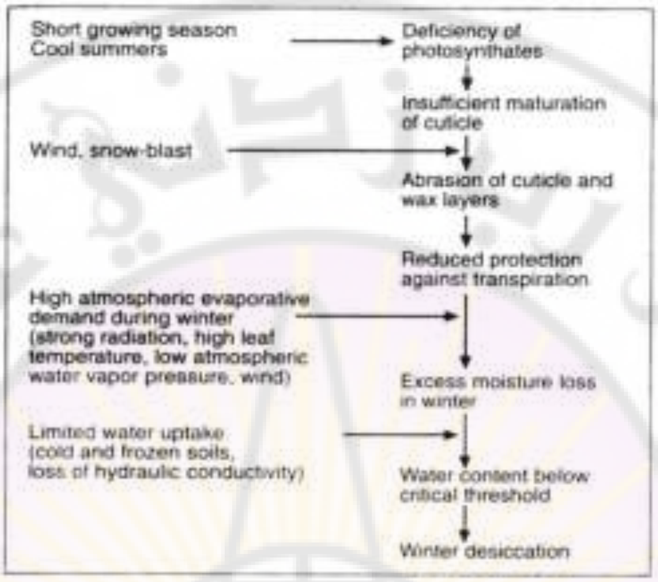
3- **الأنـواع النباتيـة المتحملـة للتجمـد Freezing-tolerant plants**: وتضـم بعض طحالب المياه العذبة، و Intertida algae، والطحالـب الهوائيـة Aerial algae، وأشنيات Mosses جميـع المنـاطق المناخيـة، والأنـواع النباتيـة المعمـرة التـي تنتشـر فـي البيئـات التـي تتسم بشـتاءٍ بـارد. وحقيقـة، فـإنَّ بعض الطحـالب، والحزازيـات Lichens، والعديـد مـن الأنـواع النباتيـة الحراجيـة يمكـن تقسيتها بحيث تُصبح متحملـة لمستوياتٍ منخفضـة جداً مـن البـرودة، ولا تتضـرر ولـو تعَّرضت لدرجات حرارة منخفضة لمدة زمنيةٍ طويلة، ويمكن لبعضـها أنْ تتحمل درجـات بـرودة تقـارب درجـة حـرارة الآزوت السـائل دون أنْ تمـوت. وتستطيع بعض الأنواع المنتشرة في المنـاطق الجبليـة العاليـة، والمنـاطق القطبيـة Arctic regions الشمالية أنْ تكتسب التحمل للتجمد خـلال عدة أيـام، فـي أي وقـت مـن السنة، وتستطيع أن تتحمل تشكل الجليد في خلايا حتى خلال فصل الصيف.

الأراضي المتجمدة، والثلج والجليد Frozen Soil Snow and Ice:

عندما تتجمد التربـة، فسوف تعجز النباتـات عن امتصـاص كميـة كافيـة من المـاء لتـأمين احتياجاتهـا النتحيـة، حتـى ولـو كـان معدل فقد المـاء بـالنتح قلـيلاً. وبالنسبة للنباتـات، فـإنَّ الأرض المتجمدة تعني أرضاً جافة. ويُمكن أنْ يؤدي الصقيع إلـى اختـلال ميزان العلاقـات المائية في النبات، وتعرض الخلايا النباتيـة إلـى ظـروف العجز المـائي Water deficit، ويُسمى هذا اصطلاحاً تجفيف الصقيع "Frost drying"، أو تجفـاف الشتاء Winter desiccation. وعند انخفاض درجة حرارة التربة، فسوف يتراجع معدل امتصاص الماء بوساطة الجذور يسبب ازديـاد المقاومـات لنقل الميـاه بـين التربـة والجذور، حيـث تـزداد لزوجة المـاء Water viscosity عند درجـات الحـرارة المنخفضـة، فتقل سـرعة حركـة جزيئـات المـاء، بالإضـافة إلـى ذلـك فـإنَّ الناقليـة المائيـة لقنـوات نقـل الميـاه Water

channels فـي الأغشـية الحيويـة سـوف تـنخفض بشـكلٍ كبيـر، مـا يـؤثر سـلباً فـي معـدل امتصـاص المـاء. ويؤدي انخفـاض درجـة حـرارة التربـة إلـى تثبيط نمـو الجـذور، أو إيقـاف نموها بشكلٍ كامل الأمر الذي يؤثر سلباً في حجم المجموع الجذري، ومن ثمَّ كمية الماء والعناصر المعدنية المغذية الممتصة. عموماً، تستطيع نباتـات التنـدرا فـي المنـاطق القطبيـة الشمالية، ونباتات المناطق الجبلية العالية، والأشجار في الغابات الشمالية أنْ تمتص المياه من الترب عند درجة حرارة فوق الصفر المئوي، وحتـى من الترب المتجمدة جزئيـاً، فـي حين أنَّ نباتات المناطق الدافئة لا تستطيع أنْ تمتص الماء إذا كانت درجة حرارة التربة أقل من 10 ْم، وتظهر أعراض التجفاف الشتوي علـى النباتـات حتـى فـي الأراضـي غيـر المتجمدة، مثال أنواع الحمضيات في اليابان، وعادةً ما تظهر أعراض تجفاف الشتاء في الأراضـي التـي تغطيهـا طبقـة رقيقـة جداً مـن الـثلج، حيث يحدث التجميد العميـق للتربـة Deep soil freezing. ويحدث تجفاف الشتاء بطريقتين:

1- انهيار حاد في ميزان العلاقات المائية في النباتات التي تستمر في فتح مساماتها حتـى خـلال الشـتاء، وتصـبح تبعـاً لـذلك كميـة الميـاه المفقـود بـالنتح عـن طريـق المسـامات أكبـر بكثيـر مـن كميـة الميـاه الممتصـة عـن طريـق الجـذور فـي التـرب المتجمدة، ما يؤدي إلى حدوث تدهور سريع في الميزان المائي للخلايا النباتية. وتسبب قوة الشد الناجمة عن فقد الماء بالنتح انقطاعاً في عمود الماء في الأوعية الناقلة، فتتشكل فجوات وتنتشر الجلطات/ الخثرات Embolisms التـي تعمـل على سَدْ الأوعية الناقلة، ما يُعيق مرور الماء عبر الخشب، وصولاً إلى الأوراق والفروع، الأمر الذي يؤثر سلباً في حالة امتلائها، وتظهر عليها مباشرةً أعراض الضرر.
2- الضرر المزمن Chronic damage: يحدث عادةً في النباتات التي تكون فيها المسـامات مفتوحـة بشـكلٍ قليـل جـداً خـلال فتـرة السـبات الشـتوي Winter dormancy، وتبعاً لذلك يقتصر فقد الماء على النتح عبر خلايا الأدمة الخارجية Cuticle، ويكـون فقـد المـاء بطيئـاً جـداً. ويمثـل هـذا النـوع المخروطيـات Coniferous، ومتساقطة الأوراق Deciduous species. ويمكن القول بشكلٍ عام، إنّه كلما زاد معدل فقد الماء من النبات، كانت مقدرة النبات على تخزين المـاء أقل، كلما ازدادت حساسيةُ لتجفاف الشتاء. وتزداد أيضاً خطورة تجفاف الشتاء بازدياد حَتْ Abrasion طبقة الكيوتيكل بسبب الرياح، أو الحيوانـات، أو الفطريات الطفيلية Parasitic fungi (الشكل، 70).

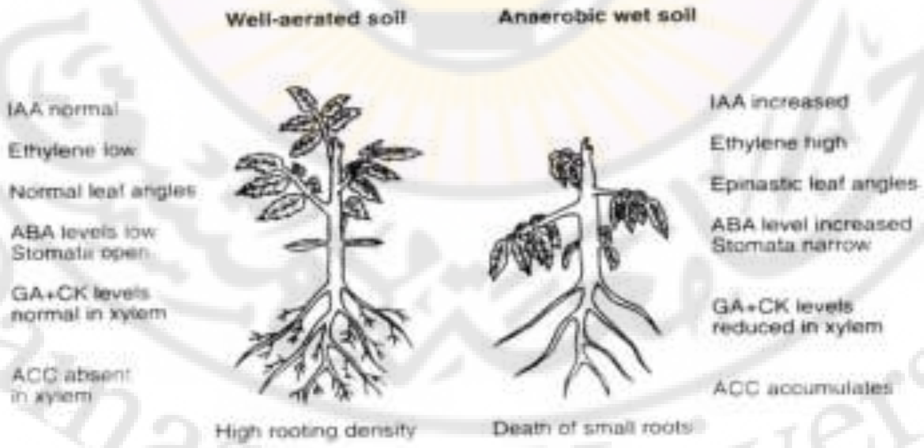


الشكل رقم (70): العوامل المؤدية للتجفاف الشتوي المزمن في المخروطيات بجبال الألب.

إجهاد نقص الأوكسجين Oxygen Deficiency: يحدث إجهاد نقص الأوكسجين في الترب الطينية الثقيلة سيئة الصرف والتهوية، وخاصةً عند الري بكمياتٍ زائدة من المياه (الري بالغمر أو التطويف)، أو في حال فيضان مياه الأنهار، بحيث تغرق الأراضي الزراعية القريبة من ضفافها، وتصبح تبعاً لذلك الأرض غدقة Waterlogged، حيث يعمل الماء على طرد الهواء من الفراغات البينية، ما يؤثر سلباً في تركيز الأوكسجين في منطقة انتشار الجذور. ويستهلك الأوكسجين في التربة من قبل جذور النباتات، والكائنات الحية الدقيقة Aerobic microorganisms. وينتشر الأوكسجين في الغلاف الجوي ببطء شديد إلى داخل التربة المغمورة، والرطبة، والثقيلة، ويصبح تبعاً لذلك معدل استهلاك الأوكسجين (O_2) أعلى من معدل انتشاره، فينخفض تركيزه بشكلٍ كبير في التربة، ويمكن أنْ ينعدم تماماً خلال عدة ساعات. وحالما يختفي الأوكسجين في التربة، فسوف تقوم الكائنات الحية الدقيقة بالتنفس اللاهوائي Anaerobic، محدثةً بيئة مرجعة Reducing milieu، توجد فيها H_2S, M_n^{+2}, Fe^{+2}، وحمض اللاكتيك Lactic acid، وحمض الزبدة Butyric acid بمستوياتٍ سامة. وتوجد فقط أنواع نباتية محددة في التربة دائمة الرطوبة، مثل نباتات المستنقعات Marsh plants، ونباتات الشواطئ Shore plants، والأنواع النباتية الأليفة للماء Hydrophytes. وتنتشر في التربة الغدقة

(المغمورة بالماء) أنواع نباتية محددة، مثل: *Taxodinm distichum*، وأنواع الحور species Populus، Salix، Alnus، Queras،(مثـل: *Q. nuttalli*، *Q. michanxii* في شمال أمريكا)، Nyssa، Mangrove، وأنواع النخيل Palm، مثل *Nypa fruticans*. ويشكل الغمر بالماء Inundation بالنسبة إلى الكثير من الأنواع النباتية عاملاً خطيراً، لأنه يؤدي إلى تحلل وتفسخ تلك النباتات خلال أيام أو أسابيع. وكقاعدة عامة: فإنَّ معظم الأنواع النباتية تموت بشكلٍ أسرع تحت ظروف الغدق Flooding بالمقارنة مع الجفاف Desiccation.

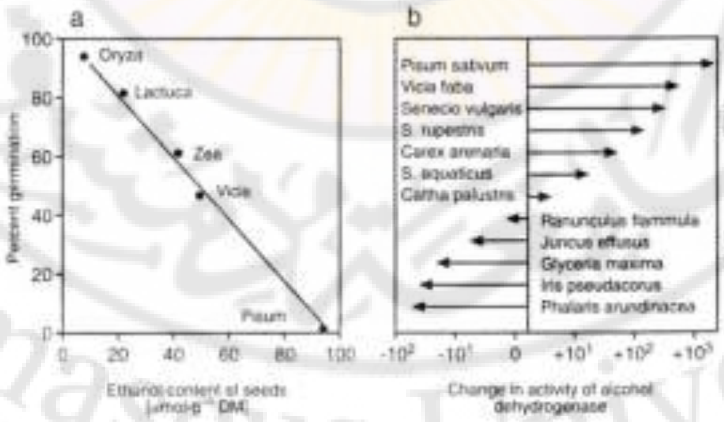
الاختلالات الوظيفية وأشكال الضرر Functional Disturbances and Patterns of Injury: من حيث المبدأ، تستطيع الخلايا النباتية أنْ تتنفس لاهوائياً، ولكن يؤدي ذلك خلال بضع ساعات إلى اضطرابات أيضية. وعندما ينخفض ضغط الأوكسجين O_2Partial pressure إلى نحو 1-5 كيلوباسكال (KPa) فإنَّ معامل التنفس Respiratory quotient(RQ) (مول CO_2/مول O_2) يرتفع إلى أكثر من 1. وعند هذه النقطة، سوف يتوقف نمو الجذور. ويُعد ازدياد محتوى التربة/ النبات من الإيثانول من الدلائل الخاصة على ظروف نقص الأوكسجين Oxygen Deficiency. وهنا يبدأ تصنيع حمض الأبسيسيك (ABA)، والإيثيلين Ethylene، وبوادئ الإيثيلين Ethylene precursors بكمياتٍ كبيرة، محرّضة المسامات على الانغلاق الجزئي، وتسبب في النهاية سقوط الأوراق (الشكل، 71)



الشكل رقم (71): مقارنة نباتات البندورة تحت ظروف نقص الأكسيجين في منطقة انتشار الجذور مدة يومين (اليمين)، وتحت ظروف الري الكامل بدون تغدق التربة (اليسار).

تحمل نقص الأكسجين Surviving Oxygen Deficiency

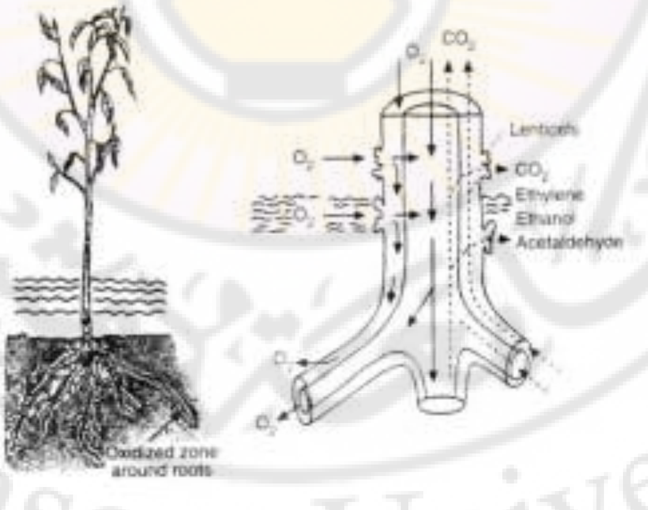
يمكن للعديد من الأنواع النباتية أنْ تنبت بذورها، وتنمو جذورها في البيئات التي تعاني من نقص في الأكسجين Anoxic environments، نتيجة تطويرها للعديد من الآليات التكيفية. تتمثل التكيفات الوظيفية لظروف نقص الأكسجين بعدم وجود الأنزيم Alcohol Dehydrogenase، أو عدم ازدياد نشاطه (ADH) خلال عملية التنفس اللاهوائي Anaerobiosis. ويمكن في الوقت نفسه أنْ تمتلك المقدرة على ضبط استقلاب البروتينات خلال بضع ساعات. ويُعد نشاط ADH من الدلائل الكمية لمدى حساسية نوع نباتي ما لظروف نقص الأكسجين (الشكل، 51 a). يبين الشكل العلاقة بين محتوى البذور من الإيثانول ونسبة إنبات البذور تحت ظروف نقص الأكسجين لدى بعض الأنواع النباتية المتباينة في حساسيتها لظروف نقص الأكسجين، وثمَّ فحص البذور بعد غمرها بالماء مدة ثلاثة أيام (Crawford,1977). ويبين الشكل (51 b) الزيادة (القيم الموجبة) والانخفاض (القيم السالبة) في نشاط الأنزيم Alcohol dehydrogenase في جذور أنواع نباتية متباينة في احتياجاتها للأوكسجين، بعد زراعتها مدة شهر واحد في ترب غدقة تفتقر للأوكسجين الكافي لتنفس الجذور. ويُلاحظ أنَّ نشاط هذا الأنزيم يزداد بشكلٍ كبير في الأنواع النباتية الحساسة، مثل البازلاء (*Pisnm sativnm*)، والفول (*Vicia faba*)، ما يؤدي إلى تراكم الكحول الإيثيلي Ethanol accumulation، وموت الخلية النباتية. أما في الأنواع المتحملة لظروف نقص الأكسجين، فيحدث تحويل إلى طرق استقلابية بديلة، ويتراجع نشاط الأنزيم ADH (الشكل، 72 b)، (McManmon and Crawfood,1971).



الشكل رقم (ab72): الحساسية للتغدق والتعديل لنقص الأكسيجين في بعض الأنواع المحصولية.

Damascus University

ومـن أهـم التكيفـات الشـكلية لبيئـات نقـص الأكسـجين، هـي تشـكيل أنسـجة التهويـة Ventilating tissues(parenchyma). حيـث تشـكل نباتـات المسـتنقعات، والأنـواع النباتيـة المحبـة للرطوبـة فراغـات داخليـة Interspaces فـي نسـيج المحيط الـدائر الفلينـي للجذور والأجزاء الهوائية. ففي الأنواع النباتية الراقية التي تعيش على اليابسة، مثل الرز Rice، والــذرة الصــفراء Corn، والشــعير Barley، والبنــدورة Tomato، تتشــكل الفراغـات الهوائيـة تحت ظروف نقص الأوكسجين، ويُعد تراكم الإيثيلين مؤشراً علـى تطـور وتشـكل الفجـوات الغازيـة Gas Lacunas. يكـون تركيـب نسـيج جـذور الـذرة الصفراء المزروعة في (a): وسط غنـي بالأكسجين ($20.6\%\ V/VO_2$)، أو (b): وسـط فقير بالأكسجين Hypoxia. سوف تتشكل فجوات غازيـة كبيرة (Ae: aerenchyma) نتيجة ازدياد نشاط الأنزيم Cellulase، ويمكن أن يحدث موت مبكر للخلايا في المحيط الدائر Cortex للجذر. ويشجع غاز الإيثيلين مثل هذه التفاعلات (He et al;1996). وفـي حـال وجـود فراغـات خلويـة داخليـة كبيـرة، فـإنَّ غـاز الأكسـجين يمكـن أنْ يصـل إلـى الأجزاء تحت الأيضية (الجذور) من الأجزاء الهوائية عن طريق الماء (الشكل، 73). وإنَّ الجذور المهواة بشكلٍ جيد يمكن أنْ تحرر الأكسجين إلى الوسط المحيط، حيث يُساعد هذا الأكسجين في تقليل سمية Detoxify الموارد المرجعة الضـارة، مثل FeCIII Oxide K precipitating Fe^{+2}.



الشكل رقم (73): يبين نظام التهوية في الجذور والسوق.

عموماً، تتراوح نسبة الفجوات الغازية لدى نباتات المستنقعات بين 20-50% في حين لا تتجاوز 5% في نسيج الجذور الفليني عندما تكون التربة مهواة بشكلٍ جيد. وإنَّ النباتات المزروعة في الترب الطينية الثقيلة سيئة الصرف والتهوية عادةً ما تشكل جذوراً ثانوية تنتشر قرب سطح التربة للحصول على الأكسجين اللازم لتنفس الجذور. وفي المناطق المغمورة بمياه الفيضانات تطور الجذور والأغصان المغمورة حزمة من الجذور المائية Water roots (مثال: أنواع الحور Populus، Salix، Alnus، Fraxinus، Acer، Eucalyptus، وبعض الأنواع المخروطية Conifers).

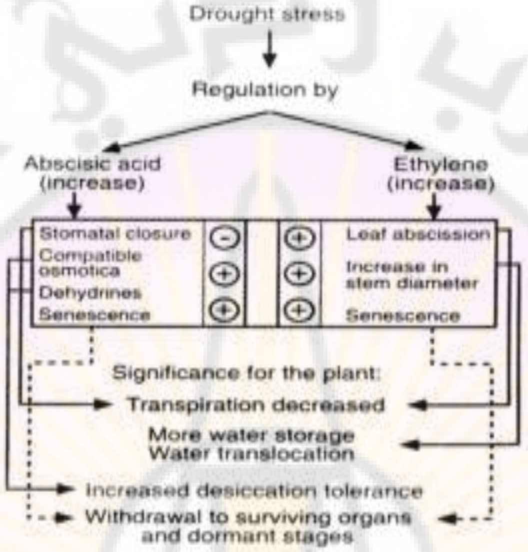
الجفاف Drought:

تتعرض النباتات للجفاف عندما تكون كمية المياه المتاحة في التربة قليلة جداً، أو عندما تصبح كمية المياه الممتصة عن طريق المجموعة الجذرية غير كافية لتعويض الماء المفقود بالنتح. ويمكن أنْ يحدث الجفاف، إما نتيجة تراجع محتوى التربة المائي Soil dryness، وازدياد معدل فقد المياه بالتبخر High evaporation، أو نتيجة الربط الحلولي Osmotic binding للماء بالذائبات المعدنية المنحلة، كما هو الحال في الترب المتملحة Saline soils، أو نتيجة تجمد التربة Frozen soils. ويمكن أنْ يحدث الجفاف في الترب الضحلة Shallow soils، عندما تفشل النباتات في تشكيل مجموع جذري بحجم كافٍ لامتصاص كمية من المياه كافية لتعويض احتياجات النبات النتحية. وإنَّ ما يميز الإجهاد المائي (الجفاف) عن باقي الإجهادات اللاأحيائية الأخرى، أنّه لا يحدث بشكلٍ مفاجئ، ولكن يتطور ببطء، وتزداد شدته بازدياد مدتهِ، ويؤدي عامل الزمن هنا دوراً مهماً في تحديد مقدرة النباتات على تحمل الجفاف. ويدل مصطلح الجفاف Drought على الفترة من الموسم التي تهطل خلالها الأمطار بكمياتٍ غير كافية، ما يؤدي إلى تراجع محتوى التربة المائي نتيجة استمرار عملية فقد المياه بالتبخر- نتح إلى المستوى الذي يجعل النباتات تُعاني من نقص المياه. ولا يحدث الجفاف عادةً نتيجة قلة الأمطار فقط، ما لم يترافق ذلك مع زيادة معدل فقد المياه بالتبخر (في حال ازدياد شدة السطوع الشمسي، وازدياد سرعة الرياح، وارتفاع حرارة الوسط المحيط، وانخفاض الرطوبة النسبية الجوية RH%). وإنَّ قرابة ثلث مساحة اليابسة تعاني من عجزْ في الأمطار Rain deficit، وإنَّ نصف هذه المساحة (12% من مساحة الأرض) جافة جداً، بحيث لا يتجاوز فيها معدل الهطول المطري السنوي أكثر من 250 مم، وهذا لا يعادل ربع معدل فقد الماء بالتبخر من تلك المناطق. وتسمى هذه المناطق بالمناطق الجافة Arid zones.

الأضرار الناجمة عن الجفاف Drought Damages

يؤدي تعرض النباتات إلى ظروف الجفاف إلى تراجع حجم الخلية النباتية Cell volume، وزيادة تركيز الذائبات في نسغ الخلية، وازدياد درجة تجفاف البروتوبلاسم. ويمكن القول إنَّ الجفاف يؤثر في جميع العمليات الحيوية في النبات، ابتداءً من استطالة الخلايا النباتية وانتهاءً بعملية نقل نواتج التمثيل الضوئي من المصدر إلى المصب. إنَّ تراجع جهد الامتلاء Turgor potential، ومن ثمَّ تثبيط استطالة خلايا الأوراق، وتوقف نموها، يعدُّ من أكثر العمليات الفسيولوجية حساسية للجفاف. ويؤثر أيضاً الجفاف بسرعة في استقلاب البروتينات وتصنيع الأحماض الأمينية. ومن بين الأنزيمات التي تثبط بشكلٍ كبير بتأثير الإجهاد المائي Nitrate reductase، حيث يؤدي تعرُّض النباتات لفترةٍ زمنية وجيزة للجفاف إلى تراجع نشاط هذا الأنزيم بنسبة 20%. وهذا ما يفسر ارتفاع تركيز النترات في النباتات المسَّمدة تحت ظروف العجز المائي، وخاصةً عند تعَّرض النباتات للإجهاد المائي لفترة زمنية أطول، حيث تصل نسبة الانخفاض في فعَّالية الأنزيم Nitrate reductase إلى 50%. وتُعد أيضاً عملية التثبيت الحيوي للآزوت الجوي بوساطة العقد البكتيرية Nodules المتعايشة مع جذور المحاصيل البقولية، حساسة جداً لظروف الإجهاد المائي. ويؤدي تعَّرض النباتات إلى ظروف الجفاف المتزامن مع الحرارة المرتفعة خلال مرحلة الإزهار Anthesis إلى فشل عملية التلقيح Pollination، بسبب جفاف المياسم Stigma، ومن ثمَّ صعوبة مكوث حبوب الطلع عليها لفترة زمنية كافية لتشكيل الأنبوبة الطلعية Pollen tube بالطول الكافي، حيث تتطاير حبوب الطلع بمجرد هبوب الرياح. ويؤدي ذلك أيضاً إلى فشل عملية الإخصاب Fertilization، بسبب تراجع حيوية حبوب الطلع، وعدم تمكنها من تشكيل أنبوبة لقاح بالطول الكافي لاختراق القلم وصولاً إلى المبيض Ovary لإيصال الوحدات التكاثرية المذكرة إلى البويضات القابعة في المبيض. الأمر الذي يؤثر سلباً في نسبة العقد Setting، ومن ثمَّ عدد البذور/ الحبوب المتشكلة في النبات. ويؤدي تعرُّض النباتات إلى مستوى معتدل Moderate من الإجهاد المائي إلى تحفيز Trigger تصنيع حمض الأبسيسيك (ABA) من الكاروتينات Carotinoids في الجذور، ثمَّ تُنقل هذه الإشارة الكيميائية من الجذور إلى الأجزاء الهوائية Root to shoot chemical signal، وتحث مسامات الأوراق على الانغلاق لتقليل معدل فقد الماء بالنتح. ويبين الشكل (74) مخطط التنظيم الهرموني استجابة لظروف الجفاف، حيث يلاحظ أنَّ ازدياد تركيز حمض الأبسيسيك يؤدي إلى تراجع (-) الناقلية المسامية Stomatal conductance، وازدياد معدل تصنيع الذائبات العضوية التوافقية Compatible organic، وازدياد معدل تصنيع

بعـــض البروتينـــات الوقائيـــة مثـــل Dehydrines، والشـــيخوخة المبكـــرة لـــلأوراق Premature leaf senescence.



الشكل رقم (74): مخطط التنظيم الهرموني استجابة لظروف الجفاف.

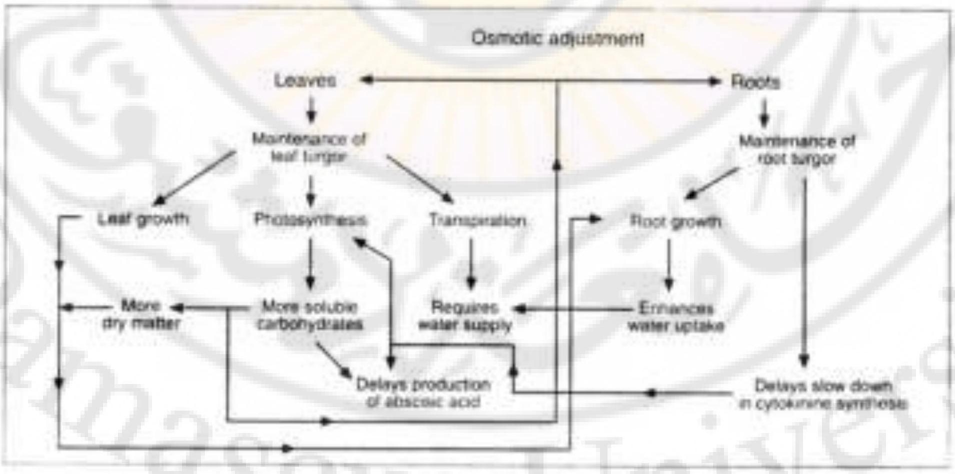
ويُلاحظ بالمقابل ازدياد معدل تساقط الأوراق Leaf abscission، الذي يقلل بـدوره مـن معدل فقد الماء بالنتح، نتيجة تقليل مساحة المسطح الأخضر المعرَّض بشكلٍ مباشر لأشـعة الشـمس. ويـؤدي إلـى زيـادة قطـر السـاق Stem diameter، الأمـر الـذي يُسـهم فـي زيـادة مقـدرة النبـات علـى تخـزين كميـة أكبـر مـن المـاء، وإيصـالها إلـى الأوراق لتعـويض المـاء المنتـوح. ويسـبب ازديـاداً فـي معـدل شـيخوخة الأوراق أيضـاً (Pospisilova,2002). ويحـدث نتيجـة تصـنيع الهرمونـات الآنفـة الـذكر فـي الجـذور والأوراق اسـتجابة لظـروف الجفاف العديد من التغيرات، أهمها:

1- تغير في توزيع نواتج التمثيل الضوئي بين أجزاء النباتات المختلفة.
2- تُغيـر معـدل نمـو الأجـزاء الهوائيـة والأجـزاء الأرضـية، وعـادةً مـا تـزداد نسـبة الجذور إلى الأجزاء الهوائية Root/shoot ratio.
3- ظهـور بعـض الصـفات الشـكلية التكيفيـة (تـزداد كثافـة الزغـب، وتـزداد سـماكة الطبقات الفلينية، وتصبح الأفرع شوكية، وتزداد سماكة الطبقة الشمعية،...الخ).

4- التبكير بالإزهار، وتسريع عملية نضج البذور، وتضرر الأجزاء الزهرية (تراجع حيوية حبوب الطلع، انخفاض عدد البويضات، وازدياد نسبة الزهيرات المجهضة).

وفي حال استمرار الجفاف، وازدياد شدتهِ، يصبح معدل الهدم أعلى من معدل البناء، الأمر الذي يُسرِّع من شيخوخة الأوراق القديمة، وتموت وتتساقط.

وتحت ظروف الإجهاد تختلط عادةً العمليات المدمرة والاستجابات الدفاعية Defense responses. وعندما يبدأ جهد الامتلاء بالانخفاض تنشط عملية التعديل الحلولي Osmoregulation (الشكل، 75). يبدأ النبات بتصنيع المركبات العضوية التوافقية ذات الوزن الجزيئي الصغير (السكريات الذوَّابة في الماء، والمركبات الآزوتية العضوية) التي تتراكم في سيتوبلاسم الخلية النباتية، وتعمل على خفض الجهد المائي ضمن الخلايا النباتية (الجذور والأوراق)، فيزداد فرق التدرج في الجهد المائي بين النبات والوسط المحيط، ما يسمح باستمرار تدفق الماء Water influx من التربة إلى داخل النبات، وصولاً إلى الأوراق، للمحافظة على محتوى الخلية النباتية المائي، وحجم الخلية، وتؤخر تراجع جهد الامتلاء في خلايا النسيج المتوسط في الأوراق، ما يسمح باستمرار انفتاح المسامات، وحدوث عملية التبادل الغازي (التأثير المبرد للنتح، واستمرار انتشار الكربون)، الأمر يحافظ على كفاءة النبات التمثيلية وخاصةً في المناطق شبه الجافة (تحت ظروف الزراعة المطرية).



الشكل رقم (75): التأثيرات الناتجة عن التعديل الحلولي في الأوراق والجذور.

أما في حال فشل النباتات في التعديل الحلولي، والمحافظة على ميزان العلاقات المائية، فسوف تظهر علائم الذبول Wilting على الأوراق، وتنكمش الخلايا النباتية (Cytorrhysis)، وتتشوه مكونات الخلية النباتية، وتلاحظ الظواهر الآتية قبل موت الخلية بقليل:

1- تتجزأ الفجوة المركزية Central vacuole إلى فجوات صغيرة.
2- ينتفخ غشاء الصّانعة الخضراء الداخلية ثمَّ يتخرب، وغشاء الكريستي Cristae في الميتوكوندرية.
3- يبدأ غشاء النواة بالانتفاخ.
4- تختفي الريبوزومات العديدة Polyribosomes.

ويتوقف مصير الخلية على مقدار الضرر الحاصل في الأغشية الحيوية لمختلف المكتنفات الخلوية المهمة، ويؤدي تخرب هذه الأغشية إلى موت الخلية.

آليات مواجهة الجفاف Mechanisms of Drought Survival

الهروب من الجفاف Drought Escape: توجد العديد من آليات الهروب من الجفاف، أهمها، أنَّ بذور بعض الأنواع النباتية الحلولية المنتشرة في البيئات الجافة Ephemerals، لا تنبت إلاَّ بعد هطول الأمطار بكمياتٍ كبيرة، تكفي لإتمام عمليتي الإنبات، واستر ساء البادرات بشكلٍ جيد، وتكمل النباتات دورة حياتها بشكلٍ سريع. ولكن حتى تتمكن نباتات هذه الأنواع من الإزهار خلال فترات توافر المياه فيجب أنْ تكون حيادية بالنسبة إلى طول الفترة الضوئية Photo insensitive، بحيث تتمكن النباتات من إنهاء مرحلة النمو الخضري والدخول مباشرة بمرحلة الإزهار حالما تستشعر خطر الجفاف، تُسمى هذه الآلية اصطلاحاً Pluviotherophytes. وجميع النباتات من هذا النوع تبقى على قيد الحياة خلال فترات الجفاف على شكل بذور ساكنة، وتتميز بذور مثل هذه الأنواع النباتية باحتوائها على كميةٍ كبيرة من موانع الإنبات (حمض الأبسيسيك، والمركبات الفينولية). وتمتلك بعض الأنواع النباتية أعضاء تحت أرضية مخزنة للماء Water storing belowground organs، مثل الريزومات Rhizomes، والدرنات Tubers، والبصيلات Bulbs، وتُسمى هذه الأنواع اصطلاحاً Geophytes. ويمكن لتلك الأنسجة خلال مدة هطول الأمطار، أنْ تعطي أجزاء هوائية كاملة دفعة واحدة باستعمال الكربوهيدرات المخزونة فيها، وتتمكن تلك الأجزاء الهوائية من الإزهار وإعطاء الثمار خلال فترة زمنية قصيرة جداً.

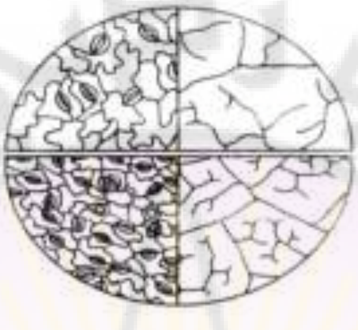
تجنب الجفاف Drought avoidance: يمكن تجنب الجفاف بإحدى ثلاث طرق:

1- **تحسين معدل امتصاص المياه Improved water uptake:** وذلك من خلال تشكيل مجموع جذري متعمق ومتشعب قادر على التغلغل إلى طبقات التربة العميقة الرطبة، مع وجود مساحة كبيرة من سطوح الامتصاص الفعَّالة، حيث تتمكن مثل هذه المجاميع الجذرية من استخلاص كمية أكبر من المياه، كافية لتعويض الماء المفقود بالنتح. ويمكن لجذور الأنواع النباتية المنتشرة في البوادي والصحارى أنْ تصل إلى أعماق حتى 2-5 م. وتمتلك بادرات النباتات الخشبية المنتشرة في المناطق الجافة جذوراً وتدية بطول يفوق ارتفاع الأجزاء الهوائية بنحو عشرة أضعاف، في حين تشكل الحوليات العشبية Grasses في مثل هذه البيئات مجاميع جذرية كثيفة، وترسل جذوراً خيطية إلى أعماق تصل لعدة أمتار، وبذلك يمكنها أنْ تستفيد من مياه الأمطار القليلة التي تتركز ضمن طبقات التربة السطحية، وفي الوقت نفسه تستخلص المياه من طبقات التربة العميقة الرطبة. وبشكلٍ عام تكون نسبة الجذور إلى الأجزاء الهوائية عالية، وتزداد هذه النسبة بازدياد مدة الجفاف وشدتهِ. ولكن تكمن المشكلة في وجود بعض العوامل المعيقة لانتشار الجذور وتغلغلها، مثل انضغاط التربة، أو وجود طبقات تحت سطحية صماء، أو في حال الترب الضحلة، فالأنواع النباتية وخاصة الأنواع الحراجية المنتشرة في مثل تلك البيئات، وضمن تلك الظروف، عادةً ما تكون مهددة بالزوال بتأثير الجفاف.

2- **تحسين المقدرة على التوصيل المائي Water conducting capacity:** ويمكن زيادة كمية المياه الواصلة إلى الأجزاء الهوائية من خلال زيادة كفاءة الأوعية الخشبية الناقلة Xylem، وذلك من خلال زيادة عدد الأوعية الناقلة الخشبية، أو زيادة أقطار الأوعية الخشبية، أو زيادة كثافة عروق الأوراق، أو تقليل مسافة النقل Transport distance، من خلال تقصير أطوال السلاميات Shorter internodes. وإذا ما انخفضت في الوقت نفسه مساحة المسطح الورقي القابل للنتح فإنَّ المساحة النسبية للأنظمة الناقلة سوف تزداد حتى بدون حدوث أي تغيير فيها، أي تصبح كمية المياه الممتصة وإنْ قلَّت كافية لتغطية احتياجات النبات النتيجة. عموماً، تسمى الأنواع النباتية التي تزيد من معدل امتصاص الماء للمحافظة على ميزان العلاقات المائية داخل الخلايا النباتية اصطلاحاً بمنفقات الماء Water spenders.

3- **تقليل معدل فقد المياه بالنتح Reduction of Transpiration:** ويمكن تحقيق ذلك بشكلٍ رئيس من خلال تقليل الناقلية المسامية، أو إغلاق المسامات بشكلٍ كامل. ومن التغيرات التكيفية الملاحظة على أوراق الأنواع النباتية المنتشرة في البيئات الشحيحة بالمياه، تشكيل مسامات صغيرة وبكثافة كبيرة في الأوراق (الشكل، 76)، حيث تسمح مثل هذه التحورات للأوراق بتقليل معدل فقد الماء بالنتح، من خلال الضبط السريع لحركة المسامات، فعندما تكون المسامات صغيرة، فإنَّ أي تراجع في محتوى التربة المائي يؤدي إلى تقليل كبير في ناقليتها المسامية بتأثير الإشارة الكيميائية، ويشمل هذا التأثير عدد كبير من المسامات الموزعة على كامل مساحة الأوراق، لذلك تكون كمية الماء المفقودة بالنتح أقل بالمقارنة مع وجود عدد أقل من المسامات الكبيرة. ويبين الشكل كثافة المسامات والعروق في الأوراق لنباتات

الفاصولياء المزروعة في وسط يحتوي على كميات كافية من المياه (الجزء الأعلى) بالمقارنة مع تلك المزرعة في وسط فقير بالمياه (الجزء الأسفل) (Tumanov, 1927).

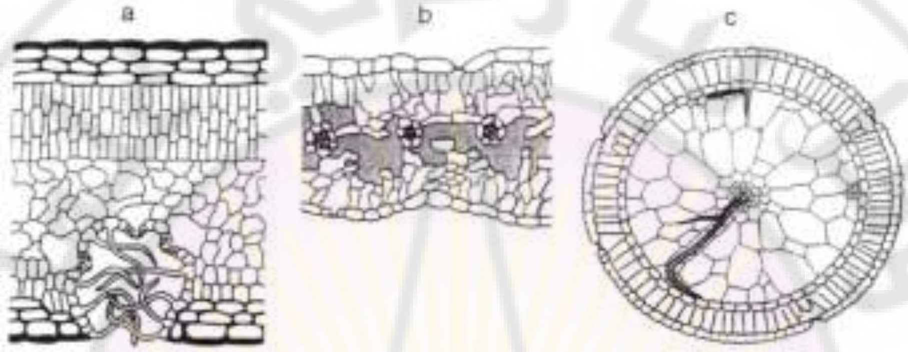


الشكل رقم (76): كثافة المسامات والعروق على أوراق نباتات الفاصولياء المزروعة تحت ظروف الري الكامل (الجزء الأعلى)، وتحت ظروف الإجهاد المائي (الجزء الأسفل).

وعادةً ما تكون جدر خلايا الأدمة الخارجية لأوراق هذه الأنواع النباتية كيتينية Cutinized متغلظة، وتغطيها طبقة سميكة من الترسبات الشمعية. حيث تشكل حاجزاً فيزيائياً يعيق حركة الماء من الأوراق إلى الوسط المحيط، بالإضافة إلى أنَّ الترسبات الشمعية Waxy deposits تعمل على عكس Reflection الأشعة الشمسية، وبالتالي تقلل من كمية الأشعة الشمسية الممتصة من قبل الأوراق، وتحول دون ارتفاع درجة حرارتها.

ومن التكيفات التي يمكن أنْ تقلل من فقد الماء بالنتح، أنْ تتركز المسامات فقط على الوجه السفلي للأوراق (الأقل تعرضاً لأشعة الشمس)، وتكون المسامات غائرة، وغالباً مغطاة بطبقة كثيفة من الزغب (الشكل، 77). وفي مثل هذه الحالة سوف تزداد مقاومة طبقة الهواء الساكنة المحيطة بسطح الأوراق Boundary layer لتدفق الماء، ويصبح الهواء خارج المسامات أكثر رطوبة الأمر الذي يقلل من فرق التدرج في ضغط بخار الماء (VPD)، ومن ثمَّ معدل فقد الماء بالنتح. ويُساعد أيضاً التفاف الأوراق Leaf rolling في تقليل معدل النتح، من خلال أيضاً تقليل مساحة السطح المعَّرض بشكلٍ مباشر لأشعة الشمس. ويمكن تقليل معدل فقد الماء بالنتح بشكلٍ فعَّال من خلال التخلص من بعض الأوراق أو جميعها، حسب شدة الإجهاد المائي Abscission of leaves، ما يسمح بتقليل مساحة المسطح القابل للنتح. وتُعد أيضاً مقدرة النباتات (وخاصةً الأنواع النباتية الصحراوية) على تخزين المياه في الأنسجة

العصـارية من أهـم الآليـات المرتبطـة بتجنـب الجفـاف وخاصـةً إذا مـا اقترنـت بتقليـل مسـاحة السـطح القابـل للنـتح (أوراق إبريـة مختزنـة)، مـع وجـود مقاومـة عاليـة لخلايـا الأدمة الخارجية لفقد الماء.



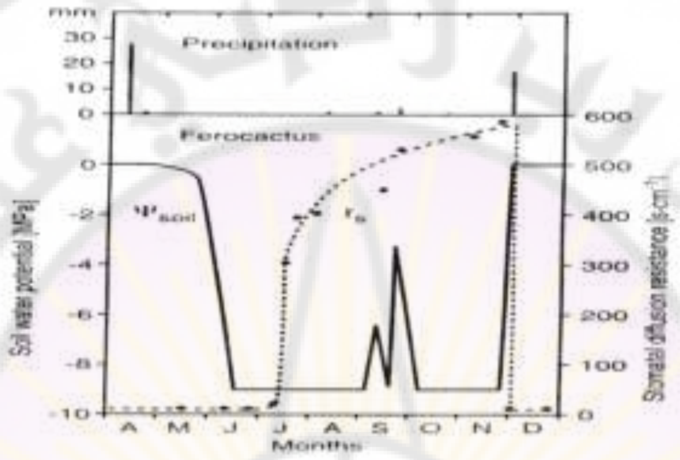
الشكل رقم (77): أمثلة مختلفة لتراكيب الأوراق لبعض الأنواع النباتية المتحملة للجفاف.

وتحـدد المقـدرة علـى تخـزين الميـاه مـن خـلال قيـاس درجـة العصـارية Degree of succulexce (Delf,1911; Stocker, 1928):

$$\text{درجة العصارية} = \frac{\text{محتوى الأنسجة المائي عند حدِّ الإشباع}}{\text{مساحة السطح}} \quad (\text{غ. دسم}^{-2})$$

وتُلاحظ عـادةً الـدرجات العاليـة مـن العصـارية (10غ . دسم $^{-2}$ بالعلاقـة مـع مسـاحة كامـل الورقة) في النباتـات العشـبية المتكيفـة مـع التـرب الجافـة والمالحـة، فـي حـين تصـل درجـة العصـارية فـي أوراق النباتـات مـع البيئـات شـبه الرطبـة، إلـى 1-3غ . دسم$^{-2}$. وفـي ظـل ظـروف معينـة، فـإنَّ النباتـات العصـارية Succulent plants يمكـن أنْ تبقـى علـى قيـد الحياة لعدة سنوات تحت ظروف الجفاف. ويمكن أنْ تكون المدخرات المائيـة بعد آخر هطول مطري كافيـة لعدة أسابيع، قبل أنْ تصبح المسامات مغلقة بشكلٍ كامل، وتحتفظ النباتـات العصـارية بالمـاء ضـمن أنسـجة مخصصـة لتخـزين الميـاه Water-storage tissues (الشـكل، 58)، التـي عـادةً مـا تكـون متوضـعة فـي الأجـزاء الداخليـة لـلأوراق والسوق. ويبين الشكل (78) العلاقـة بين تراجـع الجهـد المـائي للتربـة وازديـاد المقاومـة

المسـامية لفقد بخـار المـاء فـي النـوع النبـاتي *Feracactus acanthates* فـي صـحـراء كولوراد، خلال أشهر الجفاف (Nobel, 1977).



الشكل رقم (78): ازدياد المقاومة المسامية بازدياد تراجع محتوى التربة المائي.

تحمل الجفاف Drought tolerauce: يختلف تحمل الجفاف باختلاف النوع النبـاتي، وباختلاف مقدرة البروتوبلاسم التكيفية على تحمل مستويات شديدة جداً لفقد المياه. وإنَّ جميع الأنواع النباتية التي تتحمل الجفاف تستطيع البقاء على قيد الحياة حتى عند درجاتٍ متطرفة من جفاف الخلية، من خلال التحول إلى الحالة السريرية، حيث تتوقف تماماً جميع العمليات الأيضية. ومع ازدياد شدة جفاف الخلايا النباتية سوف يتم تصنيع بروتينات، أو ببتيدات عديدة، ونواتج استقلاب جديدة مرتبطة بالإجهاد (البرولين، والرافينوز Raffinose، و Trehalose)، أو يتم تحريرها من مدخرات الخلية النباتية. وخلال مرحلة الإجهاد المائي (الجفاف). يتفعل برنامج الدفاع الجزيئي، المتمثل ببدء التعبير الوراثي Gene expression لبعض المورثات المسؤولة عن تصنيع بعض البروتينات الدفاعية Stress proteins (Dehydrin, Osmotin).

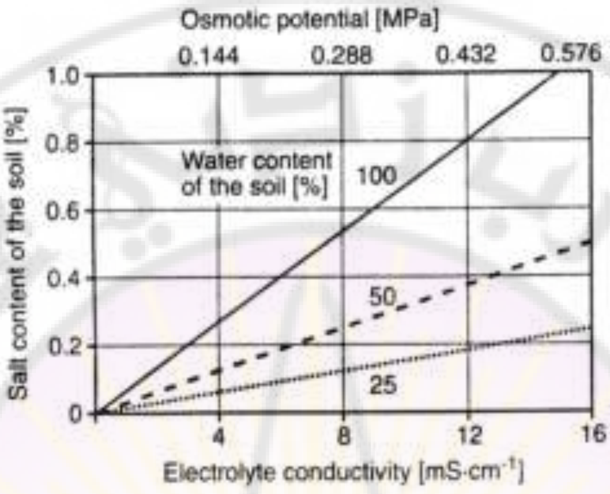
تعمل هذه البروتينات على وقاية البروتينات في السيتوبلاسم، وفي النواة، والأغشية الحيوية من التخرب Denaturation. ويتضمن تحمل الجفاف أيضاً مقدرة البروتوبلاسم على استعادة الترطيب Dehydration بطريقة منظمة ومنسقة لا تضر بتركيبها، أو تخل باستقرار مكوناتها، وذلك عندما يصبح الماء متاحاً.

الإجهاد الملحي Salt stress:

تُعَّرف البيئات المتملحة بتلك التي تحتوي على تركيز مرتفع من الأملاح الذَّوابة Soluble salts. وتُعد المحيطات، والبحيرات، والبرك المتملحة بمنزلة مواطن مائية متملحة Aquatic saline habitat، ويوجد على اليابسة ترب متملحة Saline sails تحت كلٍ من الظروف المناخية الرطبة والجافة. وإنَّ الترب المتملحة تغطي تقريباً 6% من مساحة اليابسة. ويبقى تركيز الأملاح ثابتاً فقط في المحيطات المفتوحة (بالمتوسط 480 ميللي مولر Na^+، 560 ميللي مولر Cl^-: وهذا يعادل 3% محلول ملحي NaCl). وتزداد ملوحة التربة في المناطق الجافة، لأنَّ معدل فقد الماء بالتبخر يعيق كمية الأمطار الهاطلة والراشحة إلى باطن التربة، الأمر الذي يؤدي إلى تَركُزْ الملاح في محلول التربة.

ويحدث التملح الثانوي Secondary salinization تحت ظروف الزراعة المروية، عند اعتماد طريقة الري بالغمر أو بالتطويف، باستعمال مياه ذات نوعية سيئة (تحتوي على تركيز مرتفع من الأملاح الذوّابة)، وفي حال غياب الصرف العميق، سوف يرتفع منسوب الماء الأرضي، وتصعد المياه المحملة بالأملاح بالخاصية الشعرية، ولاسيما خلال فصل الصيف الجاف والحار، وتؤدي الحرارة المرتفعة إلى تبخر الماء، في حين تتزهر الأملاح فوق سطح التربة، وعلى مرَّ السنين تصبح الترب متملحة. وإنَّ الترب المتملحة في المناطق الرطبة Humid region تحتوي بشكلٍ رئيس على ملح كلور الصوديوم NaCl. وتحتوي الأراضي في البوادي Steppes، والصحاري Deserts سلفات وكربونات الصوديوم، والمغنزيوم، والكالسيوم، وهذه الأملاح تجعل تلك الترب أكثر قلوية Alkaline. ويُعَّبر عن الملوحة عادةً بمصطلح الناقلية الكهربائية Electrical conductivity، وتقدَّر ملوحة التربة على أساس الناقلية الكهربائية لمستخلص عجينة التربة المشبعة (EC_e)، وتستعمل الواحدة $ds.\ m^{-1}$. ويبين الشكل (79) العلاقة بين محتوى الملاح (%) في التربة، والناقلية الكهربائية لمحلول عجينة التربة المشبعة (EC_e)، والجهد الحلولي للتربة (MPa) (Marschner, 1995). وتقَّدر الناقلية الكهربائية لمياه البحر بنحو 44 $ds.\ M^{-1}$.

Damascus University



الشكل رقم (79): العلاقة بين محتوى الأملاح، ومحتوى الماء النسبي، الناقلية الكهربائية.

تـأثير تركيز الأمـلاح المرتفعـة فـي النبـات Effect of high salt concentration on Plants: يتمثل تـأثير ارتفـاع تركيـز الأمـلاح الذوّابـة فـي محلـول التربـة بنـوعين مـن التأثيرات:

1- **التـأثير الحلـولي Osmotic effect:** حيث تعمـل جزيئـات الملـح علـى شَدْ/ مسـك جزيئات الماء، مقللةً بذلك من عدد جزيئات الماء الحرة (يصبح الجهد المائي أكثر سلباً)، فيقل فرق التدرج في الجهد المائي بين النبات والوسط المحيط، فتقل كمية المياه الممتصة.

2- **السُمية الأيونية النوعية Specific ionic toxicity:** إذ يسـبب ارتفـاع تركيـز بعـض الشـوارد السامة المعدنيـة، وخاصـةً شاردتي الصـوديوم (Na^+)، والكلـور (Cl^-) فـي سيتوبلاسم الخليـة النباتيـة سيؤدي إلـى تخريب الأنزيمـات، والبروتينـات، والأغشية الحيوية، بالإضافة إلى إحداث خلل في التـوازن الشـاردي Ionic balance (K^+، Ca^{+2}، وغلى شوارد Na^+).

وإذا كان هذان التأثيران أكبر من مستوى تحمل النبات للملوحة، فإنَّ الملوحة تسبب اختلالاً وظيفياً Functional disturbance، وضـرراً فـي المكونـات الخلويـة، وتتـأثر عمليـة التمثيل الضوئي ليس فقط نتيجة انغلاق المسامات، وإنما نتيجة تـأثير الشـوارد المعدنيـة السامة في الصـانعات الخضـراء، ولاسيما في عملية نقـل الإلكترونـات فـي سـلسلة نقل الإلكترونات والعمليات الثانوية الأخرى. وعندما يكون محتوى التربة من ملح

Na Cl عالياً فإنَّه سيؤثر في امتصاص العناصر المعدنية المغذية الأخرى، وخاصةً النترات NO_3^-، والبوتاسيوم K^+، والكالسيوم Ca^{+2}. وتُعد عمليات النمو Growth processes حساسةً بشكلٍ خاص لتأثير الملوحة، لذلك تُساعد مؤشرات معدلات النمو، وإنتاج الكتلة الحية ونسبة الانخفاض فيها في تقويم شدة الإجهاد الملحي وبشكلٍ دقيق، ومقدرة النبات على تحمل الإجهاد الملحي Salt stress.

وفي الأنواع النباتية المحبة بشكلٍ حقيقي للملوحة Obligatory (euhalophytes) halophytes، مثل Salicornica، والروثا Salsols، والسويدة Suaeda، وHalocnemum، التي يقتصر انتشارها على البيئات المتملحة، فإنَّ نمو نباتات مثل هذه الأنواع يزداد بامتصاص كميات متوسطة من الأملاح (الشكل، 61)، وتتضرر هذه النباتات، وتظهر عليه أعراض الإجهاد الملحي فقط في حال وصل تركيز الأملاح إلى مستويات عالية جداً، وتتجلى أعراض الإجهاد بإنتاج الأنثوسيانين Anthocyanin، وتحطم جزئيات اليخضور. أما الأنواع النباتية المحبة للملوحة الاختيارية Facultative halophytes (مثال، أنواع العائلة النجيلية Poaceae، والسعدية Cyperaceae، و Juncaceae، *Glaux maritima*، *Plantago maritima*، *Aster tripolium*)، فهي الأنواع النباتية يمكن أن تنمو وتتكاثر في البيئات المتملحة، ولكن نمو النباتات سرعان ما يُثبط حالما يرتفع تركيز الأملاح عن مستوىً معين. وهناك بعض الأنواع النباتية التي تنتشر في البيئات المتملحة، ولكنها تتحمل الملوحة الخفيفة، مثل طرز *Festuca rubra*، *Agrostis stolonifera*، *Phragmites communis*، وكذلك أنواع أو تحت أنواع Puccinellia، Lotus، و *Atriplex hastata*، وبعض الأنواع المحصولية مثل، *Vigua unguiculata*، والشوندر السكري Sugar beet. ويؤدي امتصاص الأملاح من قبل الأنواع غير المحبة للملوحة Halophobic إلى توقف النمو، وأحياناً موت النبات. وتُعد مرحلتي الإنبات Germination، والنمو الأولي للبادرات Young plants من أكثر المراحل حساسية للملوحة. ويُعزى ذلك إلى حقيقة أنَّ جذور النباتات الصغيرة (البادرات) تنتشر فقط في طبقات التربة السطحية، التي تحتوي على أعلى تركيز من الأملاح، لذلك يجب التأكد من خلو مهد البذور، وطبقة التربة العلوية من الأملاح لضمان إنبات البذور بنجاح، ونمو البادرات إلى حين تشكل جذور متعمقة بعيداً عن منطقة انتشار الأملاح. وتستطيع بذور أنواع قليلة جداً من النباتات المحبة للملوحة (الطرفاء Tamarix، *Sueada cepressa*، *Halocnemum strobe* laceum، و *Salsola baryosma*) أنْ تنبت عند ملوحة 30-40 $ds.\ m^{-1}$ (عند جهد حلولي يعادل 1-2 MPa). وإنَّ الحد الأعلى من الملوحة للإنبات هو 15-20 $ds.\ m^{-1}$ (حوالي 0.5-

(MPa 0.7) ومـادون. وتسـبب الملوحـة الزائـدة تقـزم النباتـات Dwarfism وتثبـيط نمـو الجذور.

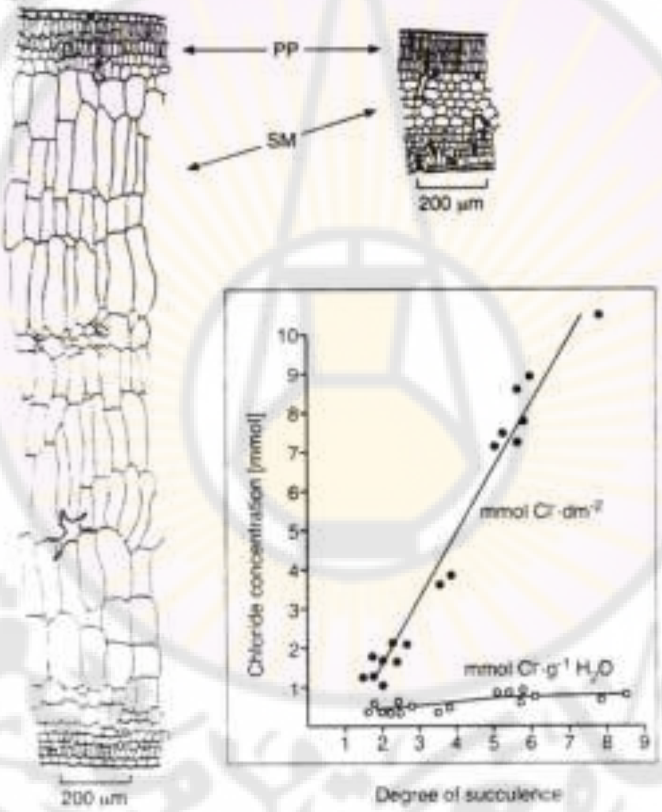
آليـات تحمـل الملوحـة Survival in Saline Habitats: إنَّ النباتـات الناميـة فـي البيئـات المتملحـة لا تسـتطيع أنْ تتجنـب تـأثيرات الملوحـة، لـذلك يتوجـب عليهـا أنْ تطـور بعض آليات التحمل. وتُعرف مقاومة الملوحة Salt resistance، بأنّها مقدرة الباتـات إما أن تتجنب، (بوساطة تنظيم الأملاح Salt regulation) وصول كمياتٍ زائدة من الأمـلاح إلى البروتوبلاسم، أو أنْ تكون قادرة فعلاً على تحمل التـأثيرات الحلوليـة والسمية الناجمـة عن ارتفاع تركيز الأملاح في وسط النمو.

أولاً- تنظيم محتوى الأملاح Regulation of Salt Content:

تستطيع الأنواع النباتية المحبة للملوحة Halophytes أنْ تنظم محتواها من الأمـلاح بعـدة طرائق:

1- **طرد الأمـلاح Salt exclusion:** لقد طـورت الأنـواع النباتيـة العديد من آليـات طرد الأملاح، فعلـى سبيل المثـال، تمتلـك أنـواع المـانغروف (النباتـات الشـاطئية) Mangrove species وسـائل تنقيـة فـي الجـذور Filtration in the roots تمنـع ملوحـة المـاء فـي الأوعيـة الناقلـة Conducting systems من الارتفـاع بشـكلٍ كبيـر. وفـي النـوع *Prosopis farcta* لاتصـل أيـة أمـلاح تقريبـاً إلـى الأوراق، رغم أن الشوارد الملحية، وخاصة Na^+ تُمتص من قبل الجذور.
2- **إزالـة الأمـلاح Salt elimination:** يسـتطيع النبـات أن يـتخلص بنفسـه مـن الأملاح الزائدة من خـلال الأمـلاح عن طريق غدد متخصصـة، أو عنـد سـطوح الأوراق والسـوق، أو مـن خـلال الـتخلص مـن أجـزاء النباتـات المحمّلـة بكميـاتٍ كبيرة من الأملاح. يمكن أن تطرح الأملاح من الغدد على هيئة مواد طيارة، مثـل Methyl chloride، Bromide، Iodide، كمـا هـو الحـال فـي الطافيـات البحريـة Marime phytoplankton، و Maoroalgae، و Fungi، حيـث تطرح مثل هذه الكائنات سنوياً قرابة 10 طناً من تلك المركبات الملحيـة الطيـارة. كذلك الشعيرات والغدد الطارحة للأملاح تتخلص من كمياتٍ كبيرة مـن الأمـلاح، ومن ثمَّ تحافظ على تركيز الأملاح ضمن الأوراق ضمن المستويات المقبولة.
3- **تمديد الأملاح Salt dilution:** إنَّ تأثير الأملاح في البروتوبلاسم لا ينجم عن الكميـة الكليـة للأمـلاح، بـل عـن تركيـز تلـك الأمـلاح Salt concentration. إذا يُمكن النبات من امتصاص كمية من الماء وتخزينها، فإنه يستطيع أنْ يحافظ علـى

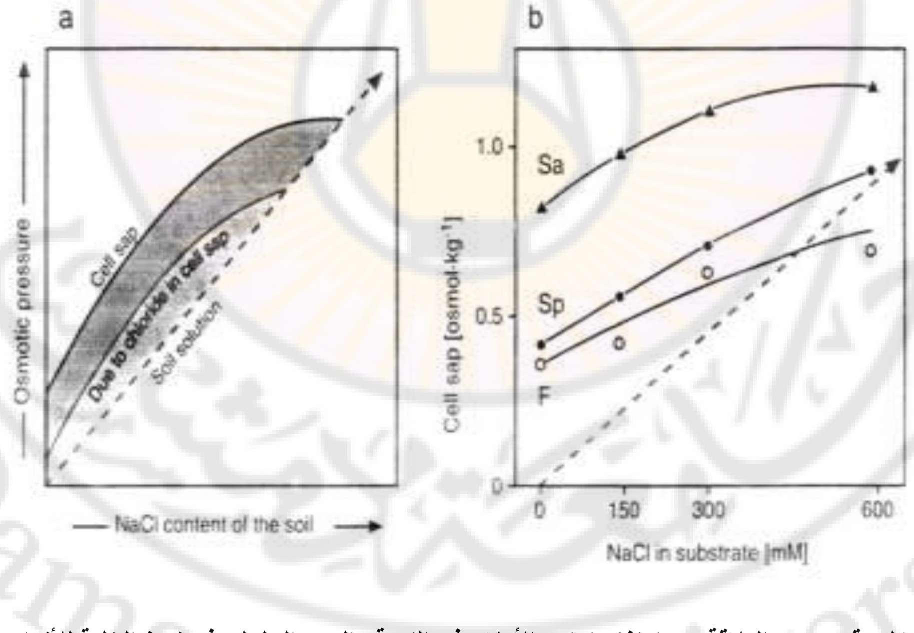
تركيـز معقـول وثابـت للأمـلاح لفتـرة زمنيـة طويلـة، هـذا النـوع والعصـارية المسـؤولة عنـه شـوارد الكلـور يُلاحـظ ضـمن الأنـواع النباتيـة المحبـة للملوحـة المنتشرة فـي البيئـات المالحـة الرطبـة Wet Saline environments (مثـال، Salicornia، وبعـــض الأنـــواع الشـــاطئية مـــن العائلـــة الســـرمقية Chenopodiaceae)، وكـــذلك فـــي بعـــض الأنـــواع الجفافيـــة الملحيـــة Xerohalophyes المنتشرة في المناطق الجافة (الشكل، 80).



الشكل رقم (80): الزيادة في العصارية استجابة للأملاح في أوراق نباتات المانغروف.

4- **إعـادة توزيـع الأمـلاح Salt redistribution:** إنَّ شـوارد الصـوديوم Na^+، والكلـور Cl^- يمكـن أنْ تُنقـل فـي اللحـاء، بحيـث إنَّ التراكيـز العاليـة فـي الأوراق الفعَّالة في النتح يمكن أنْ تمدد من خلال إعادة توزيعها على كامل النبات.

تراكم الأملاح واحتجازها ضمن الخلية: تستطيع نباتات الأنواع النباتية المحبة للملوحة Halophytes أنْ تستمر في امتصاص الماء من الوسط المحيط، رغم ارتفاع تركيز الأملاح في محلول التربة (انخفاض الجهد المائي، وارتفاع الجهد الحلولي) من خلال امتصاص الأملاح وتجميعها في نسغ الخلية. وتعمل هذه الأملاح على خفض قيمة الجهد المائي داخل الخلايا النباتية، ويصبح أكبر سلباً من الجهد المائي في الوسط المحيط، فيزداد فرق التدرج في الجهد المائي، فيتدفق الماء من التربة إلى داخل النبات. فعلى سبيل المثال تستطيع الطحالب البحرية من خلال الامتصاص الفعَّال للأملاح Actins absorption أنْ تُخفض الجهد الحلولي داخل خلاياها إلى قرابة 2.6- إلى 3.0- MPa، وهذا أقل من الجهد الحلولي لماء البحر (2.5- MPa). وتستطيع النباتات الراقية المحبة للملوحة أنْ تخفض الجهد الحلولي، ومن ثمَّ الجهد المائي في خلاياها من خلال امتصاص كمية زائدة من الأملاح، بالإضافة إلى استعمال المركبات العضوية، مثل الأحماض العضوية، والسكريات الذّوابة، وذلك لزيادة فرق التدرج في الجهد المائي بين التربة والنبات (الشكل، 81).



الشكل رقم (81): العلاقة بين ارتفاع تركيز الأملاح في التربة والجهد الحلولي في نسغ الخلية للأنواع النباتية المحبة للملوحة.

وحقيقةً، فإنَّ تراكم الأملاح في السيتوبلاسم يمكن أنْ يلحق الضرر بجميع العمليات الأيضية. ويمكن الإشارة إلى حقيقة أنَّ جميع الأنزيمات حساسة جداً لارتفاع تركيز الملاح في السيتوبلاسم حتى في خلايا الأنواع النباتية المحبة للملوحة، باستثناء الأنزيم ATPase المرتبط بالأغشية السيتوبلاسمية. وتتوقف درجة تحمل نوع نباتي ما للملوحة على كفاءته في احتجاز الشوارد المعدنية السامة ضمن الفجوات Ion compartmentalization، وهنا يقلل من تركيز تلك الشوارد الضارة في السيتوبلاسم، ويحجب تأثيرها الضار في البوتوبلاسم. ويبين الجدول الآتي توزع شوارد الأملاح بين مختلف المكونات الخلوية في الأوراق نبات السويدة *Suaeda maritime* المزروع في وسط يحتوي على 340 مول. ثمَّ من ملح NaCl (Flowers, 1985).

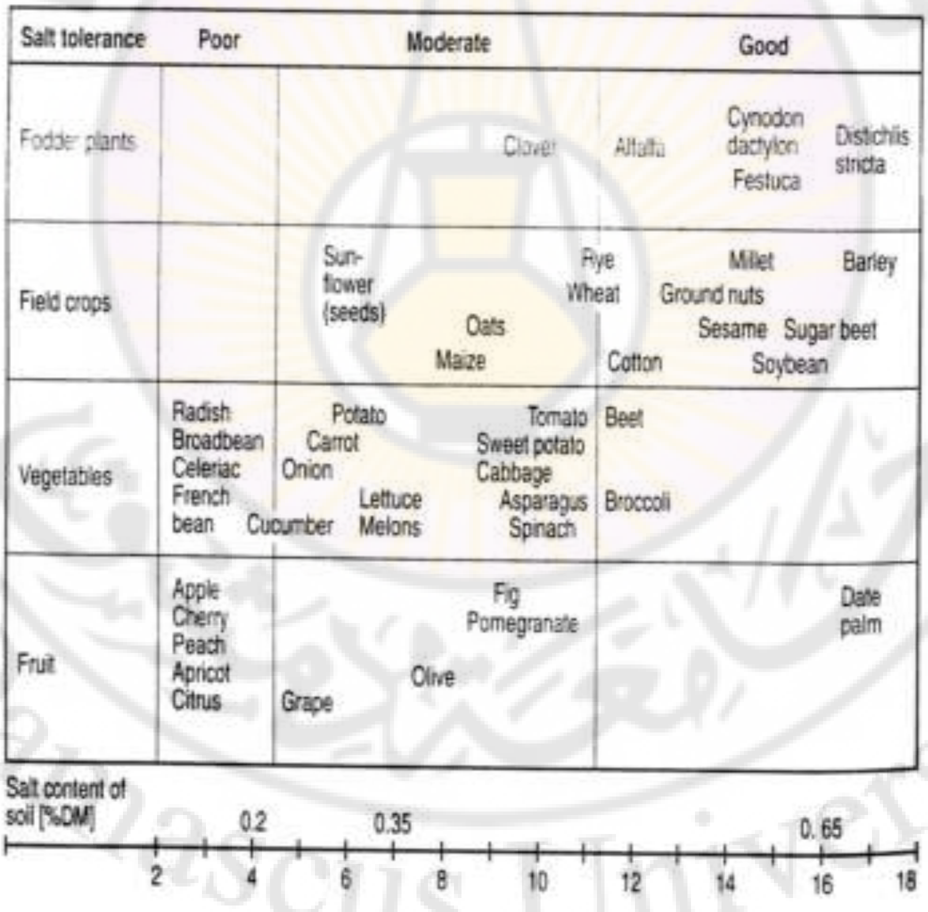
المكون الخلوي	النسبة إلى حجم الخلية (%)	تركيز الأيونات (مول. م$^{-3}$)	
		Na^+	Cl^-
السيتوبلاسم	11	116	60
الصانعات الخضراء	1.4	104	98
الفجوات	81.6	494	352
الجدر الخلوية	6	194	138

ويتم احتجاز الأملاح ضمن الفجوات بوساطة الأنزيم المرتبط بالأغشية الخلوية ATPase، لذلك تحتاج هذه العملية إلى صرف طاقة، وهذا ما يجعل النبات يضحي بجزء من نواتج التمثيل الضوئي لاحتجاز شوارد الأملاح ضمن الفجوات، وتحسين تحمل النبات للملوحة الأمر الذي يؤثر سلباً في نمو النباتات، وتطورها، وإنتاجيتها، وحتى مقدرتها التنافسية Competitive capacity.

تحمل الملوحة Salt Tolerance: يتمثل في مقدرة البروتوبلاسم على تحمل الملوحة. وهذا يعتمد على كفاءة البروتوبلاسم، وذلك حسب النوع النباتي، والنسيج النباتي، وقوة النمو. وأنْ تتحمل اضطراب التوازن المعدني، من التأثيرين الحلولي والسمي الأيوني للشوارد الضارة. وتستطيع بعض الأنواع النباتية الوعائية المحبة للملوحة أنْ تعيش في ترب يصل تركيز الأملاح فيها إلى 2-6% وأكثر (يمكن أنْ يصل في الحالات القصوى

حتـى 20%)، وتسـتطيع أنَّ تـراكم أمـلاح كلوريـد الصـوديوم (NaCl) فـي سيتوبلاسـماها حتى تركيز 10% من المحلول في الخلية.

ويتم اكتساب تحمل الملوحة بفضل مقدرة النبات على تصنيع بعض البروتينـات الدفاعيـة، والـذائبات العضـوية التوافقيـة، التـي تسـاعد فـي وقايـة البروتينـات، والأغشـية الحيويـة فـي التخريب. ويؤدي ازدياد تركيز الأملاح إلى البدء بتصنيع البروتينـات الدفاعيـة خـلال 3-6 سـاعات. وإنَّ الـذائبات العضـوية التوافقيـة غيـر السـامة تكـون مسـؤولية بشـكلٍ رئـيس عنـد التعديل الحلـولي بـين السيتوبلاسـم والمكونـات الخلويـة الأخـرى، ويبـين الشـكل (82) أمثلـة عن أهم المركبات العضوية التوافقية.



الشكل رقم (82): أمثلة عن الذائبات العضوية التوافقية في الأنواع النباتية المحبة للملوحة.

ويبين الجدول الآتي مستوى تحمل الملوحة في العديد من الأنواع النباتية الاقتصادية:

Salt sensitive	Less sensitive
Deciduous trees and shrubs	
Acer platanoides	*Acer negundo*
Aesculus	*Ailantus*
Carpinus	*Elaeagnus*
Euonymus	*Fraxinus*
Fagus	*Gleditsia*
Juglans	*Hippophae*
Ligustrum vulgare	*Lycium*
Platanus	*Potentilla fruticosa*
Prunus serotina	*Quercus* species
Rosa rugosa, some species	*Rosa rugosa*, some species
Syringa	*Robinia*
Tilia	*Sophora*
Evergreen broadleaved woody plants	
Ilex, some species	*Coccoloba*
Ligustrum lucidum	*Ficus*, some species
Mahonia	*Magnolia grandiflora*
Trachelospermum	*Nerium*
Conifers	
Abies, many species	*Juniperus chinensis*
Picea, many species	*Picea mariana*
Pinus strobus	*Picea parryana*
Pinus silvestris	*Pinus halepensis*
Pseudotsuga	*Pinus nigra*
Taxus	*Pinus ponderosa*

يتبين مما تقدم، ولاسيما في ظل اتساع رقعة الأراضي الزراعية المتأثرة بالملوحة، والتغير المناخي، الذي يؤثر سلباً في نوعية المياه، ومستوى التحمل، فلا بدَّ من تطوير الممارسات الزراعية المناسبة التي تقلل من تأثير الأملاح، ودور المربين والعاملين في مجال التقانات الحيوية، لتطوير أصناف عالية التحمل للملوحة مع مراعاة المحافظة على الكفاءة الإنتاجية في البيئات المتملحة، لضمان تحسين الإنتاج من المحاصيل الاقتصادية الغذائية، والعلفية، والصناعية المهمة، لتلبية الاحتياجات النباتية المتزايدة من الغذاء والكساء، أو المتطلبات الحيوانية من الأعلاف.

الفصل السابع

آليات تكيف الأنواع المحصولية مع العوامل البيئية

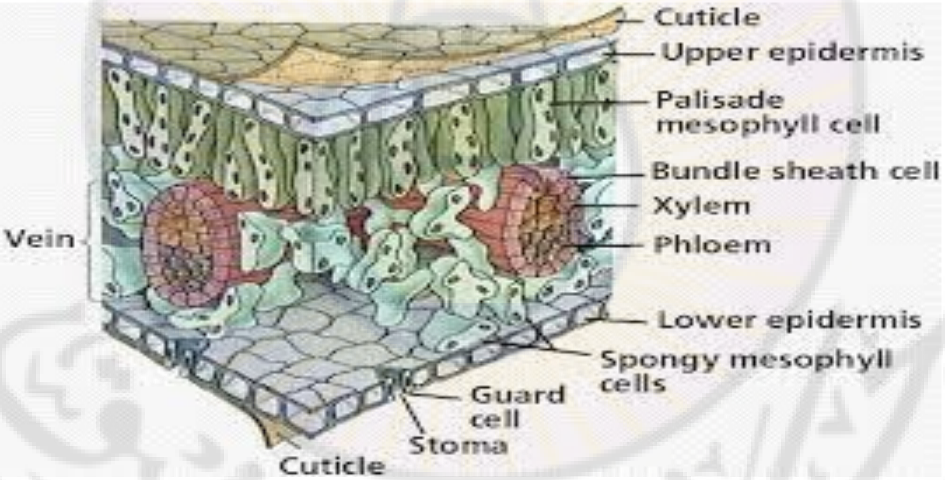
Adaptive Mechanisms of Crop Species with Environmental factors

تؤثر العوامل البيئية سواءً بشكلٍ مباشر أو غير مباشر في كلٍ من توزع النباتات وانتشارها جغرافياً, وفي نمو هذه النباتات وإنتاجيتها, وما النبات الذي نراه إلاّ حصيلة التفاعل بين تركيبه الوراثي والعوامل البيئية السائدة في المنطقة التي يعيش فيها. وتنمو النباتات وتعطي أفضل إنتاجية لها عند وجودها ضمن الظروف البيئية الملائمة لنموها من حيث درجة الحرارة السائدة, وكمية الهطول المطري، وطبيعة توزيعه خلال موسم النمو، وخصوبة التربة وغيرها من العوامل التي تحدد مقدرة نوع نباتي ما على الانتشار والنمو والتكاثر في منطقة ما دون غيرها، أو في زراعة محصول ما في جزء ما من العالم دون الآخر, وإنّ تواجد الأصول البرية لنوع نباتي ما في منطقة معينة، ما هو إلاّ دليل على أن ظروف هذه المنطقة تكون ملائمة لنمو هذا النوع من النباتات دون غيره.

غالباً ما تتعرض النباتات أثناء نموها لظروف بيئية غير ملائمة, أو يمكن أن يتم نقل النباتات وزراعتها في بيئة أخرى تكون ظروفها مغايرة للبيئة الأصلية للنبات, ونتيجة لذلك إما أن تُطور النباتات آليات تمكنها من النمو والتكاثر ضمن الظروف البيئية الجديدة، أو تموت وتنقرض في حال لم تتمكن من تحمل هذه الظروف، وهذا يتم عبر عملية الاصطفاء الطبيعي Natural selection، وتبعاً لذلك فإنّ النباتات قد تغير من بعض الصفات والخصائص الفيزيولوجية والشكلية والسلوكية لكي تتكيف وتتأقلم مع الظروف البيئية للمنطقة التي تنمو فيها، بحيث تتمكن من الاستفادة من أكبر قدر ممكن من الموارد المتاحة بما يمّكنها من النمو والتكاثر وإعطاء أفضل إنتاجية ممكنة, وتسمى الظاهرة التي تكتسب فيها الأفراد النباتية عبر الأجيال صفاتٍ جديدة تمكنها من النمو بشكلٍ أفضل في البيئة المحيطة بالتأقلم Adaptation. ليس بالضرورة أن يتم توريث الصفات التي يكتسبها النبات عند النمو في ظروف بيئية غير ملائمة, حيث أنّه قد لا تظهر الصفات المكتسبة عندما تتم زراعة النباتات في ظروف بيئية ملائمة. إن التطور Evolution الذي يتم عبر الأجيال على المدى الطويل (مئات وآلاف السنين) هو الوسيلة التي تؤدي إلى حدوث تغيرات في التركيب الوراثي بما يُمكن النباتات من أن تتخذ صورتها المثلى لتلائم الظروف البيئية الجديدة.

أولاً- آليات تكيف النباتات تبعاً لكمية الإشعاع الشمسي المتاحة

تحتاج كافة النباتات باستثناء بعض النباتات الطفيلية إلى الضوء لكي تتمكن من النمو, وفي الطبيعة، تنمو النباتات ضمن مدىً واسع من كمية الضوء المتاحة، بحيث تتكيف بعض الأنواع النباتية مع ظروف السطوع الشمسي العالي في البيئات المشمسة, وأخرى تتكيف مع البيئات ذات السطوع الشمسي المنخفض، وتسمى نباتات الظل. تنمو النباتات عادةً في طبقات، وبالتالي تكون كمية الأشعة المتاحة للطبقات السفلية أقل من تلك المتاحة للطبقات العلوية, حتى ضمن النبات الواحد تكون هناك أوراق مظللة وأخرى غير مظللة. ويسعى النبات دائماً للحصول على أكبر كمية من الضوء من أجل زيادة كفاءة التمثيل الضوئي، وهذا ما يكسبه خصائص بنيوية وتشريحية تمكنه من ذلك, فمثلاً تبين دراسة البنية التشريحية للورقة (الشكل، 83) أنّها مصممة لتتمكن من امتصاص أكبر كمية ممكنة من الضوء.



الشكل رقم (83): مقطع عرضي للورقة يبين طبقة البشرة وطبقات خلايا النسيج المتوسط العمادي والإسفنجي.

يلاحظ من الشكل أنّ طبقة البشرة Epidermis رقيقة وشفافة، بحيث تسمح بوصول كمية أكبر من الضوء إلى الخلايا التمثيلية في النسيج المتوسط, وغالباً ما تكون خلايا البشرة عدسية أو محدبة الشكل ما يجعلها تؤدي دوراً يشبه دور العدسات، بحيث تقوم بزيادة تركيز الضوء الواصل إلى الصّانعات الخضراء. هذه الظاهرة منتشرة بشكلٍ خاص في النباتات العشبية، ولاسيما تلك النامية في الطبقة التحتية تحت الأشجار في الغابات

المدارية، حيث تكون كمية الضوء الواصلة إليها قليلة. ويوجد تحت خلايا البشرة خلايا النسيج العمادي Palisade cells, وتحوي بعض النباتات من1-3 طبقات, وتكون كافة خلايا النسيج العمادي الموزعة ضمن هذه الطبقات فعّالة في عملية التمثيل الضوئي بفعل تأثير خاصتي الغربال Sieve effect وإرشاد الضوء Light guidance effect. يُعزى تأثير الغربال لتجمع جزيئات الكلوروفيل ضمن الصّانعات الخضراء بشكل مجاميع مرتبطة مع مراكز التفاعل ما يسمح بمرور الضوء من المواقع في الصانعة التي لا يتوزع فيها الكلوروفيل. ويُعزى تأثير إرشاد الضوء إلى مرور الضوء من خلال المسافات البينية الخلوية في النسيج المتوسط العمادي، حيث تتوضع الخلايا بشكلٍ عمودي يسهل عبور الضوء إلى الطبقة التالية، التي هي عبارة عن خلايا النسيج المتوسط الإسفنجي التي تكون غير منتظمة الشكل ويكون هناك العديد من الفراغات البينية بينها ما يزيد من تبعثر الضوء وهذا بدوره يزيد من احتمال أنّ الضوء الهارب من خلية يتم التقاطه من قبل خلية أخرى.

يتغير أيضاً توزع الصّانعات الخضراء ضمن الخلايا التمثيلية بشكلٍ يتناسب مع شدة الإشعاع الشمسي الواصل إليها, حيث إنّها تتوزع عند سطوح الخلايا بشكلٍ متعامد مع الأشعة الساقطة عندما تكون هذه الأشعة غير كافية وتحت نقطة التشبع الضوئي, في حين تتجه الصانعات نحو جدران الخلايا التمثيلية وتتوضع بشكلٍ مواز للأشعة الواصلة في حال كانت شدة الإشعاع عالية.

تُسهم حركة الأوراق التي تُسمى اصطلاحاً Solar tracking في التحكم بكمية الضوء الممتصة وتحدث هذه الظاهرة في مجموعة كبيرة من النباتات كالقطن, والفصة, وفول الصويا، والفول، حيث تقوم الأوراق بتحريك أنصالها بحيث تكون متعامدة مع الأشعة الضوئية الساقطة. وتتبع هذه الأوراق حركة الشمس من الشروق إلى الغروب فتكون مواجهة للشرق عند الشروق ومواجهة الغرب عند الغروب. تُضبط هذه العملية بوساطة عضو متخصص يسمى Pulvinus موجود في نقطة التلاقي بين نصل الورقة وحامل الورقة. يمتلك هذا العضو خلايا أشبه بالمحرك Motor cells تستطيع أن تغير من جهدها الحلولي وتولد قوة ميكانيكية قادرة على تغيير زاوية الورقة.

تجنب الظل Shade avoidance: يعيق الظل نمو النباتات بشكلٍ كبير, وعندما تنمو النباتات في كثافة نباتية عالية أو ضمن طبقات, أو تحت الأشجار والشجيرات، أو في ظل الأبنية أو غيرها, فإنّ هذه النباتات إما أن تسعى لتجنب الظل والوصول إلى كمية أكبر من الضوء, أو أن تتحمل الظل وتتأقلم معه. ويُعد تجنب الظل إستراتيجية تنافسية مهمة يمتلكها النبات, وتختلف خصائص الأنواع النباتية في استجابتها لتتجنب الظل أو الإضاءة

الضعيفة, ولكن بشكلٍ عام، يُلاحظ وجود صفات عامة تسمى بصفات تجنب الظل Shade avoidance syndrome, ومن أهم هذه الصفات، النمو السريع للنباتات وتطاول سوقها وأوراقها, وتكون الأوراق أكبر وأرق وعادةً ما يرافق ذلك تغيّر في زاوية توضع الأوراق, أو تنحني الأوراق باتجاه الأعلى Leaf hyponasty، نتيجة تزايد سرعة نمو الطبقة السفلية للورقة عن الطبقة العليا, كما تزداد السيادة القمية التي تؤدي إلى قلة التفرع في النباتات ثنائية الفلقة وقلة عدد الإشطاءات في النجيليات, ويعطي النبات كتلة جافة أقل, وتحافظ النباتات على استمرار عملية التمثيل الضوئي على حساب نمو الجذور وتطورها, بالإضافة إلى ذلك، فإنّ النباتات تبكر في الإزهار ولكن تعطي غلة بذرية أو حبية أقل.

بيّنت الدراسات أن السبب الرئيس الذي يُحرض هذا النوع من الاستجابة، وظهور صفات تجنب الظل هو انخفاض نسبة الأشعة الحمراء (R) إلى الأشعة الحمراء الطويلة (FR) (R:FR)، حيث يتم امتصاص الجزء الأكبر من الأشعة الحمراء من قبل النباتات في الطبقات الأعلى. إنّ انخفاض النسبة (R:FR) سيحرض عملية تصنيع الأوكسينات وتراكم IAA ونقلها إلى خلايا البشرة المحيطية المسؤولة عن النمو الطولي للأفرع، ما يؤدي إلى تشجيع نمو هذه الأفرع وتطاولها. هذا وقد ظل الاعتقاد سائداً أنّ Phytochrome B (Phytochromes: أصبغة نباتية لاقطة للضوء، وهي حساسة بشكلٍ خاص للضوء ضمن مدى الأشعة الحمراء والحمراء الطويلة في المدى الضوئي المرئي), هو المسؤول الوحيد عن التقاط أو تحسس الإشارة البيئية التي تُحرض حدوث أعراض أو صفات تجنب الظل, ولكن بيّن Smith and Whitelam (1997) أنّ هذا التفسير مبسط جداً، وعلى العكس فإنّ العديد من الفايتوكرومات تشترك في ذلك, ويختلف مدى وفرة هذه الفايتوكرومات باختلاف الأنواع النباتية. ولابد من الإشارة إلى أهمية البروتين الحامل للأوكسينات PIN3 في تنظيم عملية نقل الأكسينات وتوضعها القطبي في خلايا البشرة المحيطية, إذْ إنّ انخفاض نسبة (R:FR) يزيد من التعبير المورثي للبروتين PIN3, وبالتالي تزداد كميته ووفرته, ويسود توضعه في الخلايا الخارجية، (الشكل، 84) (Keuskamp and Pollmann, 2010).

الشكل رقم (84): يبين ظهور صفات تجنب الظل في نباتات (A) Arabidopsis ونباتات *Brassica rapa (B)* **عند انخفاض نسبة الأشعة الحمراء إلى الحمراء الطويلة (R:FR) في بيئة النمو.**

آليات تكيف نباتات الظل Adaptations of shade plants:

إن مدى وفرة الضوء هو من أهم العوامل المحددة للنمو, وجميع النباتات تفضل النمو في الضوء ولكن هناك أنواع نباتية تزداد قدرتها التنافسية عند نموها في الظل بالمقارنة مع أنواع أخرى حساسة لا تستطيع المنافسة والنمو في ظروف الإضاءة الضعيف., وتظهر النباتات القادرة على النمو في الظل تحورات أو تغيرات شكلية وفيزيولوجية وتشريحية تمكنها من النمو في مثل هذه الظروف، وتسمى بنباتات الظل, ويمكن تلخيص أهم الصفات التي تتميز بها نباتات الظل بالنقاط التالية:

- تحتوي النباتات على كمية أكبر من الكلوروفيل الكلي في كلٍ مركز تفاعل ومعقد حصد الطاقة.
- نسبة كلورفيل a إلى كلوروفيل b منخفضة، ما يدل على الاستثمار في معقدات حصد الطاقة التي تحوي كميات كبيرة من كلوروفيل b.
- تحتوي على كمية منخفضة من الأنزيم Rubisco، لأنّ تصنيعه وتصنيع الأنزيمات الأخرى التي تدخل في حلقة إرجاع الكربون تكون مكلفة للنبات، ولا تحتاج مثل هذه النباتات لكمياتٍ كبيرة منه.
- تكون عادةً نسبة النظام الضوئي الثاني إلى الأول 1:3 عالية، لأنّ النظام الضوئي الثاني حساس جداً لوجود كمية زائدة من الأشعة الضوئية المحرضة.

- معدلات التنفس في نباتات الظل أقل بكثير بالمقارنة مع النباتات المحبة للشمس, ونقطة التعويض الضوئي Light compensation point، وهي الكمية الممتصة من الضوء التي يتساوى عندها كمية غاز الفحم المثبتة مع كمية غاز الفحم المفقودة, تكون منخفضة 1-5 mmol m-2s-1 بالمقارنة مع تلك التي في النباتات المحبة للضوء (10- 20 mmol m-2s-1).
- الأوراق أرق من أوراق النباتات المتكيفة مع البيئات ذات السطوع الشمسي العالي، ومساحة المسطح الورقي أكبر, بالإضافة إلى توضع الأوراق بشكلٍ أفقي يتعامد مع الأشعة الواصلة إليها، وذلك لحصد أكبر كمية ممكنة من الضوء.

تكيف النباتات المحبة للشمس Adaptations of sun plants

كما ذُكر سالفاً, فإنّ جميع النباتات تفضل النمو في ظروف إضاءة جيدة, ولكن الإضاءة الشديدة تؤذي النبات, وفي البيئات ذات السطوع الشمسي العالي, تمتلك النباتات خصائص تمكنها من الاستفادة القصوى من ضوء الشمس الواصل إليها دون حدوث تثبيط للأنظمة الضوئية. وتُجمل باختصار أهم الخصائص التي تتميز بها النباتات النامية في البيئات ذات السطوع الشمسي العالي:

- تحتوي النباتات على كمية أكبر من الأنزيم Rubisco والأنزيمات الأخرى التي تدخل في حلقة كالفن في وحدة المساحة الورقية, وذلك بسبب وجود طبقات خلوية أكثر, وعدد أكبر من الصّانعات الخضراء في كل خلية, وحجم أكبر للستروما.

- الأوراق أصغر ولكن أكثر سماكة من الأوراق المظللة, حيث إنّ النسيج المتوسط Mesophyll متطور، ويحتوي على طبقات متعددة من خلايا النسيج العمادي.

- تتسم الأوراق بتحورات خاصة مثل الأوبار, والغدد الملحية، والترسبات الشمعيةن التي تزيد من انعكاس الضوء، وبالتالي تسمح هذه الآليات في تقليل امتصاص الضوء بنسبة 40%.

- تتوضع الأوراق بشكلٍ رأسي، بحيث تضيق الزاوية بين أنصال الأوراق والسوق، وهذا يقلل من كمية الضوء الواصلة للأوراق.

- يمكن أن يغير ترتيب الصّانعات الخضراء وحركة الأوراق من كمية الضوء الممتصة من قبل الورقة.

- النباتات المنتشرة في البيئات ذات السطوع الشمسي العالي والحرارة المرتفعة في المناطق المدارية والاستوائية هي نباتات رباعية الكربون، ونباتات CAM في المناطق الصحراوية.

- تحتوي كمية أكبر من المركبات التي تدخل في حلقة الكزانتوفيل Xanthophyll cycle، التي لها دور فعّال في حماية الأنظمة الضوئية من الأشعة الشمسية الزائدة.

حلقة الكزانتوفيل ودورها في حماية الأنظمة الضوئية: فـي ظروف الإضاءة الشـديدة, لا بد من التخلص من الطاقة الضوئية الزائدة لكي لا تحدث عملية التثبيط الضوئي Photoinhibition، التي تؤدي إلى تخريب الأنظمة الضوئية، ولاسيما النظام الضوئي الثاني. يبدو أنّ لحلقة الكزانتوفيل دوراً مهماً في التخلص من الطاقة الضوئية الزائدة, حيث يتم بوساطتها تحويل نحو 60% أو أكثر من الطاقة الضوئية الزائدة إلى حرارة. بيّنت الدراسات أنّه تحت ظروف الإضاءة العالية يتحول مركب Violaxanthin (V) إلى مركب Antheraxanthin (A) ومن ثمّ إلى مركب Zeaxanthin (Z)، حيث يُلاحظ ازدياد نسبة كلٍ من A وZ بنحو 60% أو أكثر وتناقص نسبة V في الأوراق المُعرضة لأشعة الشمس المباشرة، لاسيما عند منتصف النهار, وعندما تنخفض شدة الإشعاع الشمسي, يعود ويتحول كل من A و Z أنزيمياً إلى V.

لوحظ أنّ أوراق النباتات المحبة للشمس تحوي كمياتٍ أعلى بكثير من مركبات Z، A،V بالمقارنة مع النباتات المحبة للظل. لكن تظهر حلقة الكزانتوفيل أيضاً في نباتات تنمو في ظروف إضاءة منخفضة كالنباتات النامية في الطبقة التحتية من الغابات التي تكون مُعرضة أحياناً إلى فتراتٍ من الإضاءة الشديدة نتيجة وصول حزم من الأشعة الشمسية Sun flecks من بين الفراغات في الغطاء الورقي العلوي. توجد مركبات حلقة الكزانتوفيل أيضاً في المخروطيات التي تبقى أوراقها دائمة الخضرة في الشتاء، حيث يكون معدل التمثيل الضوئي عندها منخفض جداً ولكن امتصاص الضوء يكون مستمراً, لذلك يُلاحظ وجود نسب عالية من مركبات A وZ في أوراق هذه الأنواع في الشتاء حيث تسهم في حماية الأنظمة الضوئية من التثبيط الضوئي. على العكس من ذلك, خلال فصل الصيف عندما تكون معدلات التمثيل الضوئي مرتفعة يوجد كل من A و Z بنسب منخفضة، وترتفع في بعض الأحيان فقط عندما لا يتم استعمال كامل الطاقة الضوئية في عملية التمثيل الضوئي.

ثانياً– تكيّف النباتات تبعاً لكمية المياه المتاحة Plant adaptation according to water availability

إنّ مدى توافر الماء هو من أهم العوامل المحددة لنمو الأنواع النباتية وتوزعها, وتبعاً لمتطلبات النبات المائية والبيئة التي يعيش في. هناك بعض الأنواع النباتية تكون متكيفة للنمو مغمورةً في الماء أو طافية على سطحه, وتسمى بالنباتات المائية Hydrophytes, ونباتات أخرى متكيفة مع البيئات الجافة والصحراوية، وتسمى بالنباتات الجفافية Xerophytes, وهناك مجموعة كبيرة أخرى من النباتات التي تعيش في بيئات متوسطة الرطوبة، وتسمى Mesophytes، وتحتاج هذه الأنواع لكمياتٍ متوسطة من الماء لتحقيق النمو الأعظمي أو المثالي, وإنّ أغلب المحاصيل الزراعية، والأنواع النباتية المهمة تتبع لهذه المجموعة.

تكيّف النباتات المائية: تمتلك النباتات المائية آليات تكيفية مميزة تمكنها من العيش مغمورة أو طافية على سطح الماء أو على الضفاف والمستنقعات, وبشكلٍ عام يمكن إيجاز أهم هذه الآليات خاصةً في النباتات الطافية كالتالي:

- تكون البشرة رقيقة أو معدومة (حيث أنّ طبقة البشرة عادةً ما تقلل من فقد الماء, ولا حاجة لذلك في البيئات المائية).
- تحتوي الأوراق على عدد كبير من المسامات على أحد وجهي الورقة أو كليهما، ولكن غالباً ما تكون هذه المسامات على الوجه العلوي وتبقى دائماً مفتوحة.
- تكون الأنسجة الدعامية مختزلة, حيث إنّ ضغط الماء هو الذي يعمل على دعم هذه النباتات, ولكن الأوراق الطافية تكون قوية لتتحمل حركة الماء والظروف الجوية القاسية.
- تحتوي النباتات الطافية في جذورها أو سوقها أو أوراقها على أكياس هوائية تساعدها على الطفو على سطح الماء, وتؤمن محيطاً هوائياً داخلياً Internal atmosphere للنبات.
- تحتوي النباتات على مجموع جذري صغير أو مختزل, حيث يمكن أن ينتشر الماء إلى الأوراق مباشرة, والجذور الموجودة عادةً تكون شعرية وناعمة جداً, والهدف الأساسي منها هو تثبيت النبات.

أما بالنسبة إلى النباتات المغمورة كلياً بالماء, فإنها تتميز بمايلي أيضاً:

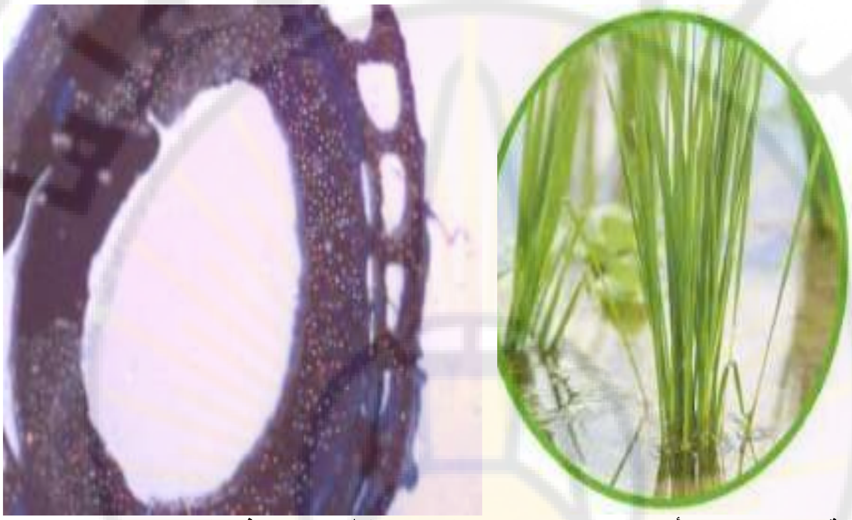
- لاوجود للأنسجة الدعامية وللنسيج الخشبي الناقل، حيث إنّ الخلايا السطحية تقوم بامتصاص الماء والعناصر المغذية والغازات المنحلة من الماء المحيط بها مباشرة.
- الأوراق تكون مقسمة ومفصصة بشكلٍ كبير، ما يزيد من مساحة المسطح التمثيلي, ويقلل هذا الشكل أيضاً من مقاومة الماء والضرر الناجم عنه على الأوراق (الشكل، 85).

الشكل رقم (85): بعض النباتات المغمورة مائياً.

يُعد محصول الأرز (*Oryza sativa* L.) أهم المحاصيل الغذائية القادرة على التأقلم مع البيئات المائية, حيث إنّ هناك بعض الأصناف تتم زراعتها في الحقول المغمورة بالماء لفترات طويلة من مراحل نمو المحصول, ومن أهم الآليات التي تُمكن هذا المحصول النجيلي من النمو في الظروف غير الهوائية:

1- تحتوي السوق على عدد كبير من الفراغات الممتلئة بالهواء، بحيث ينتقل منها الأكسجين إلى خلايا الجذور، وبالتالي تتمكن هذه الخلايا الجذرية من التنفس هوائياً رغم وجود الجذور نفسها في ظروف غير هوائية, (الشكل، 86).
2- معظم الجذور تكون سطحية، وبالتالي تتمكن من الحصول على الأكسجين الذي يكون منحلاً في الطبقة السطحية من الماء.
3- إذا ما تعرض محصول نجيلي آخر للغمر لفترة من الزمن فإنّ النباتات ستموت لعدم قدرة الجذور على التنفس. ويمكن أن تتنفس الجذور لا هوائياً

في المراحل الأولى وينتج عن ذلك تشكل الإيثانول الذي يُعد ساماً للنبات, لذلك لا يمكن للنباتات أن تستمر بالتنفس اللاهوائي, أمّا بالنسبة إلى نباتات الأرز فإنّها تتميز بقدرتها على تحمل تراكيز عالية من الإيثانول ضمن خلاياها ولفتراتٍ طويلة، وبالتالي تستطيع التنفس لاهوائياً.



الشكل رقم (86): نبات الأرز وجزء منه مغمور بالماء، ومقطع عرضي في الساق يوضح وجود الفراغات الهوائية.

بشكل عام, يكون العائق الرئيس الذي يحد من نمو النباتات في ظروف الغمر أو الغدق هو نقص الأوكسجين, حيث إنّ سرعة انتشار الأكسجين في الماء أقل بنحو 10^4 مرات من سرعة انتشاره في الهواء. وتختلف النباتات بشكلٍ كبير في درجة تحملها لظروف الغمر، وذلك من بضع ساعات إلى عدة أيام أو عدة أسابيع, ويختلف التأثير باختلاف النوع النباتي, والجزء النباتي المُعرّض للغمر, ومرحلة النمو, والظروف الخارجية المحيطة، وخاصةً درجة الحرارة. وتتضمن أهم الآليات التي تميز النباتات المتحملة لنقص الأوكسجين Hypoxia بالمقارنة مع النباتات الحساسة. تتضمن بالنسبة إلى الجذور، تغيرات استقلابية تتضمن تجنب التسمم الذاتي، وذلك من خلال قدرتها على تشكيل كمياتٍ أقل من الإيثانول (المنتج النهائي للتخمر الكحولي) السام في الجذور, أو التوجه نحو تشكيل مواد أقل سمية من الإيثانول والمالات Malate، وتجنب حموضة السيتوبلاسما، والحفاظ على مصادر الطاقة، وتغيير في التعبير المورثي (زيادة نسبة البروتينات

اللاهوائية Anaerobic protiens على سبيل المثال)، وزيادة المقدرة على التأقلم مع الظروف اللاهوائية من خلال التعرض المسبق لظروف تقل فيها نسبة الأكسجين، وحدوث تغيرات مورفولوجية تتضمن بشكلٍ أساسي تطوير نسيج هوائي يضمن وصول الأكسجين للأنسجة المغمورة. بالإضافة إلى ذلك، فإنّه يوجد بعض الأنواع النباتية التي تتعرض للغمر ولكن جذورها غير قادرة على تحمل ظروف نقص الأكسجين، وتستطيع هذه النباتات النجاة من خلال **تجنب الظروف اللاهوائية** من خلال قدرة الجذور على تغيير طبيعة نموها، بحيث تنمو جانبياً أو للأعلى من أجل الوصول إلى الهواء. أما **بالنسبة إلى النموات الخضرية** فهي عادةً ما تُعد أقل حساسية لنقص الأكسجين من المجموعة الجذرية، وفي حال تمّ غمر النموات الخضرية بالماء, فإنّ النبات سيحرم من كلٍ من غاز الفحم, والضوء, والأكسجين, وسيتوقف النمو في النباتات الحساسة ويموت النبات, في حين ستستمر أنواع عديدة في النمو والإنتاج, ولاسيما في المناطق الرطبة, وذلك عبر تكيّف هذه النباتات مع الزمن, وحدوث تغيرات مورفولوجية وفيزيولوجية تتمثل بشكلٍ أساسي بتجنب النباتات لنقص الأكسجين من خلال وجود نسيج أو شبكة من الخلايا الممتلئة بالهواء Aerenchyma تزود النبات بالأكسجين والغازات الأخرى. عموماً، يؤدي غمر النموات الخضرية إلى انخفاض في معدل التمثيل الضوئي بشكلٍ كبير نتيجة نقص كلٍ من غاز الفحم و الضوء, بالإضافة إلى أنّ الغمر سيؤثر في الإزهار والإخصاب, ولكن في النباتات المتأقلمة, يتم التغلب على ذلك من خلال تطاول الفروع في هذه النباتات من أجل الوصول إلى الهواء في الأعلى. ولكي تتمكن الأوراق من القيام بعملية التمثيل الضوئي تحت الماء, فإنّها تتميز بسرعة امتصاص غاز الفحم المنحل في الماء، وذلك من خلال تحورات شكلية في الورقة تتمثل بشكلٍ رئيس بوجود طبقة رقيقة من البشرة.

تكيّف النباتات الجفافية: النباتات الجفافية Xerophytes هي النباتات التي تستطيع أن تنمو في الظروف التي تكون فيها كميات الماء المتاحة للنبات قليلة جداً, كما في البيئات الصحراوية, ولكن يمكن أن تشاهد أيضاً تكيفات النباتات الجفافية في بيئات أخرى كما في البيئة المتجمدة، حيث إنّ الماء يكون متجمداً وغير متاح للنبات, وكذلك الأمر في البيئات عالية الملوحة، حيث ينخفض الجهد المائي لمحلول التربة ما يحول دون امتصاص الماء من قبل الجذور. وتختلف الأنواع النباتية المتكيفة مع ظروف الجفاف باختلاف شدة الجفاف Drought severity، ففي البيئات التي تتميز بوجود فصل مطري قصير, تنتشر مجموعة تسمى Sclerophylls، وهي مجموعة من الشجيرات الصغيرة والأشجار كالبلوط والزيتون التي تتميز بصغر أوراقها وسماكتها, وصغر الأوراق، حيث تُساعد هذه التكيفات على التخلص من الطاقة الزائدة في ظروف الإضاءة الشديدة المرافقة. وتتميز نباتات هذه المجموعة أيضاً بقدرتها على القيام بالتبادل الغازي بشكلٍ

فعّال عندما يتوافر الماء, وعند حدوث الجفاف, فإنّها تعمل سريعاً على تقليل معدل النتح بشكلٍ كبير من خلال إغلاق مساماتها, وهذا يساعدها على تحمل أشهر من الجفاف دون أن تتناقص المساحة الورقية فيها, أو تتغير الحالة المائية للسيتوبلاسما. ويستعيد النبات نموه بسرعة عندما يوجد الماء ولو لأوقات محدودة.

في البيئات الأكثر جفافاً, كما في الصحارى, فإنّ العصاريات Succulents هي أكثر النباتات انتشاراً وتحملاً للجفاف, حيث تتميز بمقدرتها على تخزين الماء في السوق أو الأوراق أو الجذور. ولا تقوم نباتات هذه المجموعة بامتصاص الماء أثناء فترات الجفاف، ولكن عند هطول الأمطار, تظهر وبشكل سريع جذور صغيرة مؤقتة تعمل على امتصاص الماء المتاح لفتراتٍ قصيرة. تمتلك هذه النباتات ميزة خاصة أيضاً تمكنها من النجاة من الظروف البيئية القاسية جداً, وهي أنّها تعمل على إغلاق المسامات نهاراً لمنع فقد أية كمية من المياه, ولا تفتح هذه المسامات إلاّ في الليل حيث درجات الحرارة منخفضة, والرطوبة الجوية العالية نسبياً, للحصول على غاز الفحم، حيث يتم ضمه إلى المستقبل الأولي المركب ثلاثي الكربون ، Phosphoenol pyruvate (PEP) وتشكيل Oxalocetate، لا يلبث أن يُختزل إلى حمض الماليك الذي يتجمع في الفجوات ليلاً، ويتم أثناء النهار نزع غاز الفحم من الحمض العضوي رباعي الكربون، ويتم تثبيته عبر حلقة كالفن إلى كربوهيدرات ضمن الصّانعات الخضراء, ولأن المسامات تكون مغلقة تماماً خلال النهار, فسيكون فقد الماء في حده الأدنى، ولا يحدث تسريب لغاز الفحم من الأوراق, الأمر الذي يؤدي إلى زيادة كفاءة لستعمال المياه، ويسمى هذا النظام في تثبيت غاز الفحم بنظام Crassulacean Acid Metabolism (CAM). بشكلٍ عام, يمكن القول بإيجاز أنّ الطرز الجفافية تبدي تكيفات خاصة تتمحور في ثلاث آليات رئيسة:

1. تقليل فقد الماء من خلال تقليل نفاذية كل من خلايا البشرة الخارجية, وزيادة مقاومة الطبقة الشمعية لتدفق المياه (حاجز فيزيائي), وتقليل معدلات النتح من المسام ما أمكن. وتشكل التحورات التالية أهم التحورات التي تندرج تحت آلية تقليل فقد المياه:

- وجود طبقة شمعية أو غطاء كثيف من الأوبار والشعيرات على سطوح الأوراق.
- تقليل عدد المسامات, أو تكون المسامات غائرة.
- انفتاح المسام في الليل فقط كما في نباتات CAM.
- التفاف الأوراق، وتغيير زاوية الورقة لتقليل مساحة المسطح الورقي المعرّضة بشكلٍ مباشر لأشعة الشمس.
- اختزال الأوراق إلى أشواك.

2. خزن الماء في أجزاء مختلفة من النبات حيث يلاحظ وجود أجزاء نباتية متحورة كالأوراق العصارية والسوق العصارية والدرنات العصارية.

3. زيادة كفاءة امتصاص المياه. ومن الآليات التي تزيد من كفاءة هذه النباتات لامتصاص المياه, وجود مجموع جذري متعمق قادر على استخلاص المياه من طبقات التربة العميقة الرطبة, وأحياناً تقوم الأوبار والشعيرات على الأوراق بامتصاص المياه مباشرةً من الرطوبة الجوية المحيطة.

4. المقدرة على التعديل الحلولي: تتميز النباتات الجفافية بامتلاكها آلية التعديل الحلولي Osmotic adjustment، وهي من أهم وسائل زيادة المقدرة على تحمل الجفاف، وذلك عن طريق خفض الجهد المائي ضمن الخلايا بفضل تصنيع الذائبات العضوية التوافقية وتجميعها ضمن سيتوبلاسم الخلايا، ما يؤدي إلى زيادة فرق التدرج في الجهد المائي بين الخلايا النباتية والوسط المحيط، فيستمر تدفق الماء إلى داخل الخلايا النباتية، فتحافظ على حالة الامتلاء واستمرار العمليات الخلوية، واستطالة الخلايا والنمو تحت ظروف الإجهاد المائي الشديد.

النباتات متوسطة الجفاف Mesophytes: نباتات هذه المجموعة غير قادرة على النمو في البيئات المائية والغدقة، أو في البيئات شديدة الجفاف. ومعظم المحاصيل الحقلية (القمح, والشعير, والذرة الصفراء والبيضاء, الفول, العدس, والحمص.... الخ) تنتمي لهذه المجموع. وغالباً ما تنمو نباتات هذه المجموعة في البيئات المعتدلة. لا تمتلك نباتات هذه المجموعة صفات شكلية وبنيوية مميزة ولكن بشكلٍ عام تكون أوراقها أكبر وأرق من أوراق النباتات الجفافية, وتحتوي على طبقة وحيدة من خلايا البشرة, وعادةً ما تحتوي على عدد أكبر من المسامات، وخاصة على الجهة السفلية من الأوراق. تكتسب نباتات هذه المجموعة بعض صفات النباتات المائية في الظروف التي تزداد فيها كمية المياه المتاحة بشكلٍ يزيد عن احتياجات النبات المائية، حيث يزداد حجم كل من الأوراق والخلايا, وتستجيب نباتات هذه المجموعة بتقليل الناقلية المسامية، وأحياناً إغلاق المسامات بشكلٍ كامل تحت ظروف الإجهاد المائي والحرارة المرتفعة. يمكن أن تكتسب هذه النباتات بعض صفات النباتات الجفافية أو الصحراوية عند تعرضها للجفاف لفتراتٍ طويلة، ومن هذه الصفات:

- وجود الزغب الأبيض, وتشكل الترسبات الشمعية على السوق والأوراق.
- تقليل حجم المسطح الورقي الأخضر، وزيادة التكرار المسامي.

- التفاف الأوراق كما في النجيليات, وحركة الأوراق كما في البقوليات والفصة والقطن.
- تشكيل مجموع جذري متعمق ومتشعب, وتزداد نسبة الأجزاء الأرضية إلى الأجزاء الهوائية.
- تقليص حجم الخلايا، وزيادة حجم الفراغ الداخلي.
- تفعيل آلية التعديل الحلولي.

تكيف النباتات تبعاً لدرجات الحرارة السائدة Plant adaptation according to temperature

تنمو النباتات ضمن مدى واسع من درجات الحرارة, فبينما تشاهد نباتات تنمو عند درجات حرارة تحت درجة التجمد كما في المناطق القطبية, هناك نباتات تنمو عند درجات حرارة قد تزيد عن 50 درجة مئوية كما في نباتات الصحارى الاستوائية. وتختلف النباتات في درجات الحرارة الملائمة لنموها, وتُعد درجة الحرارة السائدة من أهم العوامل المؤثرة في توزع الأنواع النباتية جغرافياً، وفي إنتاجية هذه الأنواع.

تُزرع بعض المحاصيل صيفاً وتُسمى المحاصيل الصيفية Summer crops، حيث تتطلب درجات حرارة مرتفعة نوعاً ما أثناء نموها, ومن هذه المحاصيل الذرة الصفراء, والذرة البيضاء, والقطن, وفول الصويا, وزهرة الشمس, والعصفر وغيرها, وعادةً ما تكون هذه المحاصيل حساسة جداً للصقيع ولا تتم زراعتها إلا عند زوال خطر الصقيع. وتزرع محاصيل أخرى في الشتاء وتُسمى المحاصيل الشتوية Winter crops، حيث تنمو هذه المحاصيل بشكلٍ أفضل عند درجات الحرارة المنخفضة، ومن أهم هذه المحاصيل القمح, والشعير, والشوفان, والعدس, والفول, والحمص, والشوندر السكري وغيرها. وغالباً ما تحتاج معظم هذه الأنواع للتعرض في أحد أطوار نموها لدرجات حرارة منخفضة حتى تتهيأ للإزهار. بشكلٍ عام, لكل نوع محصولي مجال محدد من درجات الحرارة ما بين درجتين صغرى (Minimum temperature) وعظمى (Maximum temperature) يكون بينهما النبات بحالة فعّالة، حيث تستمر فيه العمليات الحيوية والاستقلابية ويستمر بالنمو والتطور, وهناك درجة حرارة مثالية (Optimum temperature)، وهي التي يحدث عندها أفضل نمو للنبات. ويتوقف النمو عند درجات الحرارة الأعلى من درجات الحرارة العظمى وعند درجات الحرارة الأدنى من درجات الحرارة الصغرى, وتختلف درجات الحرارة المثالية باختلاف مراحل النمو التي يمر بها النبات. وتؤثر درجة الحرارة بشكلٍ مباشر أو غير مباشر في كافة العمليات الحيوية والفيزيولوجية التي تجري داخل النبات، فهي تؤثر في عمليتي التمثيل الضوئي

والتنفس، حيث يزداد معدل التمثيل الضوئي بارتفاع درجة الحرارة حتى حدٍ معين، ويزداد كذلك معدل التنفس. وعند درجات الحرارة العالية يمكن أن يزداد التنفس بوتيرةٍ أعلى من التمثيل الضوئي، وتصبح معدلات الهدم أعلى من معدلات البناء، ما يؤدي إلى توقف النمو.

ينخفض معدل التمثيل الضوئي عند درجات الحرارة المنخفضة، ما يؤدي إلى تباطؤ معدلات النمو, وتؤثر درجات الحرارة المنخفضة سلباً في معدل امتصاص الماء والعناصر المغذية، حيث تقل القدرة الامتصاصية للجذور بسبب انخفاض سرعة تنفس الخلايا الجذرية, وزيادة لزوجة الأغشية الخلوية, وضعف حركة الماء والأملاح المعدنية في التربة. وينخفض امتصاص الماء والعناصر المغذية أيضاً عند درجات الحرارة المرتفعة، بسبب تأثيرها في النشاط الأنزيمي للأحياء الدقيقة التي تقوم بهدم المادة العضوية. وتسهم درجات الحرارة المرتفعة في زيادة معدل فقد المياه بالنتح من الأوراق، والتبخر بشكلٍ مباشر من سطح التربة. وتقلل الحرارة المرتفعة من حيوية حبوب اللقاح, وتسبب جفاف المياسم، الأمر الذي يؤثر سلباً في نسبة التلقيح والاخصاب والعقد، ما يؤثر سلباً في عدد الحبوب المتشكلة وغلة المحصول الاقتصادية.

تكيف النباتات مع درجات الحرارة المرتفعة Plant adaptation to high temperatures

تكون درجات الحرارة المرتفعة، الأعلى من درجة الحرارة المثالية مجهدة للنبات, وغالباً ما يترافق إجهاد الحرارة المرتفعة مع الإجهاد المائي، حيث تقوم النباتات في البيئات الشحيحة بالمياه Water-limited environments بإغلاق مساماتها للحد من فقد المياه بالنتح، ولكن يؤدي ذلك إلى تعطيل التأثير المبرد Cooling effect لعملية النتح، ما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الأوراق، وتتعرض النباتات لإجهاد الحرارة المرتفعة، ويؤدي حدوث التحميل الحراري الزائد إلى احتراق الأوراق Leaf firing. ويؤدي إجهاد الحرارة المرتفعة إلى ازدياد معدل التنفس، وتراجع معدل التمثيل الضوئي، وتصنيع المادة الجافة بشكلٍ ملحوظ، ما يؤدي إلى انخفاض معدل صافي التمثيل الضوئي Net Assimilation Rate (NAR)، ويمكن أن يصاب النبات بالجوع. وتعمل الحرارة المرتفعة على تسريع معدلات النمو خلال مراحل النمو المختلفة للمحصول، الأمر الذي يؤدي إلى تقصير كلٍ من طول مرحلة النمو الخضري والثمري، ما يؤثر سلباً في كمية المادة الجافة المصنّعة, وتراجع عدد الأجزاء الاقتصادية (البذور، الحبوب، الثمار) المتشكلة ودرجة امتلائها، ما يؤدي في النهاية إلى انخفاض الغلة الاقتصادية للمحصول. وتؤثر الحرارة المرتفعة أيضاً سلباً في الخصائص النوعية والتصنيعية لبعض المحاصيل،

مثل تراجع كمية السكريات المتراكمة في جذور الشوندر السكري، وارتفاع نسبة البروتينات في حبوب القمح والشعير وغيرها.

تنتشر الأنواع النباتية رباعية الكربون بشكلٍ أساسي في المناطق الحارة ذات السطوع الشمسي العالي، وتمتلك مثل هذه الأنواع النباتية مجموع من الآليات التي تمكنها من التكيف مع تلك البيئات أهمها:

1- آلية تركيز الكربون في خلايا الحزم الوعائية، حيث إنّ كلفة تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في خلايا الحزم الوعائية هي 2ATP لكل جزيء، وبالتالي فإنّ إجمالي الطاقة اللازمة لتثبيت غاز الفحم في النباتات رباعية الكربون هي 5ATP + 2NADPH، فهي تحتاج إلى عدد أكبر من الفوتونات الضوئية لتصنيع كمية أكبر من المركبات الغنية بالطاقة خلال تفاعلات الضوء أثناء علية التمثيل الضوئي.
2- إن آلية تركيز الكربون تضمن إتاحة نسبة أكبر من غاز الفحم إلى الأوكسيجين عند المواقع الفعّالة للأنزيم روبيسكو، ما تحول دون حدوث التنفس الضوئي Photorespiration، لذلك تكون نقطة التعويض الحراري مرتفعة في الأنواع النباتية رباعية الكربون بالمقارنة مع الأنواع النباتية ثلاثية الكربون (نقطة التعويض الحراري (Temperature compensation point): هي النقطة التي تتساوى عندها كمية CO_2 المفقودة بالتنفس مع كمية CO_2المثبتة بعملية التمثيل الضوئي).
3- إن الأنزيم PEP carboxylase أقل حساسية لارتفاع درجة الحرارة من الأنزيم Rubisco.

تتأثر النباتات ثلاثية الكربون بارتفاع الحرارة بشكلٍ أكبر من النباتات رباعية الكربون, وتتوقف الأضرار التي تحدث للمحاصيل نتيجة تعرضها للحرارة المرتفعة على درجة الحرارة التي يتعرض لها النبات, ومدة تعرضها لهذه الحرارة، ونوع المحصول أو الصنف المزروع، وطور نمو النبات, والمحتوى المائي للأنسجة (حيث تنخفض المقدرة على تحمل الحرارة المرتفعة بازدياد المحتوى المائي للأنسجة). بشكل عام, تستطيع النباتات أن تتجنب الحرارة المرتفعة من خلال إبقاء درجة حرارتها أقل بكثير من درجة حرارة الوسط المحيط، وذلك من خلال الآليات التالية، (الشكل، 87):

1- زيادة معدل فقد الماء بالتبخر- نتح، لما لهذه العملية من تأثيرٍ مبرد للنبات.
2- تشكل الترسبات الشمعية والزغب الأبيض التي تعكس جزءاً من الأشعة الواصلة للنبات، ما يقلل من حدوث التحميل الحراري الزائد للأوراق, وتقلل من فرق ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط (VPD).

3- التوجه الرأسي للأوراق، حيث يساعد في تخفيض درجة حرارة الأوراق بمقدار 3-5 درجة مئوية .

3- تظليل الأوراق للأنسجة النباتية الحساسة للأشعة الشمسية.

وهناك نباتات قادرة على **تحمل** درجات الحرارة المرتفعة والاستمرار في النمو، وذلك من خلال امتلاكها لآليات مرتبطة بالتحمل، أهمها:

- المحافظة على سلامة الأغشية السيتوبلاسمية Cytoplasmic membrane stability، وذلك عن طريق زيادة نسبة الأحماض الدهنية المشبعة التي تحتاج إلى درجات حرارة أعلى حتى تتميع وتتخرب بالمقارنة مع الأحماض الدهنية غير المشبعة. ويزداد عادةً في الأنواع النباتية المتحملة للحرارة المرتفعة نشاط الأنزيم فوسفوليباز-A، الذي يعمل على تحويل الأحماض الدهنية غير المشبعة إلى نظيراتها المشبعة.
- زيادة معدل تصنيع بروتينات الصدمة الحرارية Heat shock proteins، التي تعمل على حماية المكتنفات الخلوية من تأثير الحرارة المرتفعة.

الشكل رقم (87): مخطط يبين أهم الآثار الناتجة عن إجهاد الحرارة المرتفعة وآليات مقاومته.

Damascus University

بروتينات الصدمة الحرارية Heat Shock Proteins (HSPs)

تتشكل بروتينات الصدمة الحرارية في عدد كبير من الأنواع النباتية، عندما تزيد درجة الحرارة عن 32-33 درجة مئوية سواءً كان هذا الارتفاع بطيئاً أو سريعاً، ويمكن أن تتشكل هذه البروتينات في السيتوبلاسم أو الصّانعات الخضراء أو الميتوكوندرية, وتعمل هذه البروتينات على زيادة تحمل النباتات لإجهاد الحرارة المرتفعة، وفق الآتي:

- رغم أنّ آلية التحمل لا تزال غير واضحة تماماً, ولكن تزداد مقدرة النباتات على تحمل إجهاد الحرارة المرتفعة بزيادة نسبة هذه البروتينات, وتبعاً للعديد من الباحثين فإنّ هذه البروتينات تقوم بحماية البروتينات الأساسية من خلال العمل على لف هذه البروتينات Folding والمحافظة على استقرارها Stabilization، ومن ثمّ نقل البروتينات عبر الأغشية وتجميعها.
- تعمل بروتينات الصدمة الحرارية على إصلاح البروتينات المخربة جزئياً والقابلة للإصلاح، ما يساعد النبات على استرجاع نموه عند زوال الإجهاد.
- تعمل على التخلص من البروتينات المخربة غير القابلة للإصلاح.

لا بد من الإشارة إلى أنه ليس من الضروري أن تتشكل بروتينات الصدمة الحرارية عند إجهاد الحرارة المرتفعة فقط, وإنّما لوحظ تشكل هذه البروتينات عند المعاملة بالأرسنين والعناصر الثقيلة, والكحول الإيثيلي, وحمض الأبسيسيك, والإجهاد المائي, وجرح أجزاء من النبات, ما يكسب النباتات الوقاية من إجهاد الحرارة المرتفعة حتى قبل التعرض لها.

تكيف النباتات مع درجات الحرارة المنخفضة Plant adaptations to low temperatures

تتعرض العديد من النباتات لدرجات حرارة منخفضة خلال مراحل نموها المختلفة, ويمكن القول إنّ النباتات تتعرض لإجهاد الحرارة المنخفضة عندما تنخفض درجات الحرارة عن الحد الأدنى لتحملها. إذا ما علمنا أنّ درجات الحرارة الصغرى في نحو ثلثي مساحة اليابسة تنخفض إلى ما دون الصفر المئوي, وتنخفض في ثلثها الآخر إلى ما دون -10 °م, لذلك فإنّه من غير المستغرب أنّ إجهاد الحرارة المنخفضة هو من أكثر أنواع الإجهاد المدروسة عالمياً. إنّ لانخفاض درجات الحرارة آثاراً سلبية في النبات، حيث تقلل من معدل التمثيل الضوئي والعمليات الإستقلابية الأخرى في النبات, وتخفض من سرعة امتصاص الماء والعناصر المعدنية، الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض نسبة الإنبات, وتباطؤ معدلات النمو, ما يؤخر الوصول إلى مرحلة النمو الخضري والتكاثري, وعند حدوث الصقيع يمكن أن تتشكل البلورات الثلجية ويتجمد الماء في الخلايا ما يؤدي إلى

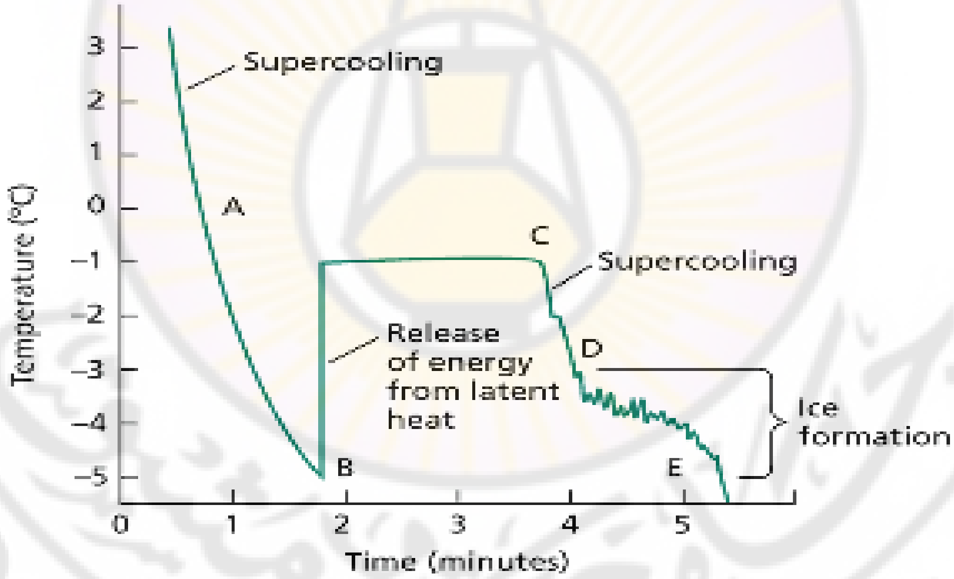
موتها. تتوقف الأضرار الناجمة عن درجات الحرارة المنخفضة على النوع والصنف النباتي, ودرجة الحرارة المنخفضة التي يتعرض لها النبات, وطول فترة التعرض للحرارة المنخفضة, ومرحلة النمو عند التعرض لهذه الحرارة, بالإضافة لمحتوى الأنسجة من الرطوبة. وهناك أنواع حساسة وأخرى متحملة للحرارة المنخفضة، ومن أهم الأنواع النباتية الحساسة للحرارة المنخفضة، البندورة, والذرة الصفراء, والقطن, وفول الصويا, والرز. وحسب شدة أو مدى انخفاض درجة الحرارة، يقسم إجهاد الحرارة المنخفضة إلى إجهاد البرودة Chilling stress، وإجهاد الصقيع Frost stress.

إجهاد البرودة: وهو الإجهاد الناتج عن انخفاض درجة الحرارة بشكلٍ يؤدي إلى حدوث أضرار في النبات، ولكن غير كافٍ لتجمد الماء الذي يؤدي إلى موت النبات. وعادةً ما يحدث هذا النوع من الإجهاد عند درجات الحرارة بين 0- 10 درجة مئوية. يحدث هذا الإجهاد عادة في الأنواع النباتية المتأقلمة مع البيئات الدافئة في المناطق الإستوائية وشبه الإستوائية. يؤدي الضرر الناتج في هذه الحالة بشكل أساسي إلى تباطؤ معدل العمليات الاستقلابية المختلفة في النبات, و تصبح الأغشية الخلوية لزجة وأكثر صلابة، حيث , يؤدي انخفاض الحرارة في الأنواع الحساسة إلى تحول الأحماض الدهنية التي تدخل في تركيب الأغشية من الحالة السائلة إلى الحالة شبه الصلبة، وهذا يؤثر بشكلٍ كبير في نفاذية هذه الأغشية. ولوحظ أنّ الأحماض الدهنية المشبعة هي التي تبدي هذا النوع من التبدل عند انخفاض الحرارة, لذلك لوحظ أنّ الأنواع الحساسة تحتوي على نسبة عالية من الأحماض الدهنية المشبعة بالمقارنة مع الأحماض الدهنية غير المشبعة، ويُلاحظ العكس في الأنواع النباتية المتحملة.

يزداد الضرر الناتج عن إجهاد الحرارة المنخفضة بازدياد الشدة الضوئية, حيث تؤدي هذه الظروف إلى حدوث التثبيط الضوئي للنظام الضوئي الثاني بشكلٍ خاص, وذلك لأنّ معدل التمثيل الضوئي ينخفض بانخفاض الحرارة بشكل لا يتناسب مع الطاقة الضوئية العالية الداخلة في تفاعلات الضوء. ويزيد تقسية النباتات بتعريضها بشكلٍ تدريجي لدرجات حرارة منخفضة من تحملها لإجهاد البرودة, حيث يتم تصنيع مجاميع جديدة من البروتينات تُسهم في زيادة تحمل النباتات لإجهاد البرودة. وتتباين أجزاء النبات المختلفة في حساسيتها لإجهاد البرودة, فعلى سبيل المثال تكون الأوراق القديمة والكامبيوم في الجذور هي الأجزاء الأكثر حساسية للبرودة في نبات القهوة (*Coffea arabica*), وليس الأوراق الحديثة. وتختلف كذلك أطوار النمو في حساسيتها لدرجات الحرارة المنخفضة, والأطوار الأكثر حساسية هي الإنبات ونضج حبوب الطلع، ونضج الثمار, حيث تكون النباتات في هذه المراحل حساسة جداً لتشكل جذور الأوكسجين الحرة Reactive

Oxygen Species (ROS) التي تتشكل خاصةً عند ظروف الشدة الضوئية العالية، لأنّ مضادات الأكسدة تكون إما غير متشكلة بعد عند الإنبات، أو أصبحت غير فعّالة عند مرحلة النضج.

إجهاد الصقيع: يحدث هذا النوع من الإجهاد عندما يتعرض النبات لدرجات حرارة أقل من الصفر ولفترة طويلة نسبياً، ما يؤدي إلى تشكل بلورات ثلجية في المسافات بين الخلوية وضمن جدران الخلايا في البداية، ومن ثم يمتد إلى داخل بروتوبلازم الخلايا، ما يؤدي إلى تخربها وموتها. ويؤدي تشكل البلورات الثلجية في المسافات البينية إلى انتقال الماء من داخل الخلايا إلى خارجها، ما يؤدي إلى جفاف البروتوبلاسم ضمن الخلايا وزيادة تركيزها وبالتالي توقف العمليات الاستقلابية فيها, وباستمرار الصقيع, يمتد تشكل البلورات الثلجية إلى داخل الخلية مؤدياً إلى تخربها وموتها، (الشكل، 88).



الشكل رقم (88): آلية تشكل البلورات الثلجية في خلايا النباتات الراقية (مثال مأخوذ من خلايا برانشيمية لثمرة الخيار (*Cucumis sativus* L.).

تتباين الأنواع النباتية التي تكون مقاومة للبرودة في تحملها لإجهاد الصقيع. بشكلٍ عام، يمكن إبقاء البذور وغيرها من الأجزاء النباتية ذات المحتوى الرطوبي المنخفض عند

درجات حرارة قريبة من الصفر إلى أمد غير محدود. ويمكن للأجزاء الرطبة من النبات أن تتحمل الصقيع إذا ما تمّ تعريضها للصقيع بشكلٍ سريع ومفاجئ، حيث تتشكل في هذه الحالة بلورات ثلجية صغيرة وغير مؤذية, ولكن يحدث الضرر عند التعرض لدرجات الحرارة المنخفضة بشكلٍ تدريجي وبطيء وإنّ تشكل البلورات الثلجية ونموها بشكلٍ بطيء هو الذي يؤدي إلى تشكل بلورات ثلجية كبيرة الحجم تخترق الخلايا وتخربها.

إن تشكل البلورات الثلجية يتطلب وجود المئات من ما يسمى نويّات الجليد Ice nucleation، وبعض السكريات المتعددة polysaccharides، ويمكن لبعض البروتينات أن تقوم بهذا الدور.

تكيّف النباتات لتحمل ومقاومة الصقيع:

هناك أنواع نباتية تكون متأقلمة أو متكيفة مع ظروف الصقيع, وذلك بفضل آليات تكيفية تُسهم في زيادة مقدرة هذه الأنواع على تحمل أو مقاومة الصقيع, وأهم هذه الآليات:

1- حمض الأبسيسيك (ABA): بيّنت دراسات عديدة أنّ حمض الأبسيسيك يعمل على زيادة مقدرة النبات على تحمل إجهاد الصقيع, فعلى سبيل المثال, يمكن لنباتات الفصة أن تتحمل درجات حرارة تصل إلى -10 °م من خلال التعريض المسبق للنباتات لدرجات حرارة منخفضة (4 °م), أو من خلال معاملتها بحمض الأبسيسيك بدون أي تقسية سابقة. تسبب هذه المعاملات تغيراً في نظام تصنيع البروتينات, وإنّ تصنيع هذه البروتينات مهم جداً من أجل تحمل الصقيع. وقد لوحظ تشكل هذه البروتينات الدفاعية أثناء التأقلم لإجهاد الصقيع نتيجة التغيَر في التعبير المورثي Gene expression.

يعتقد أن هذه البروتينات تُسهم في حماية الخلايا من التجفاف الناتج عن إجهاد الصقيع, وذلك من خلال المحافظة على ثباتية البروتينات الأخرى وثباتية الأغشية الخلوية. ولوحظ في أنواع متحملة للبرودة كالقمح الشتوي والشيلم والسبانخ، أنّه يمكن أن تتم أقلمتها مع ظروف الصقيع وزيادة تحملها من خلال تعريض النباتات لإجهاد متوسط الشدة من الجفاف, أو من خلال تعريضها لدرجات حرارة منخفضة، حيث أنّه يزداد في كِلتا الحالتين تركيز حمض الأبسيسيك في الأوراق.

2- الحد من نمو البلورات الثلجية في الفراغات البينية خارج الخلايا: يمكن أن يتم ذلك من خلال تشكل بروتينات متخصصة مضادة للتجمد Antifreeze proteins، تعمل على الحد من نمو البلورات الثلجية, ولا يعتمد مبدأ عملها على تخفيض درجة التجمد من خلال

زيادة نسبة الذائبات, ولكن ترتبط هذه البروتينات مع سطح البلورات الثلجية وتمنع نموها أو تبطئه. ويُحرض التعرض لدرجات حرارة منخفضة تصنيع هذه البروتينات. لوحظ على سبيل المثال أنه في أوراق نبات الشيلم, تتجمع هذه البروتينات في خلايا البشرة وفي الخلايا المحيطة بالفراغات البينية، وهذا يُسهم في الحد من نمو البلورات الثلجية إلى داخل الخلايا. ويُسهم كذلك الأمر, وجود السكريات وبعض البروتينات المتشكلة عند درجات الحرارة المنخفضة في حماية المكتنفات الخلوية، وذلك من خلال المحافظة على ثباتية البروتينات والأغشية الخلوية, فعلى سبيل المثال كلما زاد تركيز السكروز في أوراق نباتات القمح الشتوي ازداد تحملها للصقيع. وبشكلٍ عام، السكروز هو الأكثر ارتباطاً مع تحمل الصقيع في الأنواع المتحملة, ولكن في بعض الأنواع هناك سكريات أخرى كالرافينوز والفركتوز والسوربيتول والمانيتول، يمكن أن تؤدي الدور نفسه في زيادة تحمل الصقيع. تتراكم السكريات المنحلة/الذوّابة في جدران الخلايا ما يُسهم في الحد من نمو البلورات الثلجية إلى داخل الخلايا.

3- آليات التبريد العميق والتجفاف البطئ أساسية في مقاومة الصقيع:

إن تأقلم العديد من الأنواع النباتية وخاصةً الأشجار الموجودة في الغابات المنتشرة في جنوب شرق كندا وشرق الولايات المتحدة مع الصقيع يعتمد على إيقاف تشكل البلورات الثلجية عند درجات حرارة أقل بكثير من درجة التجمد النظرية بآليةٍ تُسمى آلية التبريد العميق. وتُلاحظ هذه الآلية في عدد كبير من الأشجار كالبلوط والجوز والتفاح والأجاص وغيرها. وتستطيع النباتات أن تتحمل بهذه الآلية درجات حرارة تصل إلى -40 °م (يتجمد الماء النقي بشكل آني ودون الحاجة إلى نويات عند الدرجة -38.1 °م, ولكن بسبب وجود الذائبات فإنّها تنخفض حتى -40 °م في النباتات), والنباتات التي تتحمل درجات حرارة أقل من ذلك فهي تتحمل الصقيع بآلية أخرى هي آلية تحمل التجفاف البطيء. تفتقر السيتوبلاسم في النباتات المقاومة للصقيع إلى النويات الضرورية لتشكيل البلورات الثلجية، وذلك يسمح بتطبيق آلية التبريد العميق لدرجات أدنى بكثير من درجة التجمد دون تشكل هذه البلورات. بالإضافة إلى ذلك, فإنّ جدران الخلية تعمل حاجزاً لكل من نمو البلورات الجليدية من الفراغات البينية إلى جدران الخلية، وكذلك يمنع فقد الماء السائل من البروتوبلاسما إلى البلورات الثلجية المتشكلة في الفراغات البينية خارج الخلايا. تستطيع العديد من البراعم الزهرية النجاة من الشتاء القاسي من خلال التبريد العميق كما في العنب والدراق, ولكن تصبح هذه البراعم أقل تحملاً في الربيع، حيث إنّ الماء الموجود في القمم الميريستيمية ينتقل إلى البلورات الثلجية المتشكلة ما يؤدي إلى قتل هذه البراعم الزهرية نتيجة جفافها. ولا تعتمد مقاومة الصقيع في البراعم الزهرية لكل من

التفاح والدراق والبراعم الخضرية للأشجار المثمرة على آلية التبريد العميق، وإنّما تعتمد على مقاومة تجفاف السيتوبلاسما خلال تشكل الجليد في الفراغات بين الخلوية. هذه الآلية تكون متطورة جداً في الأشجار المنتشرة في شمال كندا وآلاسكا وشمال أوروبا وآسيا، حيث تكون درجات الحرارة الدنيا أقل بكثير من -40 °م. هذه الآلية تفسر كيف أن الأنواع النباتية المقاومة للصقيع تكون متحملة لنقص الماء أثناء فصل النمو, وأنواع كالسرو والخوخ تتحمل درجات حرارة منخفضة جداً من خلال حصر تشكل البلورات الثلجية في الفراغات البينية خارج الخلايا، ولكن ذلك يعتمد عل التبريد البطيء والمتدرج والتجفاف البطيء والمتدرج للبروتوبلاسما حيث إنّ تعريضها لدرجات حرارة منخفضة جداً بشكل مفاجئ قبل عملية التقسية الكاملة يؤدي إلى تجمد البروتوبلاسما داخل الخلية وموتها.

تكيف النباتات لتحمل ملوحة التربة Plant adaptation to tolerate salinity

تتعرض النباتات النامية قرب الشواطئ البحرية وفي الأماكن التي يختلط فيها الماء العذب بالماء المالح إلى مستوياتٍ عالية جداً من الملوحة, وفي المناطق الداخلية, تتشكل الأراضي الملحية نتيجة عوامل الحت للصخور الملحية ومن ثمّ نقل هذه الأملاح بوساطة الرياح أو المياه الجارية إلى أماكن أخرى، ما يُحوّل هذه الأراضي إلى أراضٍ غير صالحة للزراعة. ولكن من العوامل الأساسية التي تُسهم في زيادة نسبة الأراضي المتملحة، الممارسات الزراعية للإنسان التي تتمثل بإزالة الأشجار والنباتات المعمرة, والرعي الجائر، واتباع الطرق التقليدية الخاطئة في الري (الري بالتطويف، أو الغمر)، باستعمال مياه ذات نوعية متدنية، مع غياب الصرف الجيد. ويكون هذا النوع من التملح Salinization أكثر وضوحاً في الأراضي الجافة وشبه الجافة، حيث تكون المياه الأرضية غنية بالأملاح، ولكن عندما تكون هذه الأراضي مزروعة بالأشجار أو بالنباتات المعمرة ذات الجذور المتعمقة (10-30 م) تحت سطح التربة, فإنّ منسوب الماء الأرضي يبقى منخفضاً أو بعيداً عن مستوى سطح التربة, ولكن عندما تستبدل هذه النباتات بالحوليات ذات الجذور غير المتعمقة أو يتم استعمال أنظمة الري دون مراعاة الصرف الجيد, سوف يرتفع منسوب الماء المحمل بالأملاح بالخاصية الشعرية إلى مستوى سطح التربة، وخلال فصل الصيف الجاف والحار يتبخر الماء وتتزهر الأملاح فوق سطح التربة. وتُعد ملوحة التربة من أهم العوائق التي تحد من نمو وإنتاجية النباتات. وتشكل الأراضي المتملحة قرابة 20% من مجموع الأراضي المزروعة عالمياً، و50% من الأراضي المروية. تسبب الملوحة نوعين أساسيين من الإجهاد:

1- الإجهاد الحلولي Osmotic stress.

2- السمية الأيونية Ionic toxicity.

وتتوقف أضرار الملوحة على النوع والصنف النباتي, ومرحلة النمو, ودرجة التملح, ونوع الملح (الأملاح الأكثر انتشاراً هي كلورات, سلفات، وبيكربونات، الصوديوم, والكالسيوم، والمغنزيوم), وإنّ أملاح كربونات وكلور الصوديوم هما الأكثر ضرراً).
يسبب إجهاد الملوحة إلى أضرار عامة كثيرة أهمها، عرقلة إنبات البذور, وتقزم النباتات النامية في البيئات المتملحة Stunted، وتكون النباتات ذات أوراق خضراء داكنة، وغالباً سميكة وعصاريةً Succulent بالمقارنة مع النباتات المزروعة في البيئات غير المتملحة, وتؤدي الملوحة إلى احتراق حواف الأوراق، ولاسيما الأوراق السفلية القديمة، واصفرار الأوراق وسقوطها، وتراجع معدّل نمو الجذور، والموت التدريجي، أو المفاجئ للنباتات. ويسبب ارتفاع تركيز الأملاح الذوّابة في محلول التربة ازدياداً في معدل امتصاص الشوارد المعدنية الضارة، مثل الصوديوم Na^+، والكلور Cl^-، انخفاض معدّل امتصاص الشوارد الموجبة الضرورية للنبات، مثل شاردتي البوتاسيوم K^+ والكالسيوم Ca^{2+}. ويمكن أن يسبب امتصاص شوارد الكلور تغييراً في امتصاص الشوارد السالبة الأخرى، مثل الفوسفات (PO_4^{--})، والنترات (NO_3^-)، ولكن عادةً ما يكون مثل هذا التأثير معقداً، ويختلف باختلاف الأنواع النباتية.

تتكيف النباتات لتحمل تراكيز عالية من الملوحة عبر آليتيين أساسيتين هما **تجنب الأملاح وتحملها**:
تجنب الأملاح: لتقليل الضرر الناتج عن الملوحة, لابد من إقصاء الملح ومنع وصوله إلى الخلايا الميرستيمية، ولاسيما في الأفرع والأوراق المستمرة بالنمو والفعّالة بعملية التمثيل الضوئي, و يتم ذلك من خلال:

- ✓ منع دخول الملح إلى الجذور ومنه إلى النسيج الوعائي الخشبي الناقل ومنه إلى الساق والأفرع النامية، حيث يتم إغلاق قنوات دخول شوارد الصوديوم - Na^+ influx channels.
- ✓ يمكن أن تدخل شوارد الصوديوم إلى الجذور ولكن يقوم النبات بإخراجها بشكلٍ فعّال Active transport إلى الوسط المحيط بعكس تدرج التركيز, حيث يتم إغلاق قنوات دخول الصوديوم وفتح قنوات خروج الصوديوم Na^+- efflux channels وذلك يستهلك قدراً مهماً من الطاقة, وعلى العكس, بالنسبة إلى شوارد الكلور فإنّه يتم الحد من دخولها من خلال خاصية النفاذية الضعيفة للأغشية البلاسمية في الجذور لهذا الأنيون.

✓ تقليل كمية الصوديوم الواصلة إلى الأوراق من خلال التقليل من امتصاصها مع التيار النتحي خلال انتقاله من الجذور إلى الأوراق (اصطفائية في خلايا المجموع الخضري).

✓ طرد الأملاح بوساطة غدد ملحية متخصصة: حيث إنّ بعض النباتات المقاومة للملوحة كنبات (*Tamarix* sp) ونبات (*Atriplex* sp) لا تقوم بمنع دخول الأملاح عند مستوى الجذور, وإنّما تدخل الأملاح إلى النبات وتنتقل عبر تيار النتح، ويتم تجميعها في غدد ملحية على سطح الأوراق حيث تتصلب فيها الأملاح وتصبح غير مؤذية للنبات. وتقسم الغدد الطارحة استناداً إلى قوامها إلى ثلاثة أنواع أساسية:

1- الغدد الطارحة ثنائية الخلية وهي شائعة في الأعشاب.

2- الغدد الطارحة عديدة الخلايا، وتُلاحظ في الأنواع النباتية ثنائية الفلقة.

3- الشعيرات المثانية، وتوجد في نباتات العائلة السرمقية.

تحمل الملوحة من خلال آلية التعديل الحلولي: وذلك من خلال إما تجميع الأملاح ضمن الفجوات الخلوية, أو من خلال تصنيع الذائبات العضوية التوافقية ضمن الستوبلاسما. ومن أهم هذه الذائبات البرولين, والجلايسين بيتين, والسوربيتول، والسكروز. ويتميز تصنيع هذه الذائبات بأنّه مكلف جداً للنبات، حيث يستهلك 10% من وزن النبات.

وترتبط كفاءة الطراز الوراثي على تحمل المستويات المرتفعة من شوارد الصوديوم في الأنسجة النباتية بوجود الناقل البروتيني Na^+/H^+ antiporter المرتبط بأغشية الفجوات، الذي يُساعد في احتجاز شوارد الصوديوم ضمن الفجوات. وبيّنت الدراسات أنّ زيادة مستوى التعبير الوراثي Over expression للمورث المسؤول عن تصنيع مثل هذا البروتين (NHX_1) قد زاد من تحمل الملوحة في البندورة Tomato، والخردل Brassica، ونبات Arabidopsis (Stirzaker *et al*., 2002).

وتُسهم تقسية النباتات في زيادة مقدرتها على تحمل الملوحة. ويساعد النقل المرحلي للأنسجة النباتية من الأوساط الملحية غير المميتة إلى التراكيز الملحية العالية في تحسين التكيّف مع المستويات الملحية العالية. وقد تمّ عزل العديد من السلالات المتحملة للملوحة استناداً إلى هذه الطريقة. وتساعد أيضاً إضافة حمض الأبسيسيك (ABA) في زيادة مقدرة النباتات على تحمل الملوحة ، وذلك من خلال تحفيز تصنيع بروتينات معينة (ذات وزن جزيئي 26 كيلو دالتون) تُسهم في زيادة مقدرة النبات على تحمل الملوحة.

تكيف الأنواع النباتية مع البيئات شديدة الرياح

هناك بيئات تتميز بشدة الرياح فيها, وهذه الرياح إما أن تكون في مناطق باردة كالتندرة وقد تحمل الرياح معها حبيبات الثلج, أو قد تكون في بيئات حارة كالبيئات الصحراوية وتحمل معها حبيبات الرمل التي تؤدي إلى دفن النباتات كما في مناطق تشكل الكثبان الرملية, بالإضافة إلى ذلك فإنّ الرياح تكون قوية أيضاً على شواطئ البحار والمحيطات وتحمل معها حبيبات الرمل التي تشكل كثباناً رملية تغطي النباتات القليلة التي تنمو في تلك المناطق. ومن أهم التكيفات أو التحورات التي تبديها النباتات لتتمكن من النجاة تحت هذه الظروف, امتلاكها لمجموع جذري قوي ومتعمق لتثبيتها في الأرض, ولامتصاص أكبر كمية ممكنة من الماء, بالإضافة إلى ذلك يكون المجموع الخضري مفترش على سطح التربة, وكبير بحيث إذا تمّ دفنه بالرمال يستطيع جزء منه البقاء والنجاة. وغالباً ما تكون أوراق النباتات عصيرية من أجل الحفاظ على محتواها المائي, بالإضافة إلى احتوائها على مواد صمغية تُساعد في التصاق الرمال على سطح الأوراق الأمر الذي يحرض تشكيل الأوبار على سطحها، وبالتالي يقلل من فقد الماء من هذه الأوراق. وتُعد نباتات (*Ambrosia chamissonis*) Beach-bur من أهم النباتات المنتشرة في مناطق الكثبان الشاطئية، بالإضافة إلى أنواع أخرى Sea Rocket (*Cakile maritima*) التي تتميز بامتلاكها لقرون تشبه الصاروخ إلى حدٍ ما، وتطفو على سطح الماء ما يمكنها من الانتقال بسهولة مع الأمواج والاستقرار في مناطق جديدة. وبالطبع تتميز النباتات الشاطئية بتحملها للملوحة وللرذاذ الملحي.

الفصل الثامن

تأثير العوامل البيئة في كفاءة استعمال المياه (إنتاجية المياه) في المحاصيل الحقلية

Influence of Environmental Factors on Water Use Efficiency (Water Productivity) in Crop Species

توجد العديد من الصفات Traits التي تؤثر في معدل نمو النبات، وتطوره، وإنتاجيتهِ في البيئات الشحيحة بالمياه Water-limited environments، ولكن بعض هذه الصفات، مثل البقاء على قيد الحياة Survival يمكن أنْ تكون مهمة ومناسبة في النظم البيئية الطبيعية Natural ecosystems، بيَد أنّها غير ملائمة في النظم البيئية الزراعية عندما يكون للإنتاجية Productivity أهمية كبيرة. ولسوء الحظ، يوجد تضارب بين معظم الآليات المرتبطة بتحمل الجفاف Drought tolerance وإمكانية تحقيق غلة اقتصادية عالية، بل على العكس توجد علاقة ارتباط عكسية بين مستوى التحمل والطاقة الإنتاجية، فعلى سبيل المثال، فإنَّ تجنب الجفاف من خلال تقليل الناقلية المسامية Stomatal Conductance (g) بهدف الحد من فقد الماء بالنتح Transpiration، يمكن أنْ يُؤثر سلباً في كفاءة النبات التمثيلية، نتيجة تراجع معدل انتشار غاز الفحم CO_2 diffusion عبر المسامات أثناء عملية التبادل الغازي عبر المسامات Stomata، الأمر الذي يؤثر سلباً في كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون المتاحة في مراكز التثبيت CO_2-fixation sites ضمن الصّانعات الخضراء، ما يؤثر سلباً في معدل التمثيل الضوئي Assimilation rate، ومن ثمَّ معدل تصنيع المادة الجافة وتراكمها Dry matter accumulation. وتؤثر بالمقابل زيادة نسبة الأجزاء الأرضية (المجموعة الجذرية) إلى الأجزاء الهوائية Root/shoot ratio، بهدف زيادة كمية المياه الممتصة سلباً في كفاءة توزيع المادة الجافة Partitioning efficiency، حيث تقل كمية المادة الجافة المسخّرة لمرحلتي النمو الخضري والثمري، الأمر الذي يؤثر سلباً في حجم المسطح الورقي الأخضر (دليل المساحة الورقية) الفعَّال في عملية التمثيل الضوئي، فتقل كمية الأشعة الضوئية الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي الممتصة Intercepted (I) light energy، الأمر الذي يؤثر سلباً في معدل تصنيع المركبات الغنية بالطاقة (NADPH, ATP) خلال تفاعلات الضوء، التي تؤثر بدورها في معدل تحويل الكربون المعدني إلى كربون عضوي خلال تفاعلات الظلام. ويؤثر بالمقابل سلباً في طول مرحلة الإزهار Flowering، ما يؤدي إلى تراجع عدد الأزهار المتشكلة، وزيادة نسبة

الزهيرات العقيمة، بالإضافة إلى تراجع كلٍ من طول فترة نمو الحبوب/ البذور، وفترة امتلائها، فيتراجع سلباً عدد الأجزاء الاقتصادية المتشكلة، ودرجة امتلائها، ما يؤثر سلباً في غلة المحصول الاقتصادية Economic yield.

انطلاقاً مما تقدم، كان لابدَّ من البحث عن الصفات المرتبطة بتحسين تحمل الجفاف مع المحافظة على الكفاءة الإنتاجية، لذلك اتجهت برامج التربية مؤخراً إلى التركيز على ما بات يُعرف حالياً بصفة كفاءة استعمال المياه Water Use Efficiency(WUE)، نظراً إلى وجود علاقة ارتباط موجبة ومعنوية بين زيادة قيمة كفاءة استعمال المياه وغلة المحصول الاقتصادية، التي تظهر بشكلٍ جلي من العلاقة المقترحة من قبل Passioura (1983):

$$GY = T_E \times WUE \times HI$$

حيث: GY: الغلة الحبية، **WUE:** كفاءة استعمال المياه، **HI:** دليل الحصاد، **T_E:** فقد المياه بالتبخر نتح.

تُشير هذه المعادلة إلى إمكانية زيادة غلة المحصول الحبية بزيادة قيمة كفاءة استعمال المياه، ولاسيما تحت ظروف الزراعة المطرية Rainfed conditions.

الصفات الفسيولوجية المنظمة لصفة كفاءة استعمال المياه

Physiological Traits Regulating water use Efficiency

تتحدد صفة كفاءة استعمال المياه بصفتين فسيولوجيتين مهمتين، هما معدل تمثيل الكربون، المسؤول عن إنتاج المادة الجافة Dry matter production، ومعدل النتح Transpiration rat، (T). ويتحدد معدل التمثيل الضوئي بدوره بمعدل انتشار غاز الفحم عبر المسامات، ومن ثمَّ كمية CO_2 المتاحة في مراكز التثبيت ضمن الصّانعات الخضراء (Stroma)، وكفاءة خلايا النسيج المتوسط Mesaphyll efficiency(gm)، ويتحدد معدل انتشار غاز الفحم بدوره، بالناقلية المسامية Stomatal (gs) conductance. ويتحدد معدل فقد المياه بالنتح بفرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط Vapor pressure difference(V)، بالإضافة إلى الناقلية المسامية. ويمكن أنْ توصف العلاقة بين هاتين الصفتين الفسيولوجيتين وصفة كفاءة استعمال المياه بالعلاقة الرياضية الآتية (Hubick et al.,1986):

$$WUE = (P_a - P_i) / 1.6V = (1 - P_i / P_a) / 1.6V$$

حيث:

P_a، و **P_i** هما ضغط / تركيز غاز الفحم في الوسط المحيط وضمن الفراغات الداخلية في الأوراق على التوالي.

V: فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط.

1.6: عامل الانتشارية Diffusivity factor بين كل من CO_2 وبخار الماء H_2O عبر المسامات.

أي أنَّ كمية بخار الماء المفقودة عبر المسامات خلال واحدة الزمن أكبر بـ 1.6 مرة من كمية CO_2 المنتشرة من الوسط المحيط إلى داخل الأوراق، لذلك يُقال إنَّ النبات يدفع ضريبة باهظة من الماء للحصول على CO_2 اللازم لعملية التمثيل الضوئي. تقترح المعادلة السابقة أنَّ قيمة كفاءة استعمال المياه تُنظم إما من خلال تغير النسبة P_i / P_a أو V. وأنَّ أي عامل وراثي أو بيئي يُمكن أنْ يُقلل من قيمة V سيزيد من قيمة WUE ‏(Richards,1991). ويُساعد تقليل كمية الأشعة الشمسية الواصلة إلى الغطاء النباتي، وتقليل درجة حرارة الأنسجة النباتية في تقليل قيمة (V)، ومن ثمَّ معدل فقد المياه بالنتح. وتُساعد أيضاً التربية لزيادة سماكة الترسبات الشمعية Waxy deposits فوق سطوح الأوراق (Johnson et al., 1983)، وزيادة كثافة الزغب الأبيض Pubescence ‏(Ghorashy et al., 1971) في تقليل قيمة (V)، ومن ثمَّ معدل فقد الماء بالنتح. وتُساعد حركة الأوراق الفعَّالة Active leaf movement في تقليل كمية الأشعة الضوئية الأمر الذي يقلل أيضاً من قيمة (V). وتُساعد حسب المعادلة السابقة كل تلك التكيفات في زيادة قيمة كفاءة استعمال المياه (WUE). وإنَّ التباين في نسبة P_i / P_a كعاملٍ آخر محدد لقيمة WUE، إنّما تتحدد بشكلٍ رئيس بالتباين في تركيز CO_2 داخل الأوراق (P_i)، لأنَّ تركيز CO_2 في الوسط المحيط عادةً ما يكون ثابتاً نوعاً ما، وبما أنَّ تركيز CO_2 الداخلي Intercellular CO_2 Concentration (P_i) يتحدد بكلٍ من معدل التمثيل الضوئي Assimilation rate ‏(`A´) (معدل استهلاك $CO_2$)، والناقلية المسامية ($g_s$)، لذلك فإنَّ نسبته A´` إلى g_s تعد بمنزلة مرآة جيدة لقيمة كفاءة استعمال المياه (WUE). وبالرغم من حقيقة أنَّ ازدياد الناقلية المسامية يؤدي إلى زيادة معدل انتشار CO_2، إلاَّ أنّه يؤدي بالمقابل إلى زيادة معدل فقد المياه بالنتح (T)، ما يؤدي إلى تقليل كفاءة استعمال المياه. ويمكن القول: إنّه عند أي مستوى من الناقلية

المسامية (معدل النتح) فإنَّ زيادة معدل التمثيل الضوئي جرَّاء زيادة كفاءة خلايا النسيج المتوسط (g_m) سوف تقلل من P_i، وبالتالي ستكون قيمة كفاءة استعمال المياه أعلى (Farquhar et al., 1989)، لذلك فإنَّ التباين في P_i ومن ثمَّ WUE يتحدد بكلٍ من الناقلية المسامية (g_s)، وكفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية (g_m).

صفات النبات المؤثرة في كفاءة استعمال المياه Plant Characters-WUE Influencing

إنَّ أي عامل يتعلق بخصائص النبات، أو بالبيئة، الذي يمكن أن يؤثر في العوامل المسامية، وكفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية، اللتين تنظمان معدل التمثيل الضوئي، ومعدل فقد المياه بالنتح، سوف يؤثر مباشرةً في قيمة كفاءة استعمال المياه.

1- تركيب الغطاء النباتي Canopy Structure: إذا كانت مقاومة الغطاء النباتي للحرارة المرتفعة Heat، وانتشار بخار الماء عالية، فإنَّ أية زيادة في الناقلية المسامية سوف تُبرد الهواء المحيط بالأوراق وتُرطّبه، ما يؤدي إلى تقليل فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط (VPD)، فيقل معدل فقد المياه بالنتح، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة قيمة كفاءة استعمال المياه (كفاءة النتح Transpiration efficiency)، (Read et al., 1991). لذلك، فإنَّ الأصناف التي تكون فيها الناقلية المسامية عالية سوف تُصنّع كمية أكبر من نواتج التمثيل الضوئي عند المستوى نفسه من كفاءة النتح (Farquhar et al., 1988). وتحت ظروف الزراعية الحقلية Field conditions، فإنَّ طبقة الهواء الساكنة المحيطة بالأوراق التي تتشكل فوق تيجان نباتات المحصول يُمكن أنْ تجعل عملية التبادل الغازي أقل اعتماداً على الناقلية المسامية، وهذا هو أحد العوامل المهمة المؤثرة في كفاءة النتح. لذلك، تعتمد مقاومة طبقة الهواء الساكنة عند مستوى تيجان النبات/ الغطاء النباتي على هندسة الغطاء النباتي Canopy architecture، التي تتحدد بدورها بحجم الأوراق، وترتيب توضع الأوراق على الساق، وطبيعة النمو Growth habit (مثال، مفترش Prostrate، أم قائم Erect)، وارتفاع الغطاء النباتي(Jarvis an Mc Naughton,1986).

2- حركة الأوراق والانعكاس عند سطوح الأوراق Leaf Movement and Surface Reflectance: إنَّ الأشعة الضوئية الواصلة إلى الأرض Incident radiation يمكن أن تُمتص بشكلٍ كامل من قبل الغطاء النباتي إذا كان يغطي سطح

الأرض بنسبة 100%. وقسم من هذه الأشعة (الأشعة الفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي) يُستعمل في عملية التمثيل الضوئي، لتصنيع المادة الجافة، والقسم الآخر يعمل على رفع درجة حرارة الأوراق، ومن ثمَّ زيادة معدل فقد المياه بالنتح (Boyer, 1992). وعادةً ما تكون كمية الأشعة الواصلة إلى الغطاء النباتي، والمثلى للحصول على أعلى قيمة لكفاءة استعمال المياه أقل من الأشعة الواصلة فعلاً إلى سطوح الأوراق. ويُعزى ذلك بشكلٍ رئيس إلى وجود علاقة ارتباط موجبة (خطية) بين معدل فقد المياه بالنتح وزيادة شدة الإشعاع الضوئي أو كمية الأشعة الضوئية الممتصة من قبل الأوراق، نتيجة ارتفاع درجة حرارة الأوراق، وانخفاض المقاومة المسامية Stomatal resistant، (r_s) لتدفق بخار الماء عبر المسامات، في حين يظهر معدل التمثيل الضوئي علاقة ارتباط عكسية بزيادة شدة الإشعاع الشمسي (Fischer and Turner, 1978). وإنَّ حركة الأوراق وانعكاس الأشعة عند سطوح الأوراق، ولاسيما في حال وجود طبقة من الترسبات الشمعية، سوف يُساعد في ضبط كمية الأشعة الضوئية الممتصة، وتحول دون حدوث تحميل حراري زائد، ما يُساعد في زيادة معدل التمثيل الضوئي، وتقليل معدل النتح في الوقت نفسه، فتزداد قيمة كفاءة استعمال المياه، ويمكن أنْ يكون ذلك مفيداً جداً في البيئات الشحيحة بالمياه، حيث يُسهم ذلك في التخلص من الأشعة الضوئية الزائدة على شكل حراري، ويحول دون تضرر الأوراق بتأثير الحرارة المرتفعة، ما يُساعد في زيادة كفاءة استعمال المياه، وكفاءة استعمال الأشعة الضوئية Radiation use efficiency (RUE) (Beg and Heuchelin, 1990).

وإنَّ وجود الزغب الأبيض، أو الترسبات الشمعية البيضاء على سطوح الأوراق يمكن أن تُسهما في ضبط درجة حرارة الأوراق ضمن المدى الطبيعي، ومن ثمَّ تحافظ على الميزان المائي Water balance داخل خلايا الأوراق (Ashraf and Karim, 1991). فعلى سبيل المثال، لوحظ أنَّ سلالات فول الصويا Soybean التي تكون أوراقها مغطاة بطبقة من الزغب الأبيض، كانت درجة حرارة الأوراق، ومن ثمَّ معدل فقد المياه بالنتح أقل بالمقارنة مع السلالات ذات الأوراق الجرداء (غير المزغبة) (Ghorashy et al., Glabrous leaves (1971.

3- المجموع الجذري Root system: يُمكن أنْ يؤثر توزع الجذور Root distribution، وكثافتها، ومقاومتها في استعمال المياه عبر الزمان والمكان. وتبعاً لذلك، فإنَّ معدل نمو الجذور وانتشارها ضمن قطاع التربة يمكن أنْ يؤثر في كفاءة استعمال المياه، ولاسيما خلال المراحل المبكرة من نمو المحصول. وفي الحالات التي يتراجع فيها محتوى التربة المائي، فإنَّ الإسراف في استعمال المياه خلال المراحل المبكرة من حياة

النبات، يمكن أنْ يقود إلى تعرُّض النباتات إلى ظروف العجز المائي خلال مراحل النمو الثمري. ففي مثل هذه الحالات، فإنَّ زيادة مقاومة النباتات لتدفق المياه خلالها من خلال انتخاب الطرز الوراثية التي تكون فيها أقطار الأوعية الناقلة الخشبية في الجذور الثانوية صغيرة يمكن أنْ تسهم في تغيير طراز استعمال المياه خلال مراحل النمو المختلفة (Passioura, 1972). ويمكن تبعاً لذلك أنْ يفقد النبات كمية المياه نفسها لإنتاج كمية أكبر من الغلة الاقتصادية. ومن المعروف، أنَّ كفاءة استعمال المياه تزداد بازدياد شدة الإجهاد المائي. وعندما يكون هناك طرازان وراثيان مزروعان بجانب بعضهما، ويتعرضان إلى مستوياتٍ متزايدة من العجز المائي، فكلاهما سيبدي ازدياداً في قيمة كفاءة استعمال المياه. وإذا كان أحد هذين الطرازين الوراثيين يمتلك مجموعاً جذرياً متعمقاً ومتشعباً، بحيث يكون قادراً على امتصاص كمياتٍ من المياه - من طبقات التربة العميقة الرطبة- تكفي لتعويض الماء المفقود بالنتح، فستكون كفاءة استعمال المياه في مثل هذا الطراز الوراثي متدنية بالمقارنة مع الآخر، في حين يمكن أنْ يعطي غلة حبية أعلى بقليل من الطراز الآخر. وهذا الأمر يقترح بأنّه تحت مثل هذه الظروف فإنَّ الانتخاب لقيمة مرتفعة لصفة كفاءة استعمال المياه سيكون مضللاً، وغير مفيد، لأنَّ قد يفضي إلى انتخاب طرز وراثيةٍ ذات كفاءة إنتاجية أقل بالرغم من ارتفاع قيمة صفة كفاءة استعمال المياه، لأنَّ مقدرتها على استخلاص المياه ضعيفة، الأمر الذي يؤدي إلى حدوث تراجع كبير في محتوى الماء النسبي في الأوراق، ومن ثمَّ تراجع كبير في الناقلية المسامية، ما يؤثر سلباً في معدل انتشار غاز الفحم، ومن ثمَّ معدل التمثيل الضوئي. وقد تمَّ التأكد من مثل هذا الافتراض النظري تجريبياً، حيث لوحظ أنَّ طرز القمح الأكثر حساسية للجفاف (ذات إنتاجية أقل)، قد اتسمت بقيمٍ مرتفعة لصفة كفاءة استعمال المياه، في حين أنَّ قيمة كفاءة استعمال المياه كانت أقل معنوياً في الطرز الوراثية الأكثر تحملاً للجفاف-Drought-resistant، وذلك عندما عُرضت لظروف الإجهاد المائي Water stress (Morgan et al., 1993). وتبعاً لذلك، فإنَّ صفة كفاءة استعمال المياه يمكن أنْ تكون مؤشراً مضللاً، إذا ما تمَّ الانتخاب لقيم مرتفعة من كفاءة استعمال المياه (WUE) تحت ظروف الإجهاد المائي، ولاسيما في حال وجود تباين وراثي في حجم المجموعة الجذرية، ومن ثمَّ مقدرة الطرز الوراثية على استخلاص المياه من طبقات التربة العميقة الرطبة.

تأثير العوامل البيئية في كفاءة استعمال المياه Impact of Environmental Factors on WUE

1- العجز المائي وكفاءة النتح Water Deficit and Transpiration Efficiency: تتوقف درجة انغلاق المسامات الناتجة عن ظروف الإجهاد المائي على

شدة الإجهاد المائي ومدتهِ، وعلى مقدرة نباتات المحصول على تأمين احتياجات النباتات النتحية Transpirational demands (Guy et al., 1988). وبيّنت القياسات المباشرة لكفاءة النتح (T_a) باستعمال كامل كربون النبات، والميزان المائي داخل النبات، لأنَّ الإجهاد المائي المعتدل يُمكن أنْ يُسبب ازدياداً في كفاءة النتح حتى 100%، في حين أنَّ الإجهاد المائي الشديد Extreme drought يمكن أنْ يُخفض من كفاءة النتح بشكلٍ كبير (Mc Cree and Richardson,1987). وتتمثل الاستجابة الشائعة لظروف الإجهاد المائي حدوث انخفاض في كلٍ من معدل التمثيل الضوئي (´A`)، والنتح (T) بآنٍ واحد، وازديادٍ في درجة حرارة الأوراق Leaf temperature (Farquhar and Sharkey,1982). وإذا ما تراجع معدل النتح بوتيرةٍ أسرع من معدل التمثيل الضوئي، عندئذٍ سوف ينخفض تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون الداخلي (P_i) (Cowan, 1982). ويتمخض عن هذه الاستجابة المحافظة على محتوى الخلايا النباتية المائي Water savings، ومن ثمَّ ازدياد كفاءة النتح.

ولعَّل من الفوائد العظيمة لاعتماد صفة التمييز ضد الكربون النظير Carbon isotope discrimination بوصفه معياراً فعَّالاً للتعبير عن صفة كفاءة استعمال المياه، ولاسيما عند الأخذ بعين الاعتبار نسبة ^{13}C /^{12}C للمادة الجافة الكلية، لأنَّ هذا المؤشر يُعبّر بطريقة تكاملية (عبر كامل موسم النمو في المنطقة المستهدفة) عن سلوك النباتات، وطبيعة استجابتها لظروف الإجهاد المائي، ومن الصعب جداً تحقيق مثل هذا التكامل بالاعتماد على قياسات عملية التبادل الغازي Gas-exchange measurements، التي عادةً ما تكون آنية، وتُعبّر عن استجابة النبات لحظة القياس فقط. وبيَّنت الملاحظات على المدى البعيد سواءً في غرف النمو Growth chambers، وتحت الظروف الحقلية، بأنَّ النباتات المجهدة مائياً غالباً ما تبدي قيماً متدنية لتركيز غاز الكربون الداخلي (P_i)، حسب نتائج تحليل التميز ضد ^{13}C. وسبب تعَّرض النباتات في محصول الحمص لظروف الإجهاد المائي انخفاضاً في قيمة Δ (نسبة ^{12}C /^{13}C) بنحو 2% بالمقارنة مع النباتات المروية بكمياتٍ كافية من المياه (Winter,1981). وبيّنت الدراسات انخفاض قيمة كفاءة النتح تحت ظروف الإجهاد المائي الشديد، لأنَّ الأوراق تصبح أقل فعَّالية فيما يتعلق بعملية التبادل الغازي، حيث يستمر فقد المياه عبر الأدمة الخارجية Cuticular loss، في حين قد يتوقف كلياً انتشار CO_2 عبر المسامات، الأمر الذي يؤثر سلباً في معدل التمثيل الضوئي، ومن ثمَّ كفاءة النتح (Wenkert, 1983). وفي محصول الفول السوداني (فستق العبيد) Groundnut فإنَّ العلاقة بين Δ، و (TE)WUE يمكن أنْ تنكسر تحت ظروف الإجهاد المائي الشديد، الذي يمكن أنْ تصل نسبة الفقد في الكربون نتيجة ازدياد معدل التنفس حتى 40% تحت ظروف الإجهاد المائي الشديد (Mc Cree

and Richardson,1987). وبيّنت نتائج إحدى الدراسات على محصول زهرة الشمس Sunflower، وجود تباين وراثي معنوي في قيمة (Δ‰) بين هجن زهرة الشمس المدروسة، تراوح بين 27.4977- إلى 24.5953- ‰. ولوحظ وجود علاقة ارتباط سلبية قوية بين $\Delta^{13}C$ وكفاءة استعمال المياه ($r = 0.67$). تقترح مثل هذه النتيجة إمكانية استعمال Δ مؤشراً بديلاً غير مدمر للمادة النباتية Non-destructive surrogate measure لانتخاب قيم مرتفعة لصفة كفاءة استعمال المياه في برامج التربية الموسعة (AL.Ouda,1999).

2- الضوء Light: تؤثر شدة الإشعاع الواصل إلى النباتات في كفاءة استعمال المياه. وعادةً ما تكون شدة الإشعاع الشمسي التي تكون عندها كفاءة النتح مثلى أو أعظمية أقل بكثير من تلك الواصلة إلى أوراق النبات، حيث تؤدي زيادة شدة الإشعاع الشمسي الواصلة والممتصة عن طريق الأوراق إلى زيادة درجة حرارة الأوراق، ومن ثمَّ معدل فقد الماء بالنتح، ما يؤثر سلباً في كفاءة استعمال المياه (Singh et al., 1993). حيث لوحظ على المدى اليومي أنَّ معدل التمثيل الضوئي يزداد بازدياد شدة الإشعاع الشمسي الواصل Incident irradiation منذ الصباح الباكر حتى الساعة العاشرة صباحاً، حيث تكون كفاءة استعمال المياه في حدها الأعظمي. ولكن لوحظ بالمقابل انخفاضاً في قيمة WUE خلال فترة منتصف النهار Midday، لتعود لتزداد بشكلٍ طفيف خلال ساعات ما بعد الظهيرة.

3- فرق التدرج في ضغط بخار الماء VPD: يُعَّد فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط من القوى المحركة لعملية فقد المياه بالنتح عن طريق المسامات أثناء عملية التبادل الغازي، حيث يزداد معدل فقد المياه بالنتح بازدياد فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والهواء المحيط بها، الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض قيمه كفاءة استعمال المياه. لذلك، فإنَّ كفاءة النتح ترتبط خطياً مع مقلوب VPD. ولكن يمكن أنْ يؤدي ازدياد VPD بشكلٍ كبير إلى تراجع الناقلية المسامية (g_s) إلى حد الانغلاق التام Complete stomatal closure، الأمر الذي يؤدي إلى حدوث تراجع أكبر في قيمة WUE (Schlze,1986). وعندما لا تكون العوامل الأخرى (وخاصة إتاحة المياه) غير محددة لعملية فقد المياه بالنتح، فإنَّ تكلفة إنتاج المادة الجافة (من وجهة نظر استهلاك المياه) ستكون عالية جداً، وذلك عندما يكون VPD عالياً جداً (ما يؤدي إلى انخفاض WUE)، بسبب ازدياد معدل فقد المياه بالنتح، بالمقارنة مع القيم المنخفضة لفرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق (Low VPD) والوسط المحيط. وعلى سبيل المثال، فإنَّ قيم كفاءة استعمال المياه تتباين من 8.5 غ مادة جافة لكل كغ ماء خلال فترة منتصف

الشتاء إلى فقط 2.5 غ مادة جافة لكل كغ ماء خلال فترة منتصف الصيف (Fischer and Turner,1978).

4- حجم التربة/ حجم الأصص Soil Volume/ Pot size: نفّذ الباحث Ismail وزملاؤه (1994) تجربة، عُرّضت فيها بعض مدخلات وهجن محصول اللوبياء Cowpea تحت ظروف الزراعة الحقلية إلى معاملات رطبة وجافة ضمن ثلاثة أحجام من الأصص. وقد وجدوا أنَّ معاملة حجم الأصص أثرت في كلٍ من Δ و WUE. ولوحظ تحت الظروف الجافة أنَّ قيمة Δ كانت أكبر، وقيمة WUE كانت أصغر في الأصص الكبيرة الحجم، بالمقارنة مع الأصص الصغيرة والمتوسطة الحجم، ويعزى ذلك إلى تعرّض النباتات إلى مستويات إجهاد مائي أقل في الأصص الكبيرة.

تقدير كفاءة استعمال المياه Quantification of WUE:

إنَّ كفاءة استعمال المياه على مستوى الورقة المفردة يمثل نسبة معدل التمثيل الضوئي إلى معدل فقد المياه بالنتح، ويُعَّبر عنها كنسبة M mole CO_2. $m^{-2}.s^{-1}$ إلى m mole H_2O $m^{-2}.s^{-1}$. وعلى مستوى النبات الكامل، فإنَّ كفاءة استعمال المياه تمثل كمية المادة الجافة (غ) المصَّنعة لكل كغ من المياه المفقودة بالنتح خلال فترة محددة من موسم النمو. وإنَّ المصطلح الآخر المكافئ لكفاءة استعمال المياه (WUE) هو كفاءة النتح (TE) Transpiration efficiency. وإنَّ عملية قياس كفاءة استعمال المياه تحت ظروف الزراعة الحقلية عادةً ما تكون صعبة في الكثير من الحالات، بسبب صعوبة تقدير كمية المياه المفقودة بالصرف العميق Deep drainage، وكمية المياه المفقودة بالجريان السطحي Surface run-off. ويمكن أنْ تُعطى القياسات الوزنية Gravimetric measurement تقديراً مقبولاً لكفاءة النتح، حيث تسمح بإجراء قياسات دقيقة لكلٍ من معدل فقد المياه بالنتح (T)، والمادة الجافة المصَّنعة بعملية التمثيل الضوئي (´A`)، بما في ذلك الكتلة الحية للجذور. عموماً، مثل هذا النوع من الدراسات مجهدة جداً، وتحتاج إلى عمالةٍ كبيرة Extremely laborious، ولا يمكن تطبيقها في برامج الغربلة لعدد كبير من المدخلات (المادة الوراثية)، أو ضمن برامج التحسين الوراثي. وعادةً ما يتم تقويم التباين الوراثي في كفاءة النتح اعتماداً على قياسات آنية Instantaneous لمعدل تثبيت الكربون CO_2-fixation، ومعدل فقد المياه بالنتح (T) من الأوراق المفردة (Frank et al., 1987). عموماً، فإنَّ كلتا هاتين العمليتين الفسيولوجيتين تختلفان بشكلٍ كبير خلال فترات مختلفة من اليوم، وحسب عمر الورقة Leaf age، لذلك، فإنَّ هذه القياسات الآنية لا يمكن أنْ تعطي فكرة دقيقة عن أداء الطراز الوراثي خلال كامل دورة

حياة النبات، ولا يمكنها أنْ تسمح بتقويم تأثير التكيفات الشكلية والفسيولوجية لظروف الجفاف، التي يمكن أنْ تؤثر في كفاءة النتح خلال كامل موسم النمو، وفي أداء النباتات تحت ظروف شح الموارد المائية (Thorstenson,1988). بالإضافة إلى ذلك فإنَّ لمثل هذه القياسات الآنية تبايناً كبيراً في القيم (المكررات) (معامل التباين) Large Coefficient variation، ولذلك فلن تكون مناسبة لعمليات الغربلة Screening، وعمليات الانتخاب Selection (Johes,1984).

التمييز ضد الكربون النظير (Δ) كمقياس بديل لصفة كفاءة استعمال المياه

Cordon Isotope Discrimination (Δ°/∞) as a Surrogate estimate of WUE

إنَّ النباتات تُميِّز ضد الكربون النظير الثقيل (^{13}C) خلال عملية التمثيل الضوئي عند مستويات مختلفة. وإنَّ المكونات الأساسية لعملية التمثيل الضوئي التي تُؤثر في عملية التمييز ضد الكربون النظير هي عملية انتشار غاز الفحم عبر المسامات، وعملية إضافة غاز الفحم (CO_2) إلى المستقبل الأولي المركب خماسي الكربون Ridulose-1.6-bi-p التي يتوسطها الأنزيم RuBisco (Vogel,1993). وإنَّ التمييز ضد الكربون النظير (Δ) ترتبط بتركيز غاز الفحم الداخلي (P_i)، وفق المعادلة الآتية:

$$\Delta = [\ a + (b - a)\ P_i\ /\ P_a - d\ ]$$

حيث:

b,a: هي ثوابت للتمييز ضد $^{13}CO_2$ خلال انتشار CO_2 إلى داخل الأوراق، وأثناء عملية ضم CO_2 إلى المستقبل الأولي خماسي الكربون Carboxylation على التوالي.

d: هو مصطلح يتضمن الإسهامات من عملية التنفس، وانتشار CO_2 المنحل بالماء...الخ.

Pi و Pa: تركيز غاز الفحم الداخلي وفي الوسط المحيط على التوالي.

ولوحظ من المعادلات السابقة بما لا يقبل الشك أنّ النسبة P_i/P_a تُحدد بشكلٍ رئيس التباين في كفاءة استعمال المياه والتمييز ضد الكربون النظير (Δ). وتبعاً لذلك، فيمكن توقع علاقة قوية بين كلٍ من Δ وWUE، التي يُمكن أنْ توضح بالعلاقة الآتية (Farquhar et al., 1989):

$$WUE = [(1 - \Theta)(b - d - \Delta)] / 1.6V(b - a)$$

حيث: Ө: هي نسبة غاز الفحم المثبتة والمفقودة بعملية التنفس.

V: هي فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط.

توجد علاقة ارتباط عكسية بين A/g_s و Δ (Meinzer et al., 1990)، وعلاقة ارتباط موجبة بين P_i/P_a و Δ، ما يؤكد أنَّ تركيز CO_2 الداخلي(P_i) يُحدد بشكلٍ رئيس التباين في Δ (Hubick et al., 1988). وبالرغم من ارتباط كلٍ من Δ و WUE مع نسبة P_i/P_a، وكذلك مع A/g_s (Condon et al., 1990). ولكن نتيجة التذبذبات اليومية والفصْلية في كلٍ من ´A` وg_s، فإنَّ هذه المؤشرات سوف لن تعطي تقديراً ذا طبيعة تكاملية لصفة كفاءة استعمال المياه خلال فترة محددة من الزمن (Udayakumar and Prasad,1994). وانطلاقاً من هذا الأمر، فإنَّ صفة التمييز ضد الكربون النظير (Δ) هي مؤشر غير مستقل، لأنّه يعطي فكرة تكاملية (تعبر عن أداء النبات عبر الزمان والمكان) عن مقدار الكسب الحاصل في الكربون نسبة إلى كمية المياه المفقودة بالنتح، ولاسيما في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون C_3 plants.

بيَّنت العديد من التجارب المنفذة في قسم فسيولوجيا المحاصيل والبيولوجيا الجزيئية، في جامعة العلوم الزراعية ببنغلور- الهند على محصول الفول السوداني، واللوبياء (Ashok et al., 1997؛ Udaya Kumar et al;1998)، ومحصول زهرة الشمس (AL-ouda,1999)، وتجارب في أماكن أخرى (Farquhar et al., 1982 ؛ Virgona et al., 1990)، وجود علاقة ارتباط عكسية بين Δ وكفاءة استعمال المياه. ولم تتغير علاقة الارتباط بين Δ و WUE حتى عندما تعَّرضت النباتات لظروف الإجهادات اللاأحيائية المختلفة Abiotic stresses. وإنَّ المحافظة على ترتيب الطرز حسب الاستجابة تحت ظروف الشاهد والإجهاد بالنسبة إلى كلٍ من صفتي Δ و WUE، يقترح أنَّ تفاعل العوامل البيئية مع الوراثية لهاتين الصفتين منخفض جداً، وقابلية التوريث بالمفهوم العريض عالية (Wright et al., 1993). وبسبب مثل هذه الميزات المهمة، فيمكن اعتبار Δ مؤشراً عالي المصداقية في تحديد التباين في صفة كفاءة استعمال المياه. وهذا يسمح بإمكانية النهوض بالعديد من برامج التربية لتحسين صفة WUE باستعمال مؤشر التمييز ضد الكربون النظير (Δ) (Condon and Richards, 1993).

هل يوجد تباين في صفة استعمال المياه؟ Does Variability in WUE Exist?

حتى تكون أي صفة ما مهمة في برنامج التربية والتحسين الوراثي، يجب أنْ تتسم بالتباين الوراثي Genetic variability الكافي، بحيث يتمكن مربو النبات من الانتخاب Selection. وبيَّنت الكثير من الدراسات وجود تباين وراثي في صفة كفاءة استعمال المياه بين الأنواع، وضمن النوع النباتي الواحد بين الأصناف (Briggs and shantz,1994). وقد بيّنت الكثير من الدراسات التي نُفذت على العديد من الأنواع المحصولية، مثل الفول السوداني وجود تباين وراثي في صفة كفاءة استعمال المياه (Udaya Kumar et al., 1997)، ومحصول اللوبياء (Ashok et al.,1997)، والدخن الإصبعي Finger millet (Sashidhar, 1997)، وزهرة الشمس Sunflower (Uma,1987)، وفول الصويا Soybean (Arun, 1982)، ومحصول الحمص Chickpea (Gangadhar, 1995). وشوهد مثل هذا التباين الوراثي في صفة كفاءة استعمال المياه في القمح Wheat (Condon and Richards,1993)، والفول Bean (White,1993)، واللوبياء Cowpea (Hall et al., 1992).

تفاعل العوامل البيئية والعوامل الوراثية GX Interaction:

حتى تكون صفة ما مهمة كمعيار انتخاب ضمن برامج التربية والتحسين الوراثي، يجب أنْ تكون بالإضافة إلى التباين الوراثي، أقل تأثيراً بالعوامل البيئية (أكثر ثباتاً) Low G×E interaction. وقد ذكرت العديد من التقارير أنَّ صفة كفاءة استعمال المياه (كفاءة النتح) في المحاصيل البقولية أقل تأثراً بالعوامل البيئية، كما هو الحال في الفول السوداني Peanut (Nageswara and Wright,1994)، واللوبياء Cowpea (Hall et al., 1993)، وفول الصويا Soybean (White et al., 1998). ووجد Ashok وزملاؤهُ (1999) علاقة ارتباط معنوية بين قيم كفاءة النتح في اللوبياء مأخوذة من تجربتين منفذتين خلال موسمين مختلفين تماماً، وواحدة منفذة في الأصص الزراعية Pots، والأخرى ضمن الليزوميترات Minilysimeter، ما يُشير إلى انخفاض التفاعل البيئي الوراثي لصفة كفاءة النتح المعدلة وفقاً لفرق التدرج في ضغط بخار الماء السائد خلال كل موسم، وأظهر ترتيب Ranking الطرز الوراثية المنحى نفسه في كل من التجربتين. عموماً، تتوقف أيضاً أهمية صفة كفاءة استعمال المياه بوصفه معيار انتخاب مهماً في برامج التربية والتحسين الوراثي، على قابلية توريثها، فيجب أنْ تكون ذات قابلية توريث عالية High Heritability (Hall et al., 1993). وذكر Ismail و Hall (1993) أنّه تحت ظروف النمو الطبيعية في الحقل، فإنَّ جميع هجن الجيل الأول F1 Hybrids

امتلكت قيماً لـ Δ مماثلة لقيمة Δ العالية في الآباء، مقترحاً وجود سيادة جزئية Partial dominance لصفة Δ.

لماذا لم تكن التربية لصفة كفاءة استعمال المياه ناجحة؟

تُعد صفة كفاءة استعمال المياه من الصفات الفسيولوجية المهمة المحددة للغلة الاقتصادية، حسب المعادلة المقترحة من قبل Passioura (1986):

$$Gy = T_E \times WUE \times HI$$

يُلاحظ من هذه المعادلة أنَّ الغلة الاقتصادية، ولاسيما تحت ظروف الزراعة المطرية تتناسب طرداً مع كفاءة استعمال المياه (WUE)، ودليل الحصاد (HI)، ومرتبط طرداً مع معدل فقد المياه بالنتح تحت ظروف الزراعة المروية، وهذه المكونات مستقلة عن بعضها البعض، بمعنى آخر أنَّ زيادة أي مكون يمكن أنْ يؤدي إلى زيادة الغلة، ويمكن تبعاً، لذلك تحقيق زيادة تراكمية في الغلة بتحسين كل تلك المكونات مجتمعة. وللتأكيد على أهمية كل مكون من تلك المكونات في تحسين الغلة، يمكن تجزئة تلك المكونات إلى العوامل المحددة لها:

$$Gy = TE \times \frac{`A´}{TE} \times \frac{Gy}{By}$$

وبما أن الكتلة الكلية Biological yield (By) تنتج أصلاً من عملية التمثيل الضوئي (`A´)، فيمكن كتابة المعادلة السابقة على النحو الآتي:

$$Gy = TE \times \frac{`A´}{TE} \times \frac{Gy}{A} = Gy$$

وفشلت العديد من المحاولات لتحسين صفة كفاءة استعمال المياه في تطوير الطرز الوراثية ذات الكفاءة الإنتاجية العالية المرتبطة بقيم مرتفعة لصفة كفاءة استعمال المياه، حيث ارتبط تحسين صفة كفاءة استعمال المياه مع تراجع معدل تراكم المادة الجافة، وتدني الغلة الاقتصادية (Matus et al., 1995)، لأنَّ معظم الطرز الوراثية المنتخبة لزيادة

قيمة كفاءة استعمال الماء من خلال التركيز علــى تقليل معــدل النتح Transpiration rate، التــي عــادةً مــا تكــون مرتبطــة بتقليــل الناقليــة المســامية Stomatal (g_s) conductance. ونظراً إلى وجود علاقة ارتباط عضوية وخطية بين معدل تراكم المادة الجافة ومعدل فقد المياه بالنتح، فإنَّ أي تراجع في الناقلية المسامية ومن ثمَّ في معدل فقد المياه بالنتح (T) سيترافق مع تراجع ملحوظ في معدل نمو المحصول Crop (CGR) Growth Rate، لأنَّ الناقلية المسامية تحدد كلاً من معدل النتح ومعدل انتشار غاز الفحم عبر المسامات أثناء عملية التبادل الغازي إلى داخل الأوراق(P_i)، وتبعاً لذلك يصبح كلّ من T و WUE مرتبطين مع بعضهما البعض بشكلٍ قوي، وبالتالي فإنَّ أي تراجع في T سيؤثر سلباً في تركيز CO_2 الداخلي، ومن ثمَّ معدل التمثيل الضوئي وتصنيع المادة الجافة وتراكمها. عموماً، إذا كان التباين في P_i، ومن ثمَّ WUE ناجماً عن كفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية (g_m)، فإنَّ ارتباط كل من T و WUE سيكون أقل، والانتخاب في مثل هذه الحالة لزيادة صفة كفاءة استعمال المياه في مثل هذه الطرز الوراثية سيترافق مع زيادة معدلات المحصول (Udaya Kumar et al., 1998).

العوامل المؤثرة في تباين الطرز الوراثية في T و WUE: إنَّ صفة كفاءة استعمال المياه تُنظم بشكلٍ رئيس بالعوامل المسامية Stomatal factors(g_s)،أو بالعوامل المرتبطة بكفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية Mesophyll efficiency (g_m)، التي تنظم تمثيل الكربون. وتبعاً لذلك، فإنَّ التباين في صفة كفاءة استعمال المياه الناتج عن التباين في كفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية (g_m) يكون مرغوباً، حيث تكون في مثل هذه الحالة العلاقة بين معدل النتح (T) وWUE ضعيفة. وتكون تبعاً لذلك الطرز الوراثية التي تتحدد فيها قيمة WUE بقيمة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية ذات كفاءة إنتاجية عالية، وتُسمى اصطلاحاً بالطرز الوراثية الكفوءة Capacity types.

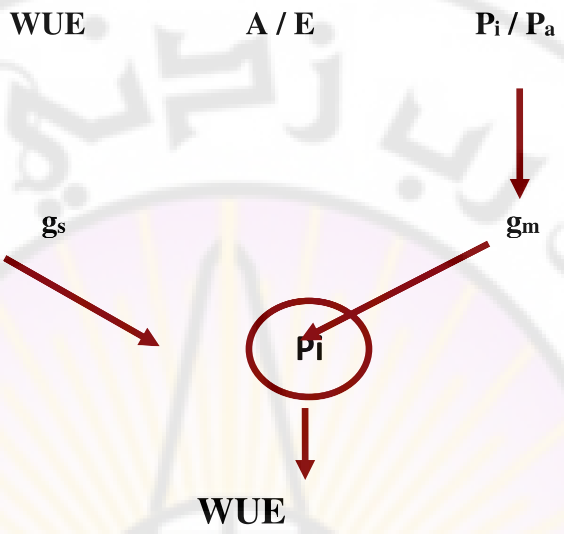
من المعروف أنَّ الصفتين الفسيولوجتين اللتين تحددان التباين في قيمة كفاءة استعمال المياه (WUE) هما معدل التمثيل الضوئي Photo synthetic (`Á)، المسؤول عن إنتاج المادة الجافة، ومعدل فقد المياه بالنتح Transpiration rate (T). ومن المعروف أنَّ معدل التمثيل الضوئي يتحدد بكمية غاز الكربون (CO_2) المتاحة في مراكز التثبيت ضمن الصّانعات الخضراء (P_i)، ويتحدد هذا بدورهِ بالناقلية المسامية (g_s). ويتحدد معدل فقد المياه بالنتح بدورهِ بالناقلية المسامية (g_s). التي تتحدد بفرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط (VPC). عموماً، اعتماداً على درجة إسهام كل من g_s أو g_m في تحديد قيمة P_i وWUE، فيمكن أن تقسم الأنواع النباتية / لأصناف ضمن النوع نفسه إلى:

1. الطرز التي تتحدد فيها قيمة WUE بالناقلية المسامية وتّسمى اصطلاحاً Conductance types، وهي أنواع/ طرز غير مرغوبة أبداً، حيث تترافق فيها زيادة قيمة WUE مع تراجع الغلة.
2. الطرز المرغوبة، التي تتحدد فيها قيمة WUE بكفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية (gm)، وتُسمى اصطلاحاً Capacity types، وهي من الطرز المرغوبة، حيث ترتبط فيها زيادة قيمة WUE بتحسين الغلة الاقتصادية Economic yield.

وقد أشارت معظم التقارير أنَّ التباين الوراثي في صفة كفاءة استعمال المياه تتحدد بالعوامل المسامية في العديد من الأنواع المحصولية، مثل القمح (Farquhar et al., 1988)، والبندورة Tomato (Marlein and Tharstenson, 1988)، والقطن Cotton (Lu et al., 1996).

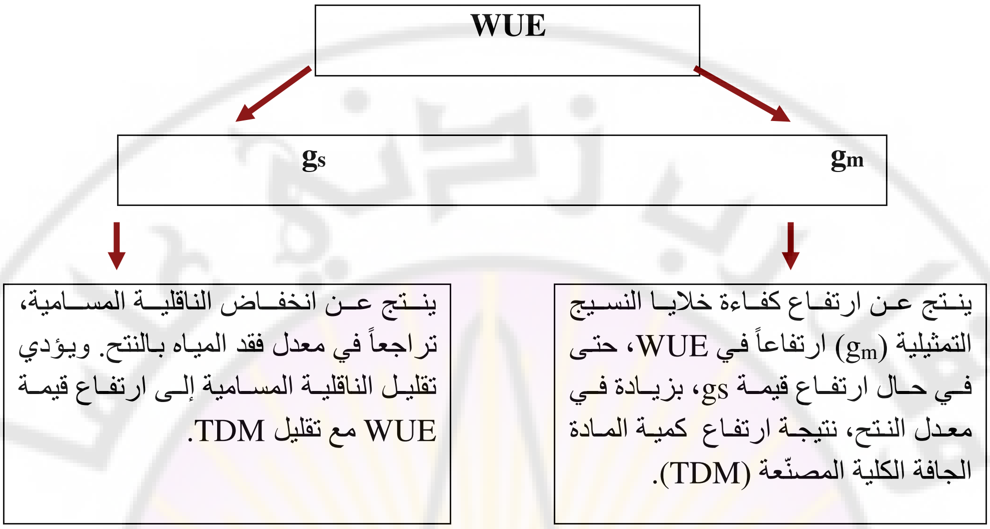
والأبعد من ذلك، فإنَّ الزيادة في قيمة كفاءة استعمال المياه تحت ظروف الجفاف عادةً ما تكون مرتبطة بانخفاض أكبر في قيمة الناقلية المسامية Stomatal conductance (g_s) بالمقارنة مع معدل التمثيل الضوئي (Á`) (Uma, 1987).

في الأنواع التي تحدد فيها قيمة كفاءة استعمال المياه بالناقلية المسامية g_s- Dependent، تكون الناقلية المسامية بشكلٍ دائم منخفضة، الأمر الذي يُقلل من معدل فقد المياه بالنتح. وتعَّد مثل هذه الصفة (تقليل الناقلية المسامية) من الصفات المهمة المرتبطة بتحسين تحمل الجفاف تحت ظروف الإجهاد المائي، نتيجة تقليل كمية المياه الكلية المفقودة بالنتح، ما يُسهم في المحافظة على ميزان العلاقات المائية داخل الخلايا النباتية، ويُحافظ على محتوى التربة المائي لفترةٍ زمنيةٍ أطول، ولكن يُقلل بالمقابل تقليل الناقلية المسامية من معدل انتشار الفحم عبر المسامات الذي يؤثر سلباً في معدل التمثيل الضوئي، وتصنيع المادة الجافة (Johnson and Tieszen, 1993). وتبعاً لذلك، ففي الأنواع التي تتحدد فيها قيمة WUE بالناقلية المسامية، فعادةً ما يكون معدل فقد الماء بالنتح في وحدة المساحة الورقية منخفضاً، وكذلك فإنَّ معدل صافي التمثيل الضوئي Net Assimilation (NAR) rate يكون منخفضاً، بسبب وجود علاقة ارتباط موجبة بين معدل النتح الكلي وكمية المادة الجافة الكلية Total Dry Matter. ويمكن أنْ نتوقع وجود علاقة ارتباط ضعيفة بين WUE وكمية المادة الجافة الكلية المصنّعة في الأنواع النباتية التي تتحدد فيها قيمة WUE بالناقلية المسامية، (المخطط، 1).



المخطط رقم (1): العوامل المحددة لتركيز CO_2 الداخلي (P_i)، ومن ثمَّ كفاءة استعمال المياه (WUE).

وفي هذا الصدد، فإنَّ الانتخاب لقيم مرتفعة لصفة كفاءة استعمال المياه في الطرز الوراثية التي تتحدد فيها قيمة WUE بالناقلية المسامية، سيتمخض عنها إنتاجية متدنية في الغلتين الحبية والحيوية. واعتبر ذلك المعضلة الرئيسة Bottleneck التي حالت دون إمكانية تحقيق نجاح أثناء عملية تحسين صفة WUE في برامج التربية والتحسين الوراثي. وفي الطرز الكفوءة Capacity types (الطرز التي تتحدد فيها قيمة WUE بكفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية g_s)، فإنَّ g_m تكون مرتبطة بمعدل التمثيل الضوئي (`Á)، الذي يحدد بدورهِ التباين WUE. وتبعاً لذلك، ففي مثل هذه الطرز فإنَّ كفاءة استعمال المياه تكون غير معتمدة على الناقلية المسامية (g_S)، وبذلك فلن يكون معدل النتح (T). مرتبطاً بكفاءة استعمال المياه. وإنَّ الانتخاب لقيم مرتفعة لصفة الكفاءة استعمال المياه في مثل هذه الطرز، سيؤدي إلى إنتاج طرز ذات معدلات نمو عالية (high CGR)، ومستوياتٍ مرتفعة من الغلتين الحبية والحيوية. وحديثاً، لوحظ وجود علاقة ارتباط عكسية Inverse relationship بين محتوى طرز الفول السوداني من الأنزيم روبيسكو RuBisco، والتمييز ضد الكربون النظير (Δ). ويقترح ذلك أنَّ التباين في Δ، ومن ثمَّ في WUE يمكن أن يكون ناجماً عن كفاءة خلايا النسيج المتوسط، (المخطط، 2).



المخطط رقم (2): التباين في قيمة كفاءة استعمال المياه تبعاً للعوامل المسامية والعوامل التمثيلية.

ولوحظ في الطرز الوراثية الكفوءة وجود علاقة ارتباط موجبة ومعنوية بين كفاءة استعمال المياه وكمية المادة الجافة الكلية (Hubick and Gibson, 1993)، في حين لوحظت علاقة ارتباط عكسية بين Δ و WUE، ما يؤكد أنَّ كفاءة خلايا النسيج المتوسط تحدد قيمة كفاءة استعمال المياه (WUE). وفي مثل هذه الطرز فإنَّ الانتخاب لقيم مرتفعة لصفة كفاءة استعمال المياه سيترافق مع معدلات نمو عالية، وغلة اقتصادية مرتفعة. وبشكلٍ مغاير للناقلية المسامية، فإنَّ تحديد كفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية (g_m) عادةً ما يكون صعباً، بسبب تعقيد عملية تنظيمها. وإنَّ g_m غالباً ما تقدَّر بشكلٍ غير مباشر من خلال تحديد الانحدار الأولي لمنحنى استجابة غاز الفحم (dA/dP_i) (التغير الحاصل في معدل التمثيل الضوئي نسبةً إلى التغير في تركيز CO_2 الداخلي) (Caemmer and Farquhar, 1981)، أو بواسطة تحديد مكونات معينة في خلايا النسيج المتوسط، مثل محتوى الأنزيم RuBisco، ونشاطه (Mate et al., 1998). وهناك طريقة أخرى للوصول إلى كفاءة عملية إضافة CO_2 إلى المستقبل الأولي Carboxylation efficiency، من خلال تقييم التغير في تركيز CO_2 الداخلي (P_i) عند ناقلية مسامية معينة. وبما أنَّ تركيز CO_2 الداخلي يتحدد بكلٍ من الناقلية المسامية أو كفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية، فإنَّ التباين في قيمة P_i عند ناقلية مسامية محددة سوف يعكس التباين في g_m. هذا يعني أنّه عند ناقلية مسامية محددة، فإنَّ انخفاض قيمة P_i، تكون نتيجة ازدياد كفاءة خلايا النسيج المتوسط (g_m) (زيادة معدل التمثيل الضوئي/ تثبيت الكربون). ووجد

حديثاً أنَّ نسبة P_i/P_s ترتبط بشكلٍ معنوي مع كفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية، لذلك يمكن اعتمادها كمؤشر جيد وموثوق لكفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية (Krishna Prasad et al., 1996).

كفاءة استعمال المياه في الأنواع النباتية رباعية الكربون WUE in C_4 Plants:

في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون C_3 Plants، فإنَّ التباين الوراثي في صفة التمييز ضد الكربون النظير (Δ) في المادة الجافة للأوراق عادةً ما تكون مرتبطة بكفاءة النتح (TE) (Farquhar et al., 1989). تُقسم عملية تثبيت الكربون في الأنواع النباتية رباعية الكربون بوجود آلية تركيز CO_2 في خلايا الحزم الوعائية Bundle sheath، حيث يتم تمثيل CO_2 أولاً على شكل أحماض عضوية رباعية الكربون (حمض الماليك أو حمض الأسبارتيك)، بوساطة الأنزيم Phosphoenol pyruvate carboxylase (PEP) في خلايا النسيج المتوسط. ومن ثمَّ تُنقل هذه الأحماض العضوية، ويُنزع منها غاز الكربون Decarboxylation (CO_2) في خلايا الحزم الوعائية، حيث يتم تثبيت CO_2 من جديد في حلقة كالفن بوساطة الأنزيم RuBisco. وإنَّ عملية التمييز ضد الكربون النظير في الأنواع النباتية رباعية الكربون يعكس عمليتي تثبيت الكربون المختلفتين، وهي معتمدة ليس فقط على نسبة تركيز غاز الفحم الداخلي إلى تركيزهِ في الوسط المحيط (P_i/P_a)، ولكن أيضاً على تسرب Leakiness (Θ) نسبة من غاز الفحم المتحرر في خلايا الحزم الوعائية بواسطة حلقة الأحماض العضوية الرباعية C_4-acid cycle، الذي لا يُثبت بوساطة الأنزيم RuBisco. وإنَّ قيمة Θ تُحدِّد قيمة الانحدار للعلاقة بين Δ وP_i/P_a (Farquhar et al., 1983).

وبيّنت إحدى الدراسات على التمييز ضد الكربون النظير بأنَّ قيمة كمية الكربون المتسرب (Θ) كانت ثابتة، وتقدر بنحو 0.2 تحت مدى واسع من الظروف البيئية، ومستوياتٍ مختلفة من الشدة الضوئية، والحرارة، وتركيز CO_2 في الوسط المحيط، بالنسبة إلى محصول الذرة البيضاء *Sorghum bicolor* (L.) Moanch، والنوع *Amaranthus edulis*. ووجدوا أيضاً أنها تساوي 0.2 في العديد من الأنواع النباتية رباعية الكربون. وبما أنّه كان هناك اختلاف طفيف جداً في Θ، فإنَّ التمييز ضد الكربون النظير (Δ) كان - كما هو الحال في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون- مرتبطاً خطياً مع P_i/P_a (Handerson et al., 1992). وذكرت العديد من الدراسات وجود تباين وراثي في نسبة P_i/P_a، ومعدل تمثيل الكربون CO_2 assimilation rate، والناقلية المسامية، التي تؤدي بدورها إلى حدوث تباين وراثي في كفاءة النتح (TE).

كفاءة استخدام الماء في بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط

يجب أن يستعمل المياه من قبل النباتات بأقصى كفاءة ممكنة في بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط. وتعرف كفاءة استعمال المياه (WUE) في المحصول الحقلي بأنّها نسبة غلة الحبوب إلى كمية المياه المستعملة.

$$WUE = \frac{\text{غلة الحبوب (كغ . هكتار}^{-1}\text{)}}{\text{الماء المستعمل (مم)}} \quad .... 1$$

ويُعبّر عن الماء المستعمل بشكلٍ عام بمفهوم كمية الماء الكلية المضافة (أمطار+ مياه ري أو كمية الماء المنتوحة + كمية الماء المفقودة بالتبخر Evaporation)، ويسمح ذلك بتقويم الممارسات الزراعية المعتمدة، التي يُمكن أن تزيد من كمية المياه المتاحة (Botton, 1991; Cooper et al., 1987). وإذا ما قيست كفاءة استعمال المياه ليس فقط استناداً إلى قيمة T، وإنّما اعتماداً على كمية الماء الكلية المستعملة، فلا بدّ من أن تؤخذ معادلة ميزان الماء بعين الاعتبار:

$$\mathbf{E + T + R + D + I - P = 0} \quad .... 3$$

حيث:

E: معدل فقد الماء من التربة بالتبخر Evaporation.

T: فقد الماء بالتبخر النتح Transpiration.

R: الجريان السطحي للماء Run off.

D: ماء الصرف Drainage water.

I: الماء الممتص من قبل الأجزاء الهوائية للنبات Water intercepted by the canopy

P: الهطول المطري Rainfall.

وبالرجوع إلى المعادلة رقم (1):

$$WUE = \frac{T \times TE \times HI}{E + T + R + D + HI} \quad .....\ 4$$

$$WUE = \frac{TE \times HI}{1 + \frac{(E + R + D + HI)}{T}} \quad ......\ 5$$

تظهر المعادلة رقم 5 طرق تحسين كفاءة استعمال المياه: وذلك إما عن طريق:

1- زيادة كفاءة النتح في الطرز الوراثي.
2- زيادة نسبة الماء المفقود بالتبخر النتح (Evapo-transpiration (ET.
3- عن طريق تخفيض قيمة الفرق في ضغط بخار الماء (Vpd) بين الأجزاء الهوائية للنبات والوسط المحيط، حيث يؤدي ذلك إلى زيادة كفاءة استعمال المياه، بسبب وجود علاقة ارتباط عكسية بين WUE و Vpd.
4- باعتماد الممارسات الزراعية التي تقلل فقد الماء من التربة بالتبخر Evaporation.

يمكن أيضاً تحسين كفاءة استعمال المياه باستخدام بعض المفاهيم المقترحة من قبل الباحث Loomis(1983) وأهمها:

أولاً: لا بد من وجود توازن بين معدل فقد الماء بالتبخر- نتح من قبل نباتات المحصول (ET) مع كمية الماء المقدمة للمحصول. وإنّ نمو نباتات المحصول مرتبط بشكلٍ كبير بالتبخر Pan evaporation(EP)، كما أنّ كفاءة استعمال المياه تتناسب عكساً مع فرق ضغط بخار الماء بين النبات والوسط المحيط (Vpd) (e* - e)، وبذلك فإنّ:

$$WUE = \frac{B}{EP} = \frac{K}{(e^* - e)}$$

حيث تمثل:

B: الكتلة الحية Biomass، *e: ضغط بخار الماء المشبع، e: ضغط بخار الماء الفعلي.

K: عامل محدد بالمحصول Crop-specific factor(Tanner and Sinclair, 1983).

وبالنسبة إلى محصولٍ معين، فإنّ الماء المتاح يمكن أن يستعمل بكفاءةٍ أكبر عندما يكون معدل فقد الماء بالتبخر بشكلٍ مباشر من التربة في حده الأدنى، وينمو المحصول بشكلٍ جيد عندما تكون قيمة (e - *e) صغيرة جداً، في حين تكون درجة الحرارة والشدة الضوئية كافية ومناسبة لنمو نباتات المحصول وتطورها. عموماً، تحت ظروف حوض البحر الأبيض المتوسط المناخية فإنّ قيمة (Vpd) تتبدل بشكلٍ ملحوظ خلال موسم النمو، وعادةً ما تكون منخفضة خلال فصل الشتاء وأوائل فصل الربيع، وتزداد بشكلٍ سريع ابتداءً من نهاية الربيع وخلال فصل الصيف. وتتغير من 0.3 كيلو باسكال Kpa في فصل الشتاء إلى 1.2 Kpa كلما اقتربنا من نهاية فصل الربيع وخلال فصل الصيف. وتتزامن هذه الفترة مع مرحلة امتلاء الحبوب في الحبوب الشتوية (Gregory, 1991; Loomis and Conner, 1992). ويمكن الحصول على أعلى غلة حبية من خلال دفع عملية النمو وزيادة معدل النمو خلال أشهر الشتاء الباردة. واستطاع الباحث Fischer(1981) أن يُقدّر قيمة كفاءة استعمال المياه لمحصول القمح المزروع في جنوب استراليا باستخدام المعادلة الآتية:

$$\mathbf{WUE(Kg\ .\ ha^{-1}.\ mm^{-1}) = 10.2 - 1.3Ep + 0.053Ep^{2}} \quad \cdots\cdots \quad \mathbf{7}$$

حيث: Ep التبخر (مم . يوم$^{-1}$).

فعندما كان معدل فقد الماء بالتبخر يساوي 1 مم . يوم$^{-1}$ خلال الشتاء ستكون قيمة WUE 9.0 كغ . هكتار$^{-1}$. مم$^{-1}$. ولكن خلال فصل الربيع سوف ترتفع goes up قيمة Ep وتصل إلى 5.0 مم . يوم$^{-1}$، وبالتالي سوف تتراجع قيمة WUE إلى 5.0 كغ . هكتار$^{-1}$. مم$^{-1}$. وخلال فترة الهطول المطري في الشتاء، فعادةً ما تكون درجات الحرارة والشدة الضوئية منخفضتين، في حين تكون الرطوبة الجوية عالية. وفي مثل هذه الظروف تكون كمية مياه الأمطار المتاحة أكبر من كمية المياه المفقودة بعملية التبخر النتح، فيخزن تبعاً

لذلك الزائد من مياه الأمطار في قطاع التربة. ويستعمل هذا الماء من قبل المحصول خلال دورة النمو (Duratan etal., 1991). وإنّ إدارة كل من المحصول والتربة يمكن أن تغير من قيمة WUE من خلال تأثيرها في نفاذية التربة للماء، وتغير نسبة الماء المفقود بالتبخر- نتح إلى الماء المفقود بالتبخر المباشر من التربة. حيث يُمثل فقد الماء بالتبخر أهم جزء في المكونات المحددة للماء الكلي المفقود (المعادلة رقم 3).

قام الباحث Cooper وزملاؤه (1987) بقياس كمية الماء المفقودة بالتبخر بشكل مباشر من التربة، وكانت بحدود 35 إلى55% بالنسبة إلى القمح والشعير، في حين قدّر Gregory(1991) كمية الماء المفقودة بالتبخر بحدود 34 إلى 61% بالنسبة لمحصول القمح المزروع في غرب استراليا. وقدر كل من French وSchultz(1984) كمية الماء المتبخرة بنحو 33% في جنوب استراليا. يُشير كل ذلك إلى إمكانية زيادة وتحسين WUE بشكلٍ كبير من خلال تقليل قيمة EP . وترتبط كمية الماء المفقودة بشكلٍ مباشر من سطح التربة بكمية الطاقة الشمسية الواصلة إلى سطح التربة، وتبعاً لذلك فإنّها مرتبطة بشكلٍ عكسي مع كمية الإشعاع الممتصة من قبل نباتات المحصول Crop canopy. ويمكن أنْ تقدر كمية الكتلة الحية(B) أو المادة الجافة المصنّعة من خلال المعادلة الآتية (Monteith, 1973):

$$B = e \times f\ \ s$$

حيث: e: الإشعاع الشمسي الممتص من قبل النباتات.

s: كمية الإشعاع الشمسي الساقط على وحدة المساحة الورقية.

f: الجزء من الضوء الممتص.

وتعد قيمة f (الإشعاع الفعّال في عملية التمثيل الضوئي)، العامل المحدد الرئيس لمعدل نمو المحصول، وترتبط بدورها بالمساحة الورقية لنباتات المحصول وطريقة توضع الأوراق على الساق، وترتبط بشكلٍ مباشر بالكثافة النباتية، وكمية المياه المتاحة، ومدى توافر التغذية المعدنية. ويمكن أنْ تقدر كمية الإشعاع الضوئي الممتصة(f) باستعمال المعادلة الآتية (Cooper, 1983):

$$f = 1 - e \times p^{-k \times LAI}$$

حيث: k: Extinction coefficient للمحصول.

LAI: معامل المساحة الورقية.

ولوحظ أنّ كفاءة استعمال الإشعاع الشمسي(e) لمحصول الشعير المزروع في الجزء الشمالي من سوريا كانت تتأرجح بين 1.3 إلى 1.6 غرام / MJ (غرام / ميغاجول). باعتبار أنّ e تعادل بالمتوسط 1.4 غ / ميغا جول وf يساوي 1، فإنّ كمية المادة الجافة Dry matter التي يمكن إنتاجها ستكون نحو37.8 طن . هكتار$^{-1}$. عموماً، تحت ظروف بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط يمكن تحسين كفاءة استعمال المياه WUE من خلال اعتماد أهم الممارسات الزراعية التي تحقق ازدياداً في كمية المادة الجافة المصنّعة خلال الفترة من موسم النمو التي يكون فيها Vpd منخفضاً، بمعنى آخر يجب أنْ يكون معظم النمو خلال أشهر الشتاء الباردة والرطبة. وبشكلٍ جلي، ولتحقيق ذلك فلابدّ من زيادة كمية المياه المتاحة للنباتات إلى حدها الأعظمي. وإنّ تقليل كمية المياه المتبخرة بشكلٍ مباشر من قطاع التربة يمكن أنْ يتم من خلال الممارسات الزراعة الآتية:

1- الزراعة المبكرة.

2- تغير الكثافة النباتية.

3- انتخاب الأصناف ذات النمو المبكر الأولي السريع Fast early growth.

4- استعمال المعدلات المثلى من الأسمدة.

5- تغطية سطح التربة بالقش Straw mulch.

ومن أجل زيادة كمية الماء المتاحة لنباتات المحصول المزروع لابدّ من اعتماد ممارسات أخرى مثل:

1- انتخاب الطرز الوراثية التي تمتلك مجموع جذري متعمق .

2- الاستعمال الصحيح والمتوازن للأسمدة المعدنية.

3- تحسين نفاذية التربة للماء من خلال ترك بقايا المحصول السابق فوق سطح التربة.

4- تبوير الأرض.

5- تقليل فقد الماء بالجريان السطحي، والصرف العميق.

موعد الزراعة Sowing Date: في بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط، حيث تحدث الأمطار بشكلٍ أساسي خلال فصل الشتاء، فإنّ للزراعة المبكرة تأثير ملموس في كفاءة استعمال المياه (WUE)، حيث تضمن الزراعة المبكرة نمو نباتات محصول القمح وتطورها خلال الفترة التي يكون فيها فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين النباتات والوسط المحيط (Vpd) منخفضاً، وتكون التربة ذات محتوى عالٍ من الماء. ويضمن

ارتفاع درجات الحرارة بشكلٍ مبكر خلال فصل الخريف إنبات البذور وظهور البادرات بشكلٍ جيد ومتجانس، وإنّ النمو الأولي المبكر والسريع للبادرات يسمح بتغطية سطح التربة بشكلٍ كامل ومبكر، ما يُقلل من تعرض سطح التربة بشكلٍ مباشر لأشعة الشمس فتحد من فقد الماء بالتبخر المباشر Evaporation، ويزيد من كمية المياه المتاحة لنباتات المحصول، ويفقد الماء بشكلٍ رئيس عن طريق النباتات بالتبخر- نتح Evapo-transpiration ما يؤدي إلى زيادة كفاءة استعمال المياه، ومن ثمّ غلة الحبوب (Pala, 1991). ويجب أن يتم اختيار موعد الزراعة والطراز الوراثي المزروع بحيث يحدث الإزهار بعد انقضاء خطر الصقيع الربيعي، وعندما يكون معامل الحرارة والضوء Photo-thermal quotient بحده الأعظمي. ويسمح التبكير ما أمكن بموعد الزراعة في تقليل خطر التعرض للإجهاد المائي الذي غالباً ما يحدث في المراحل الأخيرة من حياة النبات Terminal drought في بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط، وأيضاً يمنع تعرض نباتات محصول القمح لإجهاد الحرارة العالية خلال فترة امتلاء الحبوب Grain filling stage. وقد قدر الباحث Acevedo أنّ مقدار الفقد الحاصل في غلة حبوب محصول القمح المزروع بعلاً قد يصل إلى 1% لكل يوم تأخير في موعد الزراعة بعد اليوم الأول ن شهر تشرين الثاني November في حلب (شمال سورية). وذكر البحاثة Aceveda وHarris وCooper (1991) أنّ الفقد في غلة حبوب محصول الشعير المزروع بعلاً في شمال سورية (حلب) يمكن ن يصل إلى 22 كغ . هكتار$^{-1}$ لكل يوم تأخير في موعد الزراعة بعد نهاية شهر تشرين الأول October. وعادةً ما تتم الزراعة المبكرة قبل المطرة الأولى. وفي هذه الحالة لابدّ من زيادة عمق الزراعة Sowing depth لتجنب ما يُسمى البداية الزائفة False start للمحصول، أي عندما تكون كمية الأمطار الهاطلة كافية ليس فقط لإنبات البذور ولكنها كافية لمدّ البذور النابتة باحتياجاتها المائية إلى أن يحين موعد الهطول المطري التالي. ولكن المشكلة الرئيسة لزراعة بذور القمح على أعماق كبيرة هو تراجع فرص ظهور البادرات وقوة النبات vigor Plant (Valverde, 1982). ويجب لحل مثل هذه المعضلة اختيار الطرز الوراثية ذات السويقة الجنينية الطويلة. وفي تجربة استعمل فيها Acevedoوزملاؤه (1991) عدة طرز وراثية من الشعير تختلف في طول السويقة الجنينية في تجربة لدراسة تأثير عمق الزراعة في شمال سورية، وقد لاحظوا في الموقع الأكثر جفافاً (محطة بريده) أنّ الزراعة العميقة (7-10سم) تميزت باسترساء بادرات establishment Seedling أفضل في حال الطرز التي تتميز بامتلاكها سويقات جنينية طويلة.

الكثافة النباتية وتوزيع النباتات Population Density and Plant Distribution: يجب أن تتم زراعة محاصيل الحبوب الشتوية في الأراضي الجافة

بشكلٍ متجانس. وأفضل طريقة لتحقيق ذلك عن طريق استخدام البذارات Seeders. وإن كلاً من غلة الحبوب Grain yield وكفاءة استعمال المياه يمكن أن تتراجع إما نتيجة زيادة فقد الماء بالتبخر المباشر من التربة عند وجود كثافة نباتية منخفضة، ومن ثمّ تزداد المساحات المكشوفة والمعرّضة بشكلٍ مباشر لأشعة الشمس، أو نتيجة زيادة شدة الإجهاد المائي Water stress في حال وجود كثافة نباتية عالية، حيث يعمل وجود عدد زائد من النباتات في وحدة المساحة على استنزاف الماء المتاح بشكلٍ محدود في التربة بشكلٍ سريع، ما يُعرض المحصول إلى الإجهاد المائي الشديدة في المراحل اللاحقة من حياته ولاسيما في مرحلتي الإزهار وامتلاء الحبوب. وإنّ الزراعة اليدوية بالنثر ترتبط مع مشكلة سوء توزيع البذور في وحدة المساحة من الأرض، وتتعرض بعض البذور للتجفاف desiccation، والآفات، والمسببات المرضية، وذلك عندما تكون مكشوفة فوق سطح التربة، في حين يمكن أنْ يقع البعض الآخر من البذور على أعماق كبيرة تعجز معها البادرات من الظهورEmergence فوق سطح الأرض فتتعفن البادرات وتموت تحت سطح التربة. وكما ذكر سابقاً، فإنّ تغطية سطح التربة نتيجة النمو الأولي المبكر له تأثير قوي في كفاءة استعمال المياه وغلة الحبوب في بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط قليلة الأمطار. وقد قام Acevedo وزملاؤه (1991) بتغيير المسافة بين السطور لمحصول الشعير من 10 إلى 40 سم مع المحافظة على معدل الزراعة Sowing rate(100 كغ . هكتار$^{-1}$) أدى إلى تقليل المسافة بين السطور إلى زيادة تغطية الأرض، وقد حسّن بشكلٍ ملحوظ كفاءة استعمال المياه وغلة الحبوب. وإنّ المسافة الأقصر بين السطور مفيدة للمحصول جداً، حيث تعمل على زيادة النمو الأولي ومعامل المساحة الورقية(LAI). وإنّ زيادة التغطية المبكرة لسطح الأرض تزيد من كمية الطاقة الضوئية الممتصة من قبل المسطح الورقي الأخضر، مقللةً بذلك من سطح التربة المكشوف والمعرّض بشكلٍ مباشر لأشعة الشمس، ما يُقلل من معدل فقد الماء بالتبخر، وتحسّن كفاءة استعمال المياه(WUE). ويتوقف استعمال المياه المتاح في التربة من محاصيل الحبوب الشتوية جزئياً على كفاءة الجذور في الوصول إلى الماء الموجود في قطاع التربة والاستفادة من كامل هذا الماء. ويسمح بشكلٍ عام توزيع النباتات بشكلٍ متجانس في وحدة المساحة نتيجة وجود مسافات متساوية بين النباتات بالاستفادة بشكلٍ أكبر من ماء التربة. وبشكلٍ معاكس، فإنّ زراعة كثافة نباتية عالية في السطر(توزيع غير متجانس) يؤدي إلى إحداث منافسة مبكرة شديدة على ماء التربة، ما يؤدي إلى الحد من النمو الأولي للبادرات(Silim and Saxena, 1991). بالإضافة إلى إضعاف النباتات في منافسة الأعشاب الضارة نتيجة تراجع معدل النمو الأولي المبكر لنباتات المحصول الاقتصادي المزروعة بشكلٍ غير متجانس. وبشكلٍ عام، فقد لوحظ أنّ الكثافة النباتية 300

نبات/م^2 بالنسبة إلى زراعة القمح في الخريف كافية في الجزء الشمالي من سورية، وتكون غلة الحبوب أعلى بمقدار 23% بالمقارنة مع الكثافة النباتية الأقل(100 نبات/ م^2) (Pala, 1991).

تتعرض الزراعة الربيعية للقمح لانحباس الأمطار، وارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط، وازدياد قيمة vpd. وتنمو نباتات المحصول مستفيدةً بشكلٍ أساسي من الماء المخزون في التربة. وتحت مثل هذه الظروف فإنّ زراعة كثافة نباتية منخفضة سوف يقلل نسبة فقد الماء بالنتح إلى التبخر- نتح Transpiration/evapo-transpiration، ما يزيد من كمية الماء المتاح لكل نبات، وهذا يؤدي إلى زيادة غلة المحصول الحبية بسبب ضمان وجود كمية كافية من الماء في التربة خلال مرحلتي الإزهار وامتلاء الحبوب، ما يؤدي إلى زيادة عدد الحبوب في الـ م^2 وأيضاً زيادة درجة امتلاء الحبوب، ووزن الألف حبة 1000-grain weight.

التسميد Fertilization: يُساعد استعمال الأسمدة في زيادة معدل نمو نباتات القمح، ويزيد كمية المادة الجافة المصنّعة من خلال تشكيل مسطح ورقي أكبر وعدد أكبر من الإشطاءات، واستطالة الأجزاء الهوائية يكون أسرع، ما يزيد من كمية الطاقة الضوئية الممتصة من قبل نباتات محصول القمح في بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط. ويسمح زيادة النمو الخضري في تغطية سطح الأرض بشكلٍ مبكر ما يقلل من فقد الماء بالتبخر ويزيد من كفاءة استعمال المياه وغلة محصول القمح الحبية (Gregory, 1991). وإنّ استخدام الأسمدة، وخاصةً الأسمدة الفوسفاتية يُحسّن من نمو الجذور ويزيد من إمكانية جذور نباتات القمح في استخلاص كمية أكبر من الماء من طبقات التربة العميقة الرطبة خلال فصلي الربيع والصيف (Karlsen et al., 1984). يُسرّع الفوسفور من تطور نباتات القمح، مقصراً بذلك دورة حياة المحصول، ما يزيد من كفاءة استعمال المياه، بسبب انخفاض قيمة VPD (Loomis and Connor, 1992). ولوحظ أنّ إضافة السماد الفوسفاتي إلى نباتات محصول الشعير المزروعة في مناطق ذات أمطار قليلة جداً وفي أتربة فقيرة بالفوسفور, قد أدى إلى زيادة كفاءة استعمال المياه بشكلٍ ملحوظ (من4.7 إلى 5.4 كغ/ هـ / مم). ولو لم يستخدم الفوسفور لتراجع معدل نمو نباتات المحصول، وازداد معدل فقد الماء بالتبخر المباشر حتى 75% من كامل معدل فقد الماء بالتبخر- نتح (Cooper et al., 1987). وبيّن Power (1985) أنّ إضافة الأسمدة الآزوتية قد زاد كفاءة استعمال المياه في الحبوب الشتوية من 6 إلى25 كغ من الحبوب في الهكتار الواحد/مم، ولكن أيضاً زاد كمية الماء المستهلكة بمقدار 20 مم بسبب زيادة حجم المسطح الورقي الأخضر القابل للنتح. ولكن حذر الباحثان Loomis and Connor (1992) من ضرورة تقليل كمية الأسمدة الآزوتية المضافة في المناطق التي تكون فيها كمية المياه

المتاحة قليلة جداً لتحقيق التوازن بين النمو الخضري واستهلاك المياه، وضمان توافر المياه خلال مرحلة النمو الثمري، لأنّ وجود كمية زائدة من الآزوت في التربة سوف تزيد من معدل النمو الخضري الأولي، ما يؤدي إلى زيادة معدل فقد الماء بالتبخر- نتح ويؤدي إلى استنزاف الماء المتاح بكمياتٍ محدودة جداً خلال المراحل الأولى من حياة النبات، ويُعرض النبات في المراحل اللاحقة إلى إجهاد مائي شديد، قد يفشل معه المحصول في إعطاء أي غلة حبية Hay-off. وطبعاً زراعة البقوليات أو ترك الأرض بور Fallow يمكن أنْ يزيد من كمية النترات(NO_3^-) المتاحة في التربة. وقد وجد أنّ مستوى النترات في التربة في فصل الربيع بعد محصول بقولي حبي كان أعلى بنحو 28% بالمقارنة مع إذا ما كان المحصول السابق هو القمح المسّمد بالآزوت، ولكن أقل بنحو43% بعد التبوير. وإنّ غلة محصول القمح المزروع بعد محصول بقولي حبي غير مسّمد كانت أكبر من غلة القمح المزروع بعد قمح مسّمد بنحو75 كغN/هكتار، ومشابهة لغلة محصول القمح بعد بور.

الدورات الزراعية Rotations: تتضمن عادةً الدورات الزراعية في بيئات حوض البحر المتوسط قمح وبقوليات وبور. والتبوير إما أن يكون قصيراً أو طويلاً، وعادةً ما يسبق المحصول. وتتمثل الغاية الأساسية من التبوير في حفظ الماء في التربة. وأشهر البقوليات التي تدخل في الدورات الزراعية هي الفول Faba bean في المناطق الأكثر رطوبة، والعدس في المناطق الأكثر جفافاً. وتفيد الدورة الزراعية في زيادة محتوى التربة من الآزوت نتيجة تثبيت الآزوت الجوي بواسطة المحصول البقولي، وتساعد في مكافحة الأعشاب الضارة، والأمراض Diseases، وتحافظ على محتوى التربة المائي Soil moisture (Fischer, 1981). و يتمثل الهدف الرئيس من الدورة الزراعية في مكافحة الأعشاب الضارة والأمراض. وإن تغطية التربة خلال فصل الشتاء الماطر دون ترك الأرض بوراً يُساعد في حماية التربة من خطر الانجراف المائي Water erosion، بالإضافة إلى الدور الذي يمكن أن تؤديه المحاصيل البقولية في إغناء التربة بالآزوت (Gavetto, 1992)، وتُسهم أيضاً في القضاء على الأعشاب الضارة الملازمة لمحصول القمح، وزيادة كفاءة استعمال المياه (Reeves, 1991).

التبوير Fallow: يُعد أسلوب تبوير الأرض من الأنظمة الزراعية القديمة بالنسبة إلى محاصيل الحبوب. والهدف من التبوير هو زيادة محتوى التربة من الماء والآزوت المتاح ومكافحة الأعشاب الضارة والمسببات المرضية (Schultz, 1980). ويُعد التبوير مهماً جداً في البيئات التي تتسم بقلة هطولاتها المطرية، حيث يُساعد التبوير النظيف Clean fallow في دورة المحصول الزراعية في تجميع الهطولات المطرية لموسم أو موسمين،

وتوفير كمية من الماء المخزون في التربة كافية لنمو نباتات المحصول وتطورها بشكلٍ جيد خلال كامل مراحل حياته. ويسمح التبوير أيضاً باستقرار الغلة الحبية yield Stability، حيث تمّ في إحدى الدراسات مقارنة دورة قمح بشكل مستمر دون تبوير Continuous wheat rotation مع دورة قمح- بور مدّة 30 عاماً، وكان متوسط غلة القمح على المدى الطويل نحو 0.7 طن . هكتار$^{-1}$ في حال تكرار زراعة القمح بالمقارنة مع 2.5 طن . هكتار$^{-1}$ في حال الدورة الزراعية قمح- بور. وتصل نسبة فشل المحصول Crop failure في حال تكرار زراعة القمح إلى نحو 37% (يقصد بفشل المحصول عندما لا تزيد غلة القمح عن 0.4 طن . هكتار$^{-1}$)، في حين أقل غلة حبية يمكن أن تُجنى في أسوأ الأحوال عند إتباع نظام التبوير لا تقل عن 1.2 طن . هكتار$^{-1}$ (Botton, 1991). ويوجد نوعان من أنظمة التبوير وذلك تبعاً للمنطقة المزروعة، والتربة المحلية، والظروف المناخية. هما: التبوير قصير الأجل Short-duration fallow: يتبع في المناطق التي تزيد فيها معدل الهطول المطري عن 300 مم . سنة$^{-1}$ ، وفي مثل هذه المناطق غالباً ما تُزرع المحاصيل النجيلية في دورة زراعية مع البقوليات. والتبوير طويل الأجل Long-duration fallow: ويتبع في المناطق التي يقل فيها معدل الهطول المطري عن 300 مم . سنة$^{-1}$ ، وتساعد الحيوانات في مكافحة الأعشاب الضارة في مثل هذه المناطق. ويُساعد التبوير في تجميع ما يقارب 60 إلى 100 مم من الماء في التربة. عموماً، يُسبب الاستثمار الجائر Over exploitation لمصادر التربة تدهوراً في التربة ما لم يترك القش على سطح التربة، ويُعتمد أسلوب الزراعة المباشرة بدون فلاحة (Harris et al., 1991).

إدارة التربة ومكافحة الأعشاب Soil management and weed control: تُعد عملية مكافحة الأعشاب الضارة من أهم مكونات الدورة الزراعية، بسبب منافسة الأعشاب الضارة لنباتات المحصول الاقتصادي على متطلبات النمو الأساسية، حيث يمنع نمو الأعشاب الضارة تراكم المياه في النظم البيئية بوجود أو بغياب التبوير، بسبب زيادة معدل فقد الماء بالتبخر النتح عن طريق نباتات الأعشاب الضارة. وتُعد عملية الرعي من أرخص أساليب مكافحة الأعشاب الضارة خلال سنوات التبوير، بالإضافة إلى تحسين المردود الاقتصادي للماشية. ووجد أنّ غلّة محصول القمح المزروعة في أرض مبورة سابقاً، وقامت فيها الماشية برعي الأعشاب الضارة قد تحسّنت بمقدار 67% بالمقارنة مع 137% زيادة في الغلة عند زراعة القمح بعد بور نظيف (Rooney et al., 1966). وكانت الطريقة المتبعة في الماضي للمحافظة على الأرض البور خالية من الأعشاب الضارة خلال فترة التبوير عن طريق فلاحة الأرض بعد كل هطول مطري للقضاء على الأعشاب الضارة النامية فيها. ولكن أشار الباحثان McDonald وFischer (1991)

إلى أنّ الفلاحة الزائدة خلال فترة التبوير تقلل من محتوى التربة من المادة العضوية، ما ينعكس سلباً على تركيب وخصوبة التربة، ما يؤثر سلباً في نفاذية التربة للماء ويجعل التربة أكثر عرضة للانجراف. ويمكن تجنب كل هذه التأثيرات السلبية من خلال ترك بقايا المحصول فوق سطح التربة.

التبوير الكيميائي Chemical fallow: تُشير الدراسات أنّ التبوير الكيميائي أكثر فاعلية من التبوير العادي، حيث تحمي البقايا النباتية المتروكة فوق سطح التربة في التبوير الكيميائي من ارتفاع درجة حرارة الأرض، وتحول دون فقد الماء بالتبخر. ويبقى تبعاً لذلك سطح التربة رطباً لفترة زمنية طويلة، ما يزيد من احتمال أن مياه الهطول المطري اللاحق سوف تنفذ إلى باطن التربة. وهذا يفسر أنّ الأراضي البور التي يترك على سطحها بقايا المحصول السابق تحتفظ بكمية أكبر من الماء بالمقارنة مع الأراضي المبورة التي تُزال منها بقايا المحصول أو تفلح بالتربة. بالإضافة إلى ذلك تسمح التربة الرطبة في زيادة فرص الزراعة في الموعد المناسب بسبب وجود كمية من الرطوبة كافية لإنبات البذور وإسترساء البادرات. وبيّنت نتائج الأبحاث الأتربة البور التي يترك عليها بقايا المحصول السابق دون استعمال مبيدات كيميائية لمكافحة الأعشاب الضارة احتفظت بكمية من الماء وصلت إلى 32% من مجموع الهطول المطري النازل، في حين احتفظت تلك الأراضي المبورة التي استعملت فيها مبيدات الأعشاب الضارة بنحو 42% من مجموع الهطول المطري.

المادة الوراثية المستخدمة Germplasm: إنّ إنتاج غلة حبية عالية في بيئات البحر الأبيض المتوسط الجافة وشبه الجافة هو حصيلة اتباع ممارسات زراعة جيدة، وزراعة الطرز الوراثية المتكيفة بشكلٍ أفضل لهذه البيئات. ويسعى مربو النبات منذ أمدٍ بعيد لإيجاد طرز وراثية تتمتع بكفاءة استعمال ماء عالية. وإنّ التأثير المتبادل بين الطراز الوراثي والعامل البيئي قد حدّ بشكلٍ ملحوظ من التقدم في برامج التربية لزيادة الغلة في مثل هذه البيئات ذات الهطولات المطرية القليلة، بالإضافة إلى التباين الكبير في معدلات الهطولات المطرية عبر السنين والمواقع، وكذلك التباين في سبل إدارة المحصول (Austin, 1989). وأشار الباحث Botton (1991) إلى أنّ زيادة قيمة WUE في المناطق ذات الهطولات المطرية المحدودة يمكن أن يتم من خلال تغيير سبل إدارة المحصول والأرض. والأكثر أهمية هو استنباط طرز وراثية تتميز بكفاءة استعمال ماء عالية يمكن زراعتها في مثل هذه البيئات الشحيحة بالمياه. ويمكن أن تمتلك الطرز المبكرة بالإزهار Early-flowering genotype، أو تلك التي تتمتع بمعدلات نمو عالية، أو امتلاء سريع للحبوب عند درجات الحرارة الأقل، وكفاءة استعمال ماء عالية (Fischer,

1981). ويُعزى ذلك إلى كفاءة النباتات المحدودة جداً في القيام بعملية التمثيل الضوئي وتصنيع المادة الجافة بعد الإزهار في بيئات البحر المتوسط بسبب الارتفاع الزائد في درجات الحرارة، وازدياد التدرج في الجهد المائي، ما يزيد من معدل فقد الماء بالتبخر-نتح، ويسبب شيخوخة الأوراق وانغلاق المسامات، لذلك لا بد من مراعاة العمل على زراعة الطرز الوراثية التي يمكن أن تكمل دورة حياتها وتصل إلى مرحلة النضج الفيزيولوجي للحبوب قبل أن تزداد شدة الإجهاد المائي Water stress المتزامن مع ارتفاع كبير في درجات الحرارة وازدياد حدة التدرج في ضغط بخار الماء بين النباتات والوسط المحيط (Vpd). ولكن غالباً ما تكون الغلة الحبية في الطرز القصيرة النمو أقل بكثير من الطرز الطويلة النمو. وبيّنت بعض الفرضيات أنّ زراعة طرز القمح الوراثية التي تمتلك مجموع جذري كثيف ومتشعب في الطبقة السطحية من التربة يمكن أن تزيد من كفاءة استعمال المياه، وتقلل بشكلٍ كبير من فقد الماء بشكل مباشر بالتبخر (Fischer, 1981). وإذا كان المجموع الجذري أيضاً متعمق، فسوف تتمكن مثل هذه الطرز من الوصول إلى طبقات التربة العميقة الرطبة وامتصاص كمية من الماء كافية لتعويض الماء المفقود بالتبخر النتح، ما يضمن المحافظة على امتلاء الخلايا النباتية، واستمرار انفتاح المسامات ودخول غاز الفحم اللازم لعملية التمثيل الضوئي وتصنيع المادة الجافة اللازمة لنمو النبات وتطوره، ما يُساعد في زيادة كفاءة استعمال المياه (Brown et al., 1987; Cooper, 1983).

الفصل التاسع

تأثير المنافسة بين النوعية وضمنها في إنتاجية الأنواع المحصولية
Competition effect between and within species on crops productivity

تحدث المنافسة Competition بين نباتين أو أكثر في بيئةٍ ما عندما تزيد متطلبات النمو المشتركة لهذه النباتات عن المصدر المتاح لواحد أو أكثر من العوامل المحددة للنمو, ومن هذه العوامل، الماء المتاح, والعناصر المغذية في التربة, وأكسجين التربة, وثاني أكسيد الكربون والضوء. وإذا كان أحد هذه العوامل متاحاً بكمياتٍ محدودة, فستكون المنافسة على هذا المصدر كبيرة. يمكن أن تكون المنافسة مباشرة، وتتضمن التفاعل المباشر بين الأفراد كإفراز مواد كيميائية سامة Allelopathy, أو غير مباشرة، تتضمن التأثير من خلال تقليل كمية المصدر المتاح للنباتات الأخرى دون حصول تفاعل مباشر معها.

تكون المنافسة عادةً بين نباتات النوع الواحد، وتُسمى المنافسة ضمن النوعية Intra-specific competition، وبين نباتات من أنواع مختلفة، وتُسمى المنافسة بين النوعية Inter-specific competition, وعادةً ما تكون شدة المنافسة على المصادر المتاحة أكبر في المنافسة ضمن النوعية بسبب تشابه متطلبات النمو للأفراد من النوع نفسه.

المنافسة ضمن النوعية Intra-specific competition:

هو الشكل من المنافسة الذي يتم بين أفراد من النوع نفسه على المصادر نفسها في النظام البيئي الذي تعيش فيه هذه الأفراد, وتكون المنافسة على المصادر المتاحة كالضوء والماء والمكان والعناصر المعدنية, كالمنافسة بين شجرتين من النوع نفسه, أو بين نباتات المحصول المزروع.

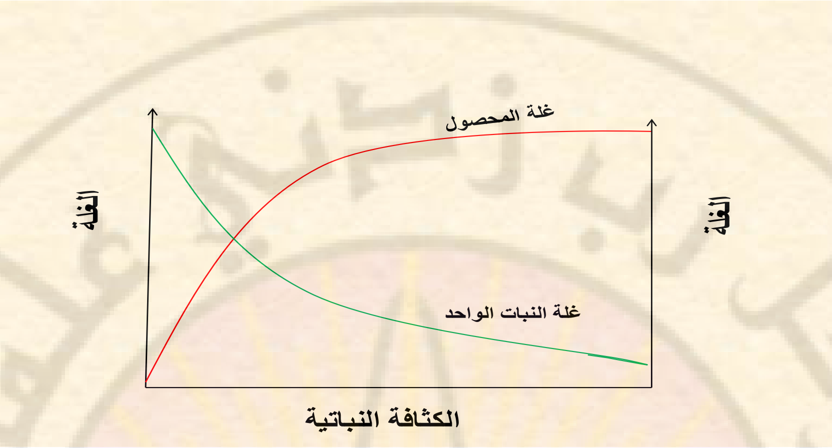
تؤدي المنافسة في المجتمع الحيواني إلى حدوث تغيرات في العدد الحالي والمستقبلي للأفراد من خلال التأثير في معدل الولادات والوفيات, ولكن في المجتمع النباتي، يكون تأثير المنافسة أكثر تعقيداً, فبالإضافة إلى التأثير في معدل نمو النباتات وموتها, فيمكن أن تؤدي إلى حدوث تغيرات في النباتات تشمل حجم النبات, وتعدد النباتات, وموعد ظهور الأعضاء النباتية المختلفة كالأوراق والأزهار. وفي بعض الحالات الاستثنائية عندما ينمو نبات ما في عزلة عن النباتات الأخرى, أي عند عدم وجود أية منافسة على الموارد المتاحة, فإنّ هذا النبات سينمو ليعطي غلة ستكون هي الغلة العظمى التي يمكن الحصول

عليها من هذا النبات, ولكن عندما يزداد عدد نباتات المحصول في وحدة المساحة أو الكثافة النباتية Plant population فإنّ المنافسة بين هذه النباتات سوف تزداد، ما يؤدي إلى تراجع غلة النبات النبات الواحد، وإنتاجية المحصول في وحدة المساحة. ولكن في بعض الحالات، بالرغم من تناقص غلة النبات الواحد, فإنّ الغلة في وحدة المساحة (غلة المحصول) سوف تزداد، ما يشير إلى أنّه بالرغم من عدم حصول النبات الواحد على متطلباته القصوى لإعطاء أكبر غلة ممكنة للنبات, فإنّ نباتات المجتمع النباتي تكون أكثر كفاءة في استعمال الموارد المحددة للنمو, وهذا بشكل خاص يكون واضحاً في كفاءة استعمال الضوء المتاح من قبل الغطاء النباتي, حيث تزداد كمية الضوء الممتصة بازدياد الكثافة النباتية للمحصول.

إنّ الغلة الاقتصادية للمحصول ما هي إلاّ نتيجةً لنمو المجموع النباتي النهائي للمحصول، الذي يعتمد بالدرجة الأولى على حيوية البذور ونسبة الإنبات ومعدل بقاء البذور حية، وبالتالي فإنّ تأسيس مجموع نباتي مثالي هو أمر ضروري للحصول على غلة عالية. إنّ تحديد الكثافة النباتية المثالية للمحاصيل المزروعة هو أمر مهم، وذلك يختلف باختلاف المحصول المزروع والظروف البيئية المحيطة, وبشكلٍ عام، يجب أن لا تكون الكثافة النباتية عالية في المحاصيل المزروعة تحت ظروف الزراعة البعلية، حتى لا تستنزف رطوبة التربة قبل نضج المحصول, ولا تكون منخفضة، بحيث لا تستفيد من رطوبة التربة بشكلٍ فعّال, وعلى العكس من ذلك, عند الظروف التي تكون فيها رطوبة التربة كافية، وتكون التربة خصبة (غنية بالعناصر الغذائية)، فإنّ الكثافة النباتية العالية تكون ضرورية من أجل الاستفادة من عوامل النمو بشكلٍ أكثر فعالية، شريطة توافر كمية جيدة من الإشعاع الشمسي.

غلة النباتات المفردة وغلة المجموع النباتي Yield of individual plants and community

يمكن تحقيق كامل الغلة الكامنة للنباتات المفردة عند زراعتها على مسافات زراعية متباعدة، وستكون المنافسة من أجل الحصول على عوامل النمو كبيرة بين النباتات عند زراعتها على مسافات متقاربة، ومن ثمّ سيكون هناك انخفاض في حجم النبات الواحد وغلته. في الواقع، تتناقص غلة النبات الواحد بشكلٍ تدريجي مع زيادة الكثافة النباتية في وحدة المساحة (الشكل، 89)، ولكن تزداد غلة المحصول ككل في وحدة المساحة بسبب الاستعمال الفعّال لعوامل النمو, ويمكن الحصول على الغلة العظمى من وحدة المساحة عندما تتعرض النباتات المفردة لمنافسة شديدة.



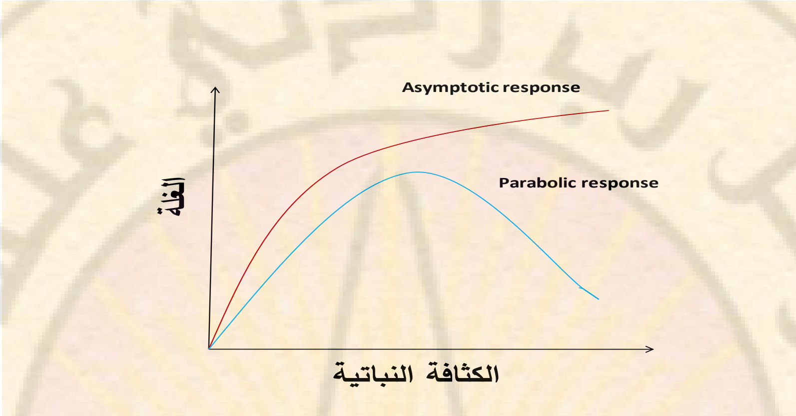
الشكل رقم (89): تأثيرالكثافة النباتية في غلة النبات الواحد وغلة المحصول.

الكثافة النباتية والغلة Plant population and yield

تتناقص غلة النبات الواحد عند الكثافة النباتية العالية، ويكون ذلك بشكلٍ رئيس نتيجة تناقص عدد الثمار (السنابل، القرون، الجوزات...الخ) في النباتات غير محدودة النمو Indeterminate plants (مثال: بعض أصناف فول الصويا، والقمح، والشعير)، في حين في النباتات المحدودة النمو Determinate plants (مثال:الذرة البيضاء، والذرة الصفراء) فإنّ تناقص الغلة يكون نتيجة تناقص حجم الثمار أو البراعم الزهرية. تسلك المحاصيل التي تعطي إشطاءات أو تفرعات كثيرة سلوك النباتات غير محدودة النمو، ويكون تناقص الغلة فيها بسبب تناقص عدد الحبوب أو البذور في النبات. وعلى عكس ذلك, فإنّ المحاصيل التي لا تعطي تفرعات أو إشطاءات يكون تناقص الغلة فيها ناتجاً عن انخفاض في حجم الثمرة كحجم العرنوس في الذرة الصفراء، أو العثكول في الذرة البيضاء. ومن بين كل مكونات الغلة يُعتبر وزن الحبوب صفة ثابتة تحت مستويات متباينة من الكثافات النباتية.

لقد تم بذل جهود كبيرة لتقييم العلاقة بين الكثافات النباتية والغلة. اقترح العالم Holliday (1960) وجود شكلين رئيسين لمنحنى الاستجابة للكثافة النباتية هما Asymptotic response (استجابة قطعي متناظر أو شبه خطي)، حيث تزداد الغلة بازدياد الكثافة النباتية حتى تصل إلى حدٍ تثبت عنده ولا تزداد بعده تقريباً. و Parabolic response

(استجابة قطعي مكافىء أو شبه منحن)، حيث تزداد الغلة بازدياد الكثافة النباتية حتى الوصول إلى الكثافة المثالية، وتنخفض بعدها (الشكل، 90).



الشكل رقم (90): منحنى تمثيلي للاستجابة شبه الخطية وشبه المنحنية للكثافة النباتية.

1- **الاستجابة قطعي متناظر Asymptotic response**: في حالة المحاصيل التي تكون فيها الغلة الاقتصادية هي المادة الجافة الكلية للمحصول، كما هو الحال في المحاصيل العلفية، أو معظم المادة الجافة للنبات، كما هو الحال في محصول التبغ، فإنّ الاستجابة لزيادة الكثافة النباتية تكون تبعاً للشكل القطعي المتناظر Asymptotic response (الشكل، 90). عند زراعة هذا النوع من النباتات بمسافات زراعية واسعة فإنّ المادة الجافة الكلية للنبات تزداد، وهذا يعني قلة المنافسة بين النباتات المتجاورة، ومع زيادة الكثافة النباتية أكثر فإنّ معدل زيادة المادة الجافة للنبات الواحد ينخفض بسبب حدوث المنافسة بين النباتات، ومن ثمّ يتناقص إنتاج المادة الجافة للنبات الواحد, ولكن تزداد الغلة الكلية للنباتات في وحدة المساحة. وفي حال زيادة الكثافة النباتية أكثر فأكثر فلا يكون هناك أي زيادة في المادة الجافة في وحدة المساحة ويأخذ منحنى إنتاج المادة الجافة شكلاً خطياً مع زيادة الكثافة النباتية. بالرغم من وجود بعض الاستثناءات, حيث بيّن بعض العلماء أنّه قد يحصل تناقص في إنتاج المادة الجافة في وحدة المساحة بازدياد الكثافة النباتية, إلاّ أنّ القاعدة العامة تبقى إنتاج المادة الجافة الكلية للمحصول يتبع هذا الشكل من الاستجابة. لوحظ كذلك الأمر, أنّ إنتاجية درنات البطاطا، وإنتاجية الجذور من الشوندر المتطاول تقع ضمن هذا الشكل من الاستجابة. إنّ زراعة المحاصيل العلفية بكثافة نباتية عالية أمر موصى به من أجل الحصول على غلة عالية، وتكون النفقات الإضافية عبارة عن تكلفة البذار فقط ، إضافة إلى أنّ الكثافة العالية للمحاصيل العلفية تعطي ساقاً ليناً

وأوراقاً أكثر بالمقارنة مع الكثافة النباتية القليلة. إنّ هذا النوع من الاستجابة للكثافة النباتية يمكن التعبير عنه بالمعادلة التالية:

$$Y= AP + \frac{1}{1+AbP}$$

حيث Y: الغلة من المادة الجافة في وحدة المساحة، A: غلة النبات العظمى الظاهرية، p: عدد النباتات في وحدة المساحة، b: معامل الارتباط الخطي.

2- **الاستجابة قطعي مكافىء Parabolic response:** يستعمل هذا الشكل من الاستجابة لوصف العلاقة بين الغلة والكثافة النباتية عندما تكون الغلة الاقتصادية للمحصول هي جزء من المادة الجافة الكلية. في هذه الحالة فإنّ الغلة تزداد أيضاً مع زيادة الكثافة النباتية حتى تصل للحد الأعظمي الذي يمثل الحد المثالي، لكن على عكس الاستجابة قطعي متناظر تتناقص الغلة مع الزيادة في الكثافة النباتية بعد ذلك الحد (الشكل، 90). واقترح Holliday (1960) بأنّ منحني الاستجابة هذا يمكن التعبير عنه بالمعادلة التربيعية التالية:

$$Y=a+bp+cP^2$$

حيث: Y: الغلة في وحدة المساحة، p: الكثافة النباتية، c،b،a: هي معامل الارتباط.

المنافسة بين الأنواع Inter-specific competition: هو النوع من المنافسة الذي يتم بين نباتات أو أفراد من أنواع مختلفة في النظام البيئي الذي تعيش فيه هذه الأنواع, وتكون المنافسة شديدة كلما ازداد ازدحام هذه الأنواع في وحدة المساحة، وازداد التشابه في متطلباتها البيئية.

المنافسة بين المحصول والأعشاب Crop-Weed competition: هي المنافسة التي تحدث بين نباتات المحصول والأعشاب المرافقة على الموارد المتاحة في النظام البيئي، وذلك من أجل البقاء والتفوق. تتم المنافسة على الضوء وغاز ثاني اوكسيد الكربون من قبل الأوراق، لذلك تكون المنافسة على مثل هذه العوامل فوق سطح التربة، في حين تكون المنافسة على العناصر المعدنية المغذية والماء تحت سطح التربة، حيث يتم امتصاص هذه الموارد بواسطة الجذور.

في المراحل المبكرة لحياة كلٍ من المحصول والعشب، يكون دليل المساحة الورقية وكثافة الجذور منخفضة ويكون كل نبات قادراً على الحصول على متطلباته كما لو أنّه يعيش لوحده. وفي معظم المحاصيل تكون فترة عدم التداخل بين المحصول والعشب قصيرة جداً، حتى عندما تكون كثافة الأعشاب منخفضة. وتبدأ المنافسة عند مرحلة تشكل ثلاثة أوراق حقيقية للنبات العشبي, ومع تقدم نمو نباتات المحصول، فإنّ دليل المساحة الورقية وكثافة الجذور تزداد، ما يؤدي إلى تداخل متبادل في امتصاص واحد أو أكثر من عوامل النمو. إنّ معدل نمو المحصول يتناقص نتيجة نمو الأعشاب وزيادة عددها، وهذا بدوره يؤدي إلى انخفاض غلة المحصول نتيجة تلك المنافسة, ولابد من الإشارة إلى أنّ الأعشاب أكثر تأقلماً مع النظم البيئية الزراعية من المحاصيل المزروعة. وبشكلٍ عام, في حقلٍ موبوء بالأعشاب توجد أربعة عناصر أساسية للمنافسة الكلية التي تحدث في ذلك الحقل، وهذه العناصر هي:

- المنافسة ضمن النوعية (Intraspecific competition)، بين نباتات المحصول المزروع.
- المنافسة بين النوعية (Interspecific competition)، بين نباتات المحصول المزروع ونباتات الأعشاب المختلفة.
- المنافسة بين النوعية (Interspecific competition)، بين أنواع الأعشاب المختلفة.
- المنافسة ضمن النوعية (Intraspecific competition)، بين نباتات النوع الواحد من الأعشاب.

عموماً، تحدث المنافسة عندما تكون العوامل المحددة للنمو متاحة بكمياتٍ محدودة, وتُعد المنافسة على الضوء والعناصر المعدنية مهمة جداً في تخفيض نمو المحصول وغلته.

المنافسة على العناصر المعدنية Competition for nutrients: تُعد العناصر المعدنية من أهم العوامل المحددة لنمو النباتات, وبالتالي تكون المنافسة عليها كبيرة. وقد بيّنت الكثير من الدراسات أنّ تركيز العناصر المعدنية في نباتات الأعشاب أكبر بكثير منها في نباتات المحصول المرافق، فعلى سبيل المثال, تتميز الأنواع العشبية في الجنس *Amaranthus* بأنّها تحتوي على أكثر من 3% N في وزنها الجاف, وتتميز نباتات *Chenopodium* و *Portolaca spp* بأنّها محبة جداً للبوتاسيوم وتحتوي أكثر من 1.3% K_2O في وزنها الجاف. ففي حقول الذرة الصفراء، تكون كمية العناصر المعدنية الممتصة بوساطة محصول الذرة الصفراء أقل من تلك الممتصة من قبل الأعشاب

الضارة Weeds المرافقة له (جدول، 24), وتتمكن الأعشاب خلال 30 يوماً الأولى من عمر المحصول من امتصاص كمياتٍ كبيرة من العناصر المعدنية تتجاوز تلك الممتصة من قبل نباتات المحصول بـنحو 7- 10 مرات. ويمكن أن تصل الكتلة الحية للأعشاب حتى 50% من الكتلة الحية الكلية في حقول الذرة الصفراء مسببةً احتجاز قرابة 64-83% من العناصر المعدنية في نباتات تلك الأعشاب (جدول، 25). كذلك الأمر, تشكل كمية العناصر المعدنية الممتصة بوساطة الأعشاب المرافقة لمحصول الفول السوداني، ولاسيما الفوسفور والبوتاسيوم نحو 80% من كمية العناصر المعدنية الكلية الممتصة بوساطة المحصول والأعشاب المرافقة له (جدول، 26).

الجدول رقم (24): التركيب الكيميائي لنباتات الذرة الصفراء والأعشاب المرافقة

النبات	محتوى العناصر (%)				
	N	P	K	Ca	Mg
الذرة الصفراء	1.20	0.21	1.19	0.16	0.15
عشبة الـAmaranthus	2.62	0.40	3.86	1.63	0.44
عشبةالـPortuleca	2.39	0.30	7.31	1.51	0.64

الجدول رقم (25): المادة الجافة والعناصر الممتصة لمحصول الذرة الصفراء والأعشاب المرافقة.

النبات	المادة الجافة (كغ .هكتار-1)	العناصر الممتصة (كغ .هكتار-1)				
		N	P	K	Ca	Mg
الذرة الصفراء	6195	30.2	5.49	62.8	14.06	5.98
الأعشاب	6171	55.0	9.69	297.5	43.45	39.94
العناصر الكلية	-	85.2	15.18	360.3	57.51	45.92
النسبة المئوية للعناصر المحتجزة بواسطة الأعشاب	-	64	64	83	76	83

من المعروف أنّ المحاصيل الموبوءة بالأعشاب تظهر عليها أعراض نقص الآزوت، وبعض الأعشاب لا تستنفد مخزون التربة من الآزوت بالامتصاص فحسب, بل تؤدي إلى تحول الآزوت إلى آزوتيت، فعلى سبيل المثال تشجع عشبة الـ Nutsedge على تكاثر البكتريا المسؤولة عن عملية التأزت (Nitrification)، وذلك بإفرازها غاز CO_2.

الجدول رقم (26) : العناصر الممتصة بواسطة محصول الفول السوداني والأعشاب المرافقة.

النبات	العناصر الممتصة (كغ .هكتار$^{-1}$)		
	N	P	K
الفول السوداني	48.27	4.41	8.06
الأعشاب	21.23	28.33	38.86
العناصر الكلية	69.50	32.74	46.92
نسبة العناصر المحتجزة بواسطة الأعشاب	30.50	86.53	82.80

المنافسة على الضوء Competition for light: ينظم الضوء الكثير من العمليات المتعلقة بنمو النباتات وتطورها, ويمكن أن تخفض النباتات المتجاورة كمية الضوء الواصلة إذا ما ظللت النباتات بعضها بعضاً. ويمكن أن تبدأ المنافسة على الضوء في مراحل مبكرة من نمو المحصول, حيث تنمو بشكلٍ عام الأعشاب بشكلٍ سريع، وسرعان ما تظلل نباتات المحصول إذا لم تتم مكافحتها بسرعة, وحتى في حالة الأعشاب القصيرة، تستحوذ الأعشاب على الأشعة الفعالة ضوئياً (PAR)، ما يؤدي إلى انخفاض عملية التمثيل الضوئي وتقصير فترة حياة الأوراق السفلية للمحصول الاقتصادي.

تكون المنافسة على الضوء على أشدها عندما تكون الرطوبة متوافرة والخصوبة عالية, فتنمو النباتات بشكلٍ قوي وسريع وتشكل مساحة ورقية كبيرة, والنباتات التي تتميز بدليل مساحة ورقية (LAI) مرتفع تتفوق على النباتات ذات دليل المساحة الورقية المنخفض. وكلما ازدادت الكثافة النباتية أو ازداد الازدحام في وحدة المساحة ازدادت المنافسة على الضوء. وتكتسب النباتات الطويلة نسبياً أفضلية في المنافسة على الضوء. فمثلاً عشبة الـ*Amaanthus* تخفض كثافة جريان الفوتونات الضوئية الواصلة إلى محصول القطن

بنحو90% في منتصف النهار، وتشكل الكثافة الضوئية الواصلة إلى محصول الذرة الصفراء نحو 56-63% في الجو الغائم، وحتى 50-57% في الجو المشمس فقط، بسبب منافسة النباتات الطويلة من عشبة *Sorghum halepense*، وبسبب التظليل تمتلك نباتات المحاصيل أوراق رفيعة شاحبة مع تناقص في عدد الحزم الوعائية والخلايا الميرستيمية.

المنافسة على الماء Competition for water: تُعرف كمية المياه المطلوبة لإنتاج وحدة واحدة من المادة الجافة بمعامل النتح Transpiration ratio, ويكون معامل النتح للأعشاب مرتفعاً بالمقارنة مع المحصول، فعلى سبيل المثال, يكون معامل النتح لعشبة النجيل (*Cynodon dactylon*) قرابة 813 بالمقارنة مع معامل النتح للدخن 450، وللذرة الرفيعة 430، وهذا يدل على أنّ كمية الماء المطلوبة لإنتاج طن واحد من الأعشاب تكون أكبر من تلك المطلوبة لإنتاج طن واحد من المحصول المزروع.

تستهلك الأعشاب المياه بشكلٍ كبير وتستنزف رطوبة التربة بسرعة مسببةً العجز المائي للمحصول المزروع، ولاسيما تحت ظروف الزراعة المطرية. فعلى سبيل المثال، يتناقص الجهد المائي لأوراق القطن بمعدل 5.3 بار إذا نمت عشبة عرف الديك Amaranthus بكثافة نباتية 2.5 نبات . م$^{-2}$، حيث تحافظ عشبة الـAmaranthus على جهد مائي عالٍ وضغط امتلاء مرتفع بالمقارنة مع القطن خلال موسم النمو، وذلك لمقدرتها على امتصاص الماء من طبقات التربة العميقة بكفاءة أكبر من نباتات القطن.

المنافسة على ثاني أكسيد الكربون Competition for Carbon Dioxide: إنّ المنافسة على غاز ثاني أكسيد الكربون من قبل الأعشاب تبدأ عندما تكون كثافة الأعشاب مرتفعة، وبما أنّ معظم نباتات الأعشاب هي نباتات رباعية الكربون (C_4-plants) تستطيع امتصاص CO_2 عند مستويات منخفضة بالمقارنة مع نباتات المحاصيل. ففي إحدى التجارب في الهند وجد أنّه مع زيادة تركيز CO_2 بشكلٍ إصطناعي من 350 ppm إلى 700 ppm فإنّ القدرة على المنافسة لنبات فول الصويا (C_3-plant) قد ازدادت بالمقارنة مع عشبة حشيشة السودان (*Sorghum halepense*) المرافقة له وهي من نباتات رباعية الكربون. عموماً، غالباً ما تكون المنافسة على CO_2 محدودة في الظروف البيئية الطبيعية.

تأثير التضاد للأعشاب Allelopathic effect: تفرز معظم النباتات بعض المواد الكيميائية في التربة التي يمكن أن تعيق الإنبات والنمو للنباتات الأخرى في محيطها، تدعى هذه الظاهرة التضاد Allelopathy. تتوقف درجة تأثير التضاد على نوع النبات،

ومن أهم أنواع الأعشاب التي تُظهر تأثير التضاد على المحاصيل؛ *Agropyron repens*، Sorghum *halepense*، *Lantana camara*, *Abutilon theophrasti*، *Cyperus rotendus*، Euphorbia *maculate*، وغيرها. إنّ إفرازات الريزومات لعشبة الـ Ambrosia تخفض من الإنبات ونمو البادرات لعدة محاصيل، مثل القمح والشوفان، والفصة. وإفرازات جذور الشوفان البري (*Avena fatua*) عند مرحلة ورقتين إلى أربع ورقات تكون سامة لمحصول القمح. وتخفض إفرازات عشبة *Abutilon theophrasti* الحالة المائية لنباتات فول الصويا بتأثيرها في امتصاص الماء، ويؤدي هذا النقص المائي إلى إغلاق المسامات وتحطم الكلوروفيل في أوراق فول الصويا.

العوامل التي تؤثر في المنافسة بين المحصول والأعشاب Factors affecting weed-crop competition

يمكن تلخيص العوامل التي تؤثر في شدة المنافسة بين المحصول المزروع والأنواع العشبية المرافقة بمجموعة من العوامل تتعلق بخصائص كل من المحصول المزروع والأعشاب المرافقة، وبالممارسات الزراعية المتبعة، وهذه العوامل هي:

1- **موعد ظهور الأعشاب**: حيث إنّ الأنواع التي تظهر أولاً وتستفيد بشكلٍ أكبر من الموارد المتاحة (أشعة الشمس, والماء والعناصر المعدنية) تملك قدرة تنافسية أكبر من النباتات التي تظهر لاحقاً. وعادةً ما تكون منافسة الأعشاب على أشدها في المراحل المبكرة من نمو المحصول, حيث يتأثر نمو النباتات بشكلٍ كبير نتيجة الانخفاض في كمية الأشعة الشمسية الساقطة, وكمية الماء والعناصر المتاحة, ولذلك تنخفض غلة المحاصيل بشكلٍ كبير في المنافسة المبكرة للأعشاب بالمقارنة مع المنافسة في المراحل المتأخرة من نمو المحصول.

2- **طبيعة النمو**: الأنواع ذات معدلات النمو السريعة, التي تمتلك مجموعاً جذرياً متعمقاً, ومجموعاً خضرياً متفرعاً, ومساحة ورقية كبيرة تكون ذات قدرة تنافسية كبيرة.

3- **معدل الزراعة أو الكثافة الزراعية للمحصول:** تختلف الأنواع النباتية في معدل الزراعة الملائم لكل نوع، ولكن بشكل عام يمكن للكثافة النباتية العالية أن تزيد من قدرة المحصول على منافسة الأعشاب حيث إنّ المحصول يكون قادراً على تغطية سطح التربة بشكلٍ أكبر وبالتالي يستطيع الاستفادة من المصادر المتاحة بشكلٍ أفضل. تُسهم المحاصيل ذات القدرة التنافسية العالية في تحسين فعالية المبيدات العشبية وغيرها من الطرق المستخدمة لمقاومة الأعشاب، وهذا بدوره يُساعد في

خفض نسبة تشكل البذور في الأعشاب، وبالتالي يقلل من انتشارها لاحقاً (Lemerle et al., 2004).

4- **عمق الزراعة:** إنّ زراعة البذور على عمق واحد يكون هو العمق المثالي Optimum depth يؤدي إلى ظهور البادرات بوقتٍ واحد وبشكل متجانس، وهذا يكسب النباتات مقدرة أكبر على المنافسة فيما لو ظهرت النباتات بشكلٍ غير متجانس نتيجة زراعة البذور إما على عمق كبير يؤدي إلى استهلاك قسم كبير من مدخرات البذور لأجل دفع البادرات فوق سطح التربة، وتكون عندها النباتات النامية بطيئة النمو وضعيفة المنافسة وأكثر عرضة للإصابة بالأمراض والحشرات، أو على أعماق غير متجانسة سطحية وعميقة، تؤدي إلى إنبات غير متجانس، وعدم قدرة البذور المزروعة في تربة جافة على الإنبات أساساً حتى موعد الهطول أو الري التالي، بالإضافة إلى أنّ الزراعة السطحية تعرض البذور إلى الضرر جرّاء إضافة المبيدات العشبية قبل الزراعة.

5- **موعد زراعة المحصول:** تؤدي زراعة المحصول في الوقت المناسب لزراعته للحصول على نباتات قوية قادرة على المنافسة بشكلٍ أكبر.

6- **كثافة الأعشاب**: تزداد حدة المنافسة بازدياد الكثافة العشبية، الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض كبير في غلة المحصول نتيجة استنزاف الموارد المتاحة من قبل الأعشاب على حساب المحصول المزروع, فإذا ازداد الوزن الجاف للأعشاب بمقدار 1كغ فهذا يعني نقص بمقدار 1كغ من الوزن الجاف للمحصول. وتزداد كثافة الأعشاب في الزراعات المتباعدة بالمقارنة مع الزراعة الكثيفة للمحصول.

7- **طول فترة نمو أو بقاء الأعشاب**: حيث تنخفض الغلة المحصولية بشكلٍ كبير إذا ما تركت الأعشاب لتنمو ولم تتم معالجتها بشكلٍ سريع بعد 2-3 أسابيع من ظهورها.

8- **نوع وخصائص أو صفات الأعشاب السائدة**: تختلف الأنواع العشبية حتى لو كانت متماثلة في كثافتها، وفي مقدرتها التنافسية, وذلك يعود بشكلٍ رئيس إلى الاختلاف في طبيعة نمو هذه الأنواع, وفيما إذا كانت تمتلك القدرة على إفراز مواد كيميائية تضر بإنبات ونمو المحصول المزروع أو لا. فعلى سبيل المثال الأنواع البرية من الخردل wild mustard (*Brassica spp.*) خفضت الإنتاجية في الشوندر السكري بشكلٍ أكبر من تأثير Yellow foxtail (*Setaria glauca*), وفي المناطق الجافة عادةً ما تكون الأنواع العشبية المعمرة مثل شوك الحقول (*Cirsium arvense*) (*Canada thistle*)، وأنواع اللبلاب (*Convolvulus arvensis*) Bindweed) أكثر قدرة على المنافسة من الأنواع العشبية الحولية, وذلك بسبب امتلاكها مجموع جذري متعمق, ومجموع خضري كبير.

9- **نوع وخصائص المحصول المزروع**: تختلف الأنواع المحصولية والأصناف المزروعة فيما بينها في مقدرتها على منافسة الأعشاب الضارة, فعلى سبيل المثال, يأتي الشعير في مقدمة النباتات النجيلية في مقدرته على منافسة الأعشاب, يليه الشيلم, فالقمح ومن ثمّ الشوفان, وذلك يعود بشكل رئيس لمقدرة الأول على تشكيل مجموع جذري متشعب في الأسابيع الثلاثة الأولى بالمقارنة مع بقية الأنواع النجيلية. كذلك الأمر، تختلف الأصناف في تحملها لمنافسة الأعشاب, حيث أشار Lemerle وزملاؤه (1995) إلى وجود اختلافات بين أصناف القمح المزروعة بكثافة 150 نبات . م$^{-2}$ في درجة تحملها لمنافسة الأعشاب، وتراوحت نسبة النقص في الغلة بين 20% في الأصناف ذات الكفاءة التنافسية العالية إلى 40% في الأصناف ضعيفة المنافسة.

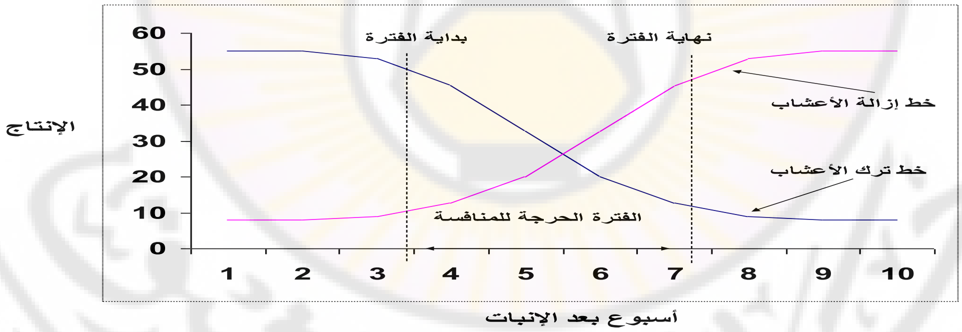
10- **خصائص التربة و عمليات التسميد**: تُساعد الزراعة في تربة مناسبة لنمو المحصول في الحصول على نباتات قوية قادرة على المنافسة بشكلٍ أكبر. ويُسهم كذلك التسميد المتوازن لكل نوع وصنف نباتي في الحصول على نباتات ذات مقدرة تنافسية أكبر.

الفترة الحرجة لمنافسة الأعشاب Critical period of weed competition

وهي بالتعريف أقصر فترة زمنية خلال نمو المحصول عندما يؤدي التعشيب إلى عائدات اقتصادية عالية، وتكون غلة المحصول المتحصل عليها نتيجة التعشيب خلال هذه الفترة قريبة من المتحصل عليها تحت ظروف عدم وجود أعشاب في الحقل خلال كامل موسم النمو. وبشكلٍ عام, فإنّ الفترة الحرجة لمنافسة الأعشاب لمعظم المحاصيل هي قرابة 30 يوماً (الجدول، 27), ولكن تختلف هذه الفترة باختلاف المحصول المزروع وطبيعة زراعته, والأنواع العشبية المرافقة, وظروف النمو السائدة. فعلى سبيل المثال, تكون الفترة الحرجة في حقول الرز المزروعة بالحبوب مباشرةً هي بعد 10-20 يوماً من ظهور البادرات, في حين في الحقول المزروعة بالشتول, تكون هناك فترتان حرجتان الأولى بعد 4-6 أسابيع من التشتيل, والثانية خلال الأسبوع 12 من نمو المحصول. وفي محصول البطاطا, تكون الفترة الحرجة التي يجب إجراء التعشيب فيها هي بعد 2-4 أسابيع من الزراعة, حيث يؤدي التأخير في التعشيب بعد هذه الفترة إلى خسائر كبيرة في الغلة من الدرنات (Gupta *et al*., 1979). وبالنسبة إلى محصول الذرة الصفراء, تكون الفترة الحرجة بعد 2-3 أسابيع من الإنبات, حيث تستطيع أن تكمل الأعشاب المرافقة خلال هذه الفترة 15-18% من نموها, في حين لا يتجاوز معدل النمو في نباتات محصول الذرة 2-3%, لذلك فإنّه من الضروري القيام بالتعشيب خلال المراحل المبكرة من أجل الحصول على إنتاجية جيدة من المحصول.

الجدول رقم (27): الفترة الحرجة لمنافسة الأعشاب لمحاصيل مختلفة.

المحصول	الفترة الحرجة (يوم بعد الزراعة)	
	من	إلى
الأرز (المروي)	15	45
الأرز (البعلي)	طوال موسم النمو	
الذرة الرفيعة	15	45
الذرة الصفراء	15	35
الدخن	25	45
فول الصويا	15	45
الحمص	30	45



الشكل رقم (91): الفترة الحرجة لمنافسة الأعشاب الضارة.

العوامل المؤثرة في الفترة الحرجة لمنافسة الأعشاب: تبدأ الفترة الحرجة لمنافسة الأعشاب مع بداية ظهور الأعشاب وتنتهي عندما يغطي المحصول نحو 80% من التربة، وتعتمد طول الفترة الحرجة لمنافسة الأعشاب على طبيعة المحصول، وقدرته التنافسية، والصنف المزروع وظروف النمو، (الشكل، 91).

1- **طبيعة نمو المحصول المزروع**: هناك محاصيل مثل الذرة الرفيعة والذرة الصفراء وزهرة الشمس تنمو بسرعة وتغطي الأرض بسرعة، لذلك طول الفترة الحرجة

لمنافسة الأعشاب قصيرة، في حين في محاصيل أخرى مثل قصب السكر، والبطاطا، والقطن، حيث يكون نموها في البداية بطيئاً وتزرع على مسافات متباعدة وتحتاج إلى وقت أطول لتغطي سطح التربة، فإنّ الفترة الحرجة تكون أطول. فعلى سبيل المثال, تمتد الفترة الحرجة لمنافسة الأعشاب في محصول قصب السكر من الأسبوع 4 إلى الأسبوع 16 بعد الزراعة (Singh *et al.*, 1980), وبالنسبة إلى محصول البازلاء, تمتد من 30-60 يوماً بعد الزراعة (Prakash and Srivastava, 2007).

2- **ظروف النمو**: على سبيل المثال في محصول الرز، فإنّ الرز المزروع تحت ظروف الغدق يغطي سطح التربة بسرعة وبالتالي تكون فترة المنافسة قصيرة، في حين الرز المزروع تحت ظروف الزراعة البعلية Aerobic rice يغطي سطح التربة ببطء، وتكون فترة المنافسة مع الأعشاب طويلة.

3- **الصنف المزروع**: الأصناف الطويلة وكثيرة الإشطاءات وذات المجموع الخضري الكبير التي تغطي سطح التربة بشكلٍ مبكر وفعّال، تثبط نمو الأعشاب وتكون الفترة الحرجة لمنافسة الأعشاب قصيرة بالمقارنة مع الأصناف القزمة ذات الغطاء النباتي القليل. وبشكل عام, يمكن تلخيص أهم الصفات التي تتميز بها الأنواع النباتية المتحملة لمنافسة الأعشاب بالتالي:

1- خصائص النموات الخضرية:

- النمو والتطاول السريع للأفرع والأوراق.
- توضع الأوراق بشكلٍ أفقي في ظروف الإضاءة الضعيفة، وتوضعها بشكلٍ رأسي في ظروف الإضاءة العالية.
- أوراق كبيرة، وسميكة نوعاً ما بحيث تحد من مرور الأشعة الشمسية من خلالها.
- وجود هندسة ورقية مناسبة تضمن الحصول على أكبر كمية ممكنة من الضوء.
- توجيه المادة الجافة لبناء سوق طويلة.
- تطاول سريع في ظروف الإضاءة الضعيفة.

2- خصائص الجذور:

- النمو السريع والمبكر، والقدرة على الإختراق التربة والانتشار في التربة.
- نسبة مرتفعة من كثافة الجذور/ حجم التربة.
- نسبة مرتفعة للجذور/ النموات الخضرية.
- زيادة في طول الجذر نسبة لوزنه.
- وجود أوبار شعرية كثيفة وطويلة.

الفصل العاشر

دور الزراعة الحافظة في تحسين العوامل البيئية وإنتاجية المياه والأرض والمحصول

Role of Conservation Agriculture in Improving Environmental Factors and the Productivity of Water, Land and Crop

يتطلب تأمين الاحتياجات السكانية المتزايدة من الغذاء والكساء ضرورة العمل على زيادة متوسط إنتاجية الأنواع المحصولية الحبية (القمح، والشعير، والذرة الصفراء، والذرة البيضاء)، والبقولية (الحمص، والعدس، والبازلاء، والبيقية) في وحدة المساحة من الأرض، بسبب صعوبة التوسع الأفقي، نتيجة محدودية الأراضي الصالحة للزراعة، بسبب التملح Salinization، وقلّة الموارد المائية العذبة السطحية والجوفية Water scarcity، وتراجع معدلات الهطول المطري السنوي، وتذبذب الأمطار عبر المواسم، وسوء توزيعها خلال الموسم الزراعي بما يضمن تأمين احتياجات النباتات المائية خلال مختلف مراحل النمو، ولاسيما خلال المراحل المتقدمة الحرجة (مرحلتي الإزهار، وامتلاء الحبوب) المُحددة لغلة الأنواع المحصولية المزروعة الاقتصادية. ويمكن تحقيق ذلك من خلال التكثيف الزراعي Production intensification، الذي يتطلب التحضير الجيد للتربة قبل الزراعة (الفلاحة المكثفة والمتكررة)، وزيادة معدلات الأسمدة المعدنية المضافة، وزراعة البذار المحسّن عالي النوعية، واستعمال كمياتٍ أكبر من مبيدات الآفات، وإضافة كمياتٍ أكبر من مياه الري تحت ظروف الزراعة المروية، وتطبيق الري التكميلي تحت ظروف الزراعة البعلية. تؤدي مثل هذه الممارسات إلى زيادة تكاليف الإنتاج الزراعي Production costs، وخاصةً في ظل ارتفاع أسعار مدخلات الإنتاج الزراعي عامةً، والوقود خاصةً، بالإضافة إلى إلحاق الضرر بالنظم البيئية الزراعية، حيث تؤدي عملية الفلاحة المكثفة Frequent inversion على المدى البعيد إلى استنفاد محتوى التربة من المادة العضوية، الأمر الذي يؤثر سلباً في جميع خصائص التربة الفيزيائية، والكيميائية، والحيوية، ويُضعف مقدرة التربة الإنتاجية. ويؤدي تدهور الأراضي الزراعية نتيجة التكثيف الزراعي، وشح الموارد المائية العذبة إلى تدني إنتاجية الأرض والمحاصيل الزراعية، والمياه. وتتمثل أعراض تدهور الأراضي الزراعية Soil degradation بالنقاط الآتية:

1. ازدياد حساسية الترب الزراعية للانجرافين الريحي والمائي Wind and water erosion.

2. تدني خصوبة التربة Soil fertility، وانضغاط طبقات التربة تحت السطحية.
3. تراجع مقدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه، بسبب تراجع حجم الكتل الترابية ومسامية التربة، نتيجة استنفاد محتوى التربة من المادة العضوية Organic matter، وتشكل القشرة السطحيةالكتيمة Crust.

وأصبح تبعاً لذلك لزاماً على المزارعين أن يبحثوا عن طرق الإنتاج الزراعي المستدامة Sustainable، والمنتجة Productive، والمربحة Profitable، والأقل استنفاداً للموارد الطبيعية (التربة، والمياه)، والأكثر حفاظاً على النظم البيئية الزراعية والطبيعية. يتمثل الحل الأساسي بتطبيق نظام الزراعة الحافظة Conservation Agriculture، الذي يعتمد في جوهره على أربع دعائم رئيسة، هي:

1. عدم فلاحة التربة، أو فلاحتها بالحد الأدنى.
2. التغطية المستمرة لسطح التربة بمحاصيل التغطية الخضراء، أو بالبقايا النباتية الميتة.
3. تطبيق الدورة الزراعية المناسبة، التي تتضمن محصولاً بقولياً ذا كفاءة عالية على تثبيت الآزوت الجوي، وتنتج كتلة حية أكبر.
4. المكافحة الفعّالة للأعشاب الضارة Weeds، وخاصةً في الحقول الموبوءة ببذور الأعشاب الضارة.

الشكل رقم (92): تسبب عملية الفلاحة المكثفة والمتكررة تدهور التربة على المدى البعيد.

عموماً، أشارت العديد من الدراسات العالمية والعربية إلى أهمية تطبيق نظام الزراعة الحافظة في تحسين عوامل إدارة الأرض والمحصول، وتقليل تلوث التربة والمياه، وتخفيف حساسية الترب الزراعية للانجرافين الريحي والمائي، وتقليل الاعتماد على مدخلات الإنتاج الزراعي الخارجية External inputs، وتحسين إنتاجية المياه ونوعيتها، والمحافظة على البيئة من خلال تقليل معدل انبعاث غازات الصوب الزجاجية، وزيادة كفاءة الترب الزراعية على احتجاز الكربون CO_2-sequestration، نتيجة تقليل كميات الوقود المستهلكة. يُساعد ذلك بالمحصلة في تحسين إنتاجية الأنواع المحصولية المزروعة، وتقليل الفجوة الإنتاجية Yield gap، والغذائية Food gap، وزيادة دخل المزارع العربي وتحسين مستوى معيشته، بالإضافة إلى تحسين العوامل البيئية.

مفهوم الزراعة الحافظة (الزراعة بدون فلاحة) No- tillage Concept

تُعرّف الزراعة الحافظة (المباشرة أو بدون فلاحة)، بأنّها زراعة المحاصيل في تربة غير محضّرة بشكلٍ مسبق، من خلال فتح شق ضيق على شكل خندق Trench أو شريط بعرضٍ وعمق كافيين فقط لوضع الأسمدة والبذار وتغطيتهما بشكلٍ ملائم (Phillips and Young, 1973). ويُفهم من الزراعة الحافظة أنّ التربة تبقى مغطاة ببقايا المحصول السابق Crop residues، أو بمحاصيل التغطية الخضراء Green manure cover crops (GMCC's). وتُعد عملية وقف انجراف التربة Soil erosion control بمنزلة القوة المحركة الرئيسة لتبني نظام الزراعة الحافظة (تقانة البذر المباشر Direct seeding). وفي الجمهورية العربية السورية، فإنّ الدافع الرئيس لتبني نظام الزراعة الحافظة هو العامل الاقتصادي Economic pressure، نتيجة ارتفاع أسعار مدخلات الإنتاج الزراعي (الأسمدة، والبذار، والمبيدات)، بالإضافة إلى ارتفاع أسعار الوقود (المازوت) بشكلٍ مريع، الأمر الذ أدى إلى ارتفاع تكاليف الإنتاج الزراعي Production costs، الأمر الذي أثّر سلباً في العائد الاقتصادي للمزارع، ومن ثمّ مستوى معيشته. وتأكيداً لأهمية هذا النظام من الناحية الاقتصادية، فقد قالت زوجة أحد المزارعين (Barbara Francis) الذين طبقوا نظام الزراعة الحافظة من ولاية Ohio الأمريكية: إنّ الشيء الوحيد الذي حسنّ نوعية حياتي أكثر من الزراعة الحافظة، هو الكهرباء.

الشكل رقم (93): الآلات المستعملة في زراعة الأرض بشكلٍ مباشر (بدون فلاحة)، والتسميد بعملية زراعية واحدة.

لماذا الزراعة الحافظة؟ Why No–tillage

تُقدر مساحة الأراضي التي طبقت تقانة الزراعة الحافظة بنحو 125 مليون هكتاراً في العالم. يُساعد تطبيق نظام الزراعة الحافظة (بدون فلاحة No-tillage) بدلاً من نظام الفلاحات العميقة التقليدية السنوية في تقليل انجراف التربة المائي، وتحسين نوعية التربة Soil quality واحتجاز الكربون في التربة Carbon sequestration، والحد تبعاً لذلك من استفحال ظاهرة الاحتباس الحراري العالمي Global warming effect (Lal et al., 2003).

الأسباب الموجبة لتبني نظام الزراعة الحافظة من قبل المزارعين؟

1- تتطلب عملاً أقل Less work.
2- تعطي عوائد مادية أكبر More money.
3- مكافحة الانجرافين المائي والريحي Erosion control.
4- تقانة صديقة للبيئة Environmentally friendly.
5- تحسين نوعية الأرض، ومستوى المعيشة Better quality of soil and life .

وإذا ما قارنا الممارسات الزراعية القديمة مع الحديثة نلاحظ ما يأتي:

الزراعة التقليدية	**الزراعة الحافظة**
الفلاحة ضرورية لإنتاج المحصول.	إنتاج المحاصيل لا يتطلب فلاحة الأرض أبداً.
تدفن بقايا المحصول السابق بواسطة آلات الفلاحة.	تبقى بقايا المحصول السابق على سطح الأرض كغطاء نباتي.
تبقى الأرض جرداء Bare لعدة أسابيع وحتى شهر.	الأرض مغطاة بشكلٍ دائم بالبقايا النباتية.
عادةً ما ترتفع حرارة التربة بسبب تعرضها بشكلٍ مباشر للشمس.	درجة حرارة الأرض أقل بسبب تغطيتها ببقايا المحصول.
يسمح نظام الزراعة القديم بحرق بقايا المحصول السابق لتسهيل عمليات تحضير الأرض للمحصول اللاحق.	لا يسمح نظام الزراعة الحديث بتاتاً بحرق البقايا النباتية.
تركز بشكلٍ أكبر على العمليات الكيميائية في التربة.	تركز بشكلٍ قوي على العمليات الحيوية في التربة.
تعد المكافحة الكيميائية للآفات Chemical pest control بمنزلة الخيار الأول.	تعد المكافحة البيولوجية للآفات Biological pest control بمنزلة الخيار الأول.
زراعة محاصيل التغطية كسماد أخضر، وإتباع الدورة الزراعية أمر اختياري Optional.	زراعة محاصيل التغطية كسماد أخضر وإتباع الدورة الزراعية أمر إجباري Compulsory.
يعد انجراف التربة ظاهرة مقبولة لأنها عملية لا يمكن تجنبها مرتبطة بزراعة المناطق المنحدرة Sloping lands، وعادةً ما يحدث الانجراف بسبب هطول الأمطار الغزيرة.	يشير انجراف التربة إن وجد إلى عدم ملاءمة نظام الزراعة، والطرق الزراعية المعتمدة في تلك النظم البيئية. ويحدث الانجراف بسبب سوء إدارة الأرض.

مساوئ فلاحة الأرض وتجريدها من بقايا المحصول Bad consequences of soil tillage

1- ازدياد حساسية الترب الزراعية للانجرافين الريحي والمائي.
2- قلة رشح الماء إلى باطن التربة، وزيادة الفاقد بالجريان السطحي، وتراجع محتوى التربة المائي.
3- تراجع محتوى التربة من المادة العضوية، وتدهور نوعية التربة وخصوبتها.

4- استفحال ظاهرة الاحتباس الحراري Global warming، نتيجة أكسدة المادة العضوية، وانبعاث غاز الفحم (CO_2) إلى الغلاف الجوي.
5- عادةً ما تتدهور على المدى البعيد خصائص التربة الفيزيائية، والكيميائية، والحيوية.
6- انخفاض إنتاجية الأنواع النباتية المزروعة، وتباين الإنتاجية عبر المواسم.
7- استعمال الأسمدة الكيميائية بكمياتٍ كبيرة، ما يزيد من تكاليف الإنتاج.
8- إنّ بقاء المزارعين وعائلاتهم في المزرعة مهدد باستمرار، بسبب تردي الإنتاجية وهامش الربح، وعدم كفاية الدخل Insufficient monetary income.
9- تتسم نظم الإنتاج الزراعي التقليدية بالفاقة والعوز، واستفحال مظاهر هجرة الشباب إلى المدينة، وازدياد أعداد بيوت الصفيح Slums، ونسبة الجريمة، والاضطرابات الاجتماعية في المدينة بسبب ازدياد نسبة التجمعات السكانية الهامشية Marginal populations.

منافع الزراعة الحافظة Benefits of conservation tillage

1- تقليل الحاجة للعمالة Reduced labor requirements.
2- توفير الوقت Time savings.
3- تقليل الحاجة إلى الآلات الزراعية Reduced machinery wear.
4- تقليل استهلاك الوقود Fuel savings.
5- تحسين الإنتاجية على المدى البعيد Improved long-term productivity.
6- تحسين نوعية المياه السطحية Improved surface water quality.
7- الحد من انجراف التربة Reduced soil erosion.
8- زيادة محتوى التربة المائي Greater soil moisture retention.
9- تحسين نفاذية المياه Improved water infiltration.
10- منع انضغاط التربة Decreased soil compaction.
11- تحسين عمق قطاع التربة Improved soil tilth.
12- تحسين كمية ونشاط الكائنات الحية في التربة Soil biological activity.
13- الحد من انطلاق غازات الكربون Reduced release of carbon gases.
14- تقليل تلوث الهواء Reduced air pollution.

قوانين المحافظة على إنتاجية الأرض والمحصول:

يوجد في الطبيعة العديد من القوانين التي تؤدي مراعاتها واحترامها إلى تحسين إنتاجية الأنواع النباتية، ونوعية الأرض. ويؤدي تجاهلها إلى تشجيع تدهور التربة، وتدني إنتاجيتها، ما يؤثر سلباً في الإنتاج النباتي، والحيواني Livestock. وأهمها:

1- إنّ أي نظام زراعي (نباتي أو حيواني) يمكن أن يُسهم بشكلٍ مستمر في تراجع محتوى التربة من المادة العضوية Soil organic matter content، وعادةً ما يتنافى مع مفهوم التنمية الزراعية المستدامة Sustainability، ويتمخض عنه ترب فقيرة، ومزارعون فقراء.

2- تؤدي الفلاحات المتكررة والمكثفة Intensive and repeated tillage، ولاسيما في المناطق الرطبة وذات الحرارة المرتفعة (المدارية وشبه المدارية) إلى تحول المادة العضوية وبشكلٍ سريع إلى عناصر معدنية مغذية Mineralization، ويصبح معدل فقد المادة العضوية أكبر من معدل إضافتها، ما يؤدي إلى تراجع سريع في محتوى التربة من المادة العضوية، وتراجع إنتاجية الأنواع النباتية المزروعة على المدى البعيد.

3- يؤدي ارتفاع معدلات الهطولات المطرية، وازدياد غزارتها، وسرعة الرياح المترافقة مع اعتماد نظام الفلاحة التقليدية إلى ارتفاع معدلات فقد التربة، بسبب الانجرافين المائي والريحي Wind and water erosions، ويكون عادةً معدل فقد التربة أكبر من معدل التشكل الطبيعي لها Natural soil regeneration، ما يؤدي إلى فقد العناصر المعدنية المغذية Nutrients، والمادة العضوية، ومن ثمّ تراجع إنتاجية الأنواع النباتية.

4- يؤدي أيضاً نظام الفلاحة التقليدية إلى تدهور قوام التربة Soil structure، وارتفاع درجة حرارة منطقة نمو الجذور، وتراجعاً في تعداد الكائنات الحية الحيوانية والنباتية في التربة وتنوعها Soil flora and fauna، ما يؤثر سلباً في العمليات الأرضية الحيوية، ويسبب أيضاً ازدياداً في معدل فقد الماء بالتبخر Evaporation، ما يؤثر سلباً في محتوى التربة المائي، ومن ثمّ إنتاجية الأنواع النباتية المزروعة.

5- إنّ أي نظام إنتاج زراعي تحدث فيه فواقد مهمة في العناصر المعدنية المغذية من خلال الاستخلاص من قبل جذور النباتات دون التعويض المكافئ، ما يؤدي إلى استنزاف التربة، أو من خلال التطاير Volatilization نتيجة أعمال الحرق المتكررة، أو عن

طريق الغسيل والرشح العميق Leaching، ولاسيما خلال فترات التبوير Fallow periods، ما يؤدي إلى تراجع خصوبة التربة Soil fertility وإفقار المزارعين.

6- تؤدي عمليات الفلاحة المكثفة والمتكررة للتربة إلى فقد الكربون منها على هيئة CO_2 إلى الغلاف الجوي، ما يؤدي إلى ارتفاع تركيز CO_2 أحد أهم الملوثات الجوية، مؤدياً إلى ارتفاع درجة حرارة الجو، واستفحال ظاهرة الاحتباس الحراري Greenhouse effect. ويؤثر أيضاً فقد الكربون من التربة في تدهور خصوبتها.
عموماً، حتى نتمكن من المحافظة على خصوبة التربة وتحسينها، ومن ثمّ تحقيق التنمية الزراعية المستدامة، فيجب أن نوقف عمليات تحضير التربة الآلية Mechanical soil preparation، وأن تترك التربة محمية بشكلٍ دائم بالغطاء النباتي Permanent cover of soil. ويمكن في الوقت نفسه إضافة كميات كافية من البقايا النباتية Plant residues إلى سطح التربة (أكثر من 6 طن/ هكتار/سنة في المناطق شبه الجافة، وأكثر من 10 طن/ هكتار/سنة في البيئات الرطبة).

إذاً، يُعد نظام الزراعة الحافظة (بدون فلاحة)، وترك بقايا المحصول، واتباع الدورة الزراعية المناسبة Crop rotation من أهم مقومات نظام الإنتاج الزراعي المستدام.

تأثيرات انجراف التربة الناجم عن نظام الفلاحة التقليدي:

1- ارتفاع مستوى الترسبات الطميه Sedimentation في الأنهار، والخزانات، والبحيرات، وأماكن تجميع المياه الصغيرة Micro catchments، الأمر الذي يؤثر سلباً في كفاءتها التخزينية.

2- انخفاض نوعية المياه، الأمر الذي يتطلب تكاليف إضافية لتنقيتها ومعالجتها.

3- حدوث مشاكل في محطات توليد الطاقة الكهربائية التي تعمل بقوة المياه Hydroelectric power plants.

4- تغطية الطرقات العامة بنواتج انجراف التربة.

5- تدهور الإنتاج الوطني، بسبب خروج نسبة كبيرة من الأراضي الزراعية من نطاق الاستثمار الزراعي بسبب الانجراف، ما يجعل الاستخدام المستدام للأرض غير ممكن بسبب استنزاف مصادر التربة.

انعكاسات الحد من انجراف التربة نتيجة تطبيق نظام الزراعة الحافظة:

1- الحد وبشكلٍ كبير من تشكل الترسبات الطميه في الأنهار، وخزانات المياه، والبحيرات وأماكن حصاد المياه، ما يحافظ على كفاءتها التخزينية.

2- تحسّن نوعية المياه Better water qaulity.

3- لا توجد تغطية للطرقات العامة بنواتج انجراف التربة.

5- تحسن الإنتاج والاقتصاد الوطني بسبب زيادة الإنتاج، وتحسن نوعية الأرض واستدامتها، ما يسمح بالاستخدام المستدام للأرض، بسبب الاستعمال المقنن، والمنظم والمتوازن للأرض.

الزراعة الحافظة والتنمية المستدامة Conservation Agriculture and Sustainability

تُعد الأرض أحد أهم العوامل الرئيسة المرتبطة بتحقيق التنمية المستدامة في النظم البيئية الزراعية، لأنّها المهد الذي تُزرع فيه الأنواع النباتية التي تقدم الغذاء والكساء للإنسان والعلف للحيوان، لذلك لا بدّ من بذل المزيد من الجهود لتقليل انجراف التربة والمحافظة على خصوبتها، وإنتاجيتها.

تُعرف الزراعة المستدامة بأنّها التأسيس لإنتاج اقتصادي، وعالٍ، ومستمر للأرض والمحصول، من خلال الحد من ضرر الأرض والبيئة، وتحسين نوعية الحياة. وإنّ الاستنزاف السريع لخصوبة التربة بسبب الفلاحات المتكررة والمكثفة، وعدم ترك البقايا النباتية، أو حتى جزء منها، وغياب الدورة الزراعية المناسبة، وخاصةً في الدول النامية تُعد بمنزلة السبب والنتيجة لظاهرة الفقر المستفحلة في تلك الدول. وتُعد التربة الزراعية من المصادر الطبيعية غير المتجددة Non-renewable source، وبما أنّ مساحة الأراضي الصالحة للزراعة محدودة، فغالباً ما يؤدي ترك سطح التربة عارياً وخالياً من البقايا النباتية إلى حدوث انجراف التربة الزراعية.

مشكلة تدهور التربة The problem of soil degradation

إنّ المشكلة الرئيسة للزراعة التقليدية هي الانخفاض المستمر في خصوبة التربة، ما يؤثر سلباً في استدامتها، وصلاحيتها للإنتاج الزراعي لفترةٍ زمنيةٍ أطول. ويعزى ذلك بشكلٍ رئيس إلى انجراف التربة، وفقد مادتها العضوية نتيجة عمليات الفلاحة المكثفة والمتكررة، التي تُبقي التربة عارية تماماً من الغطاء النباتي، وغير محمية من التعرض

المباشر لأشعة الشمس، أو تأثير الهطولات المطرية الغزيرة. وبالرغم من التقدم الكبير في علوم الوراثة، والتربة، والتسميد، ووقاية المزروعات وإدارة المحصول والأرض والمياه، فلا يزال هناك تدهور واضح ومستمر في إنتاجية الأنواع النباتية عبر الزمن. وتتنبأ منظمة الأغذية والزراعة أنّ مقدار الفقد في إنتاجية المحاصيل المزروعة بعلاً يمكن أن يصل إلى نحو 15% خلال عقدين من الزمن في أفريقية، وقرابة 19% في جنوب شرق آسيا (Kelly, 1983). ولا يعني تدهور التربة إمكانية خروجها فقط من الاستثمار الزراعي، ولكن ستكون هناك حاجة ملحة لزيادة كمية مدخلات الإنتاج الزراعي Inputs (الأسمدة، البذار، مياه الري، المبيدات، الوقود .... الخ)، وزيادة حجم الاستثمارات للمحافظة على إنتاجية الأنواع النباتية المزروعة فيها، الأمر الذي يزيد من كلفة الإنتاج، ويقلل صافي الربح Net economic return.

الانجراف Erosion

يُعد حدوث الانجراف أحد أهم العوامل المسببة لتدهور التربة. وعندما تكون الأراضي الزراعية على شكل منحدرات Slops، حيث يؤدي استعمال المحاريث القرصية Disc implements إلى عدم ترك البقايا النباتية فوق سطح التربة، فسوف يؤدي هطول الأمطار بغزارة إلى انجراف التربة. وتقدر كمية التربة المفقودة بسبب الانجراف المائي تحت نظم الزراعة التقليدية في أمريكا اللاتينية بنحو 10- 60 طن/ هكتار/ سنة (Steiner, 1996). وإذا ما قورنت كمية التربة المفقودة سنوياً مع كمية التربة المتشكلة، التي تُقدر بنحو 250 - 500 كغ/هكتار/سنة، يُلاحظ أنّ مقدار الفقد أكبر بكثير من إعادة التشكيل الطبيعي للتربة Natural soil regeneration، وهذا ما يجعل التنمية الزراعية أمراً مستحيلاً. وتشير الدراسات الحديثة بأنّ عملية الانجراف، عملية انتقائية Selective، حيث تنجرف جزيئات التربة الأكثر خصوبة، إذْ يحتوي الطمي المجروف Sediments على كمية من العناصر المعدنية المغذية أكثر بكثير من الترب المتشكلة حديثاً من الصخرة الأم (Stocking, 1988). وعادةً ما تنجرف أيضاً الأسمدة المضافة، والمبيدات، وحتى البذور إلى الجداول، والأنهار والبحيرات، والبحار، ما يؤثر سلباً في خصوبة التربة، ويزيد من تكاليف الإنتاج، ويؤدي إلى تلوث المياه الجوفية.

المادة العضوية Organic matter

يُعد محتوى التربة من المادة العضوية من أهم العوامل المحددة لنوعية التربة، بسبب تأثيرها في خصائص التربة الفيزيائية، والكيميائية، والحيوية Cannel and Hawes, (1994). وعندما تكون كفاءة التبادل الأيوني Cation Exchange Capacity (CEC) للتربة منخفضة جداً، فتؤدي المادة العضوية دوراً غاية في الأهمية في الاحتفاظ

بالعناصر المعدنية المغذية وخاصةً في المناطق المدارية Tropics بالمقارنة مع المناطق المعتدلة Temperate zones. وستنخفض تبعاً لذلك كفاءة تحويل المادة العضوية إلى عناصر معدنية Mineralization efficiency بشكلٍ كبير إذا لم تضف المادة العضوية بشكلٍ مستمر إلى التربة. وإنّ معدل معدنة Mineralization المادة العضوية في ترب المناطق المدارية أسرع بنحو خمس مرات بالمقارنة مع ترب البيئات المعتدلة، وتسرع عمليات الحراثة من تحول المادة العضوية المخزونة في التربة إلى عناصر معدنية مغذية، ما يؤدي إلى تحرير الآزوت الذي يمكن أن يمتص من قبل جذور النباتات، ما قد يؤدي خلال السنوات الأولى من استثمار الأرض إلى زيادة إنتاجية الأنواع النباتية المزروعة. ولكن عندما تفلح التربة، وتكون ظروف التربة البيئية مناسبة لزيادة معدل تحلل المادة العضوية (حرارة مرتفعة، ورطوبة عالية، وتهوية جيدة)، وفي حال تبوير التربة وغياب الغطاء النباتي، فإنّ مخزون التربة من الآزوت المعدني (NO_3^-) يمكن أن يفقد بالغسل العميق إلى أغوار التربة، ويصبح غير متاح للنبات. وحالما تستهلك، وتستنفد المادة العضوية، فسوف يتوقف تحرير الآزوت، وتتردى إنتاجية الأنواع المحصولية المزروعة. وتُعد التربة مستنفذة عندما تفتقر للمكون الذي لا غنى عنه (المادة العضوية). ولوحظ عندما أضيفت كمية من السماد العضوي Manure تقدر بنحو 22 طن/هكتار/سنة خلال الفترة من عام 1930 إلى 1980، فقد حصلت زيادة طفيفة جداً في محتوى التربة من المادة العضوية قدرت بنحو 1.9% إلى 2.1%، وذلك في بعض الترب في شمال شرق الولايات المتحدة الأمريكية (مناخ معتدل). يبين هذا المثال صعوبة زيادة محتوى التربة من المادة العضوية المفقودة منها بعمليات الفلاحة المتكررة.

تأثير الزراعة الحافظة No-tillage في خصائص التربة المختلفة

توجد أدلة علمية كافية من المناطق الأكثر دفئاً في العالم تبين أنّ الزراعة الحافظة (بدون فلاحة) كان لها تأثيرات إيجابية في خصائص التربة الفيزيائية، والكيميائية والحيوية بالمقارنة مع الزراعة التقليدية (Kachhan, 1996)، وذلك بسبب انحسار انجراف التربة بشكلٍ كبير، والمحافظة على، أو زيادة محتوى التربة من المادة العضوية، بالإضافة إلى دور الغطاء النباتي في الحد من ارتفاع درجة حرارة التربة.

تأثير الزراعة الحافظة في خصائص التربة الكيميائية: سجلت تحت ظروف الزراعة الحافظة بالمقارنة مع الزراعة التقليدية قيم أعلى من محتوى التربة من المادة العضوية، والآزوت، والفوسفور، والبوتاسيوم، والكالسيوم، والمغنزيوم، وقيم أعلى من درجة الحموضة (pH)، والقدرة على التبادل الأيوني، ولكن تراجع محتوى الترب من الألمنيوم (Sidiras and Paran, 1985; Crovetto, 1996).

تأثير الزراعة الحافظة في خصائص التربة الفيزيائية: يُؤدي تطبيق نظام الزراعة الحافظة إلى زيادة معدلات رشح المياه Water infiltration، ما يؤدي إلى الحد وبشكلٍ كبير من فقد المياه بالجريان السطحي وانجراف التربة (Roth, 1985). ويؤدي إلى زيادة محتوى التربة المائي ودرجة حرارة التربة، والمحافظة على ثبات الكتل الترابية Aggregate stability (Derpsch et al., 1988). وتزيد أيضاً من كثافة التربة Soil density. وتؤدي هذه الخصائص مجتمعة إلى زيادة غلة الأنواع المحصولية بشكلٍ معنوي بالمقارنة مع نظم الزراعة التقليدية.

تأثير الزراعة الحافظة في خصائص التربة الحيوية: يُؤدي عدم استعمال المحاريث إلى المحافظة على الأعشاش "Nests" والقنوات Channels التي بنتها الكائنات الحية الدقيقة، ما يؤدي إلى زيادة أعداد الكائنات الحية في التربة ونشاطها بالمقارنة مع نظام الفلاحة التقليدية. ويُساعد ترك البقايا النباتية فوق سطح التربة في نظام الزراعة الحافظة في تأمين الغذاء اللازم لحياة الكائنات الحية في التربة وتكاثرها Soil fauna. ويمكن القول: إنّ غطاء التربة (خصوبتها) مرتبط إلى حدٍ كبير بالنشاط الحيوي فيها، ويتحدد الأخير بكمية البقايا النباتية المتروكة فوق سطح التربة. وتُساعد أيضاً الزراعة الحافظة في زيادة محتوى التربة المائي، والمحافظة على درجة حرارة مناسبة في التربة، التي تُعد من أهم المتطلبات البيئية الأرضية اللازمة لتكاثر الكائنات الحية ونشاطها فيها. عموماً، واستناداً إلى كل الأسباب السابقة، فعادةً ما يكون عدد ديدان الأرض Earthworms، والكائنات الحية الدقيقة (الريزوبيوم Rhyzobia، والبكتريا وActinomicetes)، وأيضاً ازدياد الفطريات Fungi، والميكورايز Micorrhyza أكبر في الترب التي تعتمد على تقانة الزراعة الحافظة بالمقارنة مع الترب التي استمرت في تطبيق نظام الفلاحة التقليدية (Kemper and Derpsch, 1981). وعلى الرغم من حقيقة ازدياد معدل استعمال مبيدات الأعشاب، ولاسيما خلال السنوات الأولى من تطبيق تقانة الزراعة الحافظة إلاّ أن ذلك لا يؤثر سلباً في النشاط الحيوي للتربة.

نوعية المياه Water quality: تتحسن نوعية المياه عند تطبيق نظام الزراعة الحافظة. ونتيجة انجراف التربة فعادةً ما تكون المياه من مساقط المياه في الأراضي التي تعتمد على الزراعة التقليدية ذات لون بني وتحمل الكثير من الطمي، في حين أنّ مياه المساقط المائية في معظم الأراضي في البرازيل التي تحولت إلى نظام الزراعة الحافظة عادةً ما تكون نقية حتى خلال الفترات التي تكون فيها الهطولات المطرية غزيرة جداً.

الجوانب الصحية Sanitary aspects: لوحظ ازدياد في المسببات المرضية التي تُصيب نباتات المحاصيل في نظام الزراعة الحافظة. لذلك لا يُنصح بتطبيق نظام البذر المباشر (الزراعة الحافظة) في الزراعات المفردة/النقية Monoculture، أو المتكررة للمحصول نفسه (Reis et al., 1985). وبشكلٍ عام، عادةً ما يكون تطبيق الدورة الزراعية المتوازنة، وزراعة محاصيل التغطية كسمادٍ أخضر كافٍ للحد من التأثيرات السلبية التي يمكن أن تنشأ من ازدياد أعداد الآفات الزراعية (أمراض، وحشرات). وصحيح أنّ البقايا النباتية تشكل مهداً ملائماً لتكاثر الحشرات والعناكب، ولكنها تُساعد أيضاً في تطور العديد من الأعداء الحيوية لها، ما يخلق نوعاً من التوازن البيولوجي Biological equilibrium، يُساعد في تقليل الحاجة إلى مكافحة الآفات بالمبيدات الكيميائية.

تأثير الزراعة الحافظة في النواحي البيئية Environmental aspects: تُسرع عمليات تحضير التربة المكثفة من معدنة المادة العضوية، وتحول البقايا النباتية إلى غاز ثاني أوكسيد الكربون (CO_2)، الذي ينطلق إلى الغلاف الجوي ليسهم في ازدياد تركيز الملوثات الجوية، واستفحال تأثير غازات الصوب الزجاجية، ومن ثمّ ظاهرة الاحتباس الحراري. وبيّنت العديد من البحوث التي نُفذت في الولايات المتحدة الأمريكية بأنّ كربون التربة عادةً ما يفقد بشكلٍ سريع على شكل غاز الفحم (CO_2) خلال دقائق بعد فلاحة التربة بشكلٍ مكثف. وتتوقف كمية الكربون المفقودة على عدد مرات الفلاحة، وشدتها. وقد قدرت كمية الكربون الكلية المفقودة بعد 19 يوماً من حقول القمح المفلوحة بمقدار أكبر بنحو خمس مرات بالمقارنة مع الحقول غير المفلوحة. وفي الحقيقة، فقد تساوت كمية الكربون المفقودة من التربة مع كميته المضافة من بقايا المحصول المتروكة على سطح التربة من الموسم السابق (Reicosky, 1997). وتشير الدراسات أنّه خلال عام 1993 عندما كانت نسبة تبني تقانة الزراعة الحافظة فقط 27% في الولايات المتحدة الأمريكية، فإنّ كمية الكربون المفقودة من التربة إلى الغلاف الجوي قدرت بنحو 200 مليون طناً. وإذا ما وصلت نسبة تبني تقانة الزراعة الحافظة إلى نحو 75% فإنّ نسبة الكربون المفقود سوف تنخفض إلى النصف تقريباً، ويمكن أن تُسهم الزراعة بدون فلاحة في زيادة كمية الكربون المدخر في التربة Carbon deposits بنحو 400 مليون طن، ما يُساعد في تحسين خصوبة التربة (Kern and Johnson, 1993a).

عموماً، من يطلع على تطور انتشار نظام الزراعة الحافظة في العالم، يمكن أن يستنبط الملاحظات الآتية:

1. على الرغم من العديد من المحاولات قديماً لزراعة المحاصيل بدون فلاحة، إلاّ أن مفهوم الزراعة المباشرة بدون فلاحة No-tillage بدأ منذ عام 1940، وتمّ تبنيه من قبل المزارعين فقط خلال الستينيات 1960s.

2. طرحت أولاً الزراعة الحافظة كطريقة فعّالة في حفظ التربة Soil conservation، ثمّ تطورت كنظام إنتاج مستدام اقتصادي، فهي لا تُحسّن فقط خصائص التربة الفيزيائية، والكيميائية، والحيوية، ولكن تُحسّن أيضاً البيئة ككل من خلال تخفيض انبعاث غازات الصوب الزجاجية.

3. إن التطور التاريخي لزراعة المحاصيل بدون فلاحة والتطبيق الناجح لها في المزارع الممكننة قد ارتبط بشكلٍ كبير بالعوامل الآتية:

- توافر المعلومات المناسبة (نتائج البحوث، وخبرات المزارعين) تحت نظم زراعية، واجتماعية، واقتصادية مختلفة.

- توافر العديد من مبيدات الأعشاب الفعّالة ورخيصة الثمن.

- توافر الآلات المناسبة للزراعة الحافظة بأسعارٍ معقولة.

- تطبيق الدورات الزراعية المناسبة، بما في ذلك زراعة محاصيل التغطية الخضراء.

4. حدوث الانتشار الأعظم لنظام الزراعة المباشرة في الأمريكيتين، في حين كانت النسبة قليلة جداً في باقي دول العالم.

5. بالرغم من كثرة المعلومات المستقاة من البحوث في أفريقية، التي تبين منافع الزراعة بدون فلاحة، إلاّ أنّ مثل هذا النظام لم يطبق بشكلٍ كبير فيها.

7. يبين التطور التاريخي أنّ المزارعين والصناعة قد مارسوا تأثيراً كبيراً في انتشار نظام الإنتاج بالاعتماد على الزراعة المباشرة.

8. نفذت البحوث، والتطور، والانتشار لنظام الزراعة بدون فلاحة بشكلٍ أساسي في المزارع المتوسطة إلى الكبيرة الحجم الممكننة بشكلٍ كامل. وبدأت البحوث على مستوى

المزارع الصغيرة في البرازيل في عام 1982، ولم تنفذ على نطاق ضيق في الكثير من أجزاء العالم.

9. لا يزال تبني تقانة الزراعة بدون فلاحة في المزارع الصغيرة (التي لا تمتلك جرارات) محدود جداً على مستوى العالم. وكان التبني الأعلى في البرازيل بنحو 25 ألف هكتاراً، والبارغواي بنحو 4500 هكتاراً، وأمريكا الوسطى والمكسيك بأقل من 10 آلاف هكتاراً. وبينت التقارير أنّ هناك مساحة 10000 هكتار من الأرض تمارس فوقها الزراعة بدون فلاحة في المزارع الصغيرة في الهند، وبنغلاديش، ونيبال(Wall, 1998).

10. يُعد انخفاض تكاليف الإنتاج نتيجة تطبيق نظام الزراعة الحافظة بمنزلة القوة المحركة الرئيسة في زيادة معدلات تبني تطبيق هذه التقانة، حيث انخفضت تكاليف إنتاج محصول فول الصويا في الفدان نتيجة تطبيق نظام الزراعة بدون فلاحة بمقدار 27 دولاراً أمريكياً في الأرجنتين، وبمقدار 14.18 دولاراً أمريكياً في الولايات المتحدة الأمريكية، وبنحو 11.50 دولاراً أمريكياً في البرازيل. وحققت أيضاً انخفاضات مماثلة في تكاليف إنتاج محصول الذرة الصفراء (Hebblethewaite and Towery, 1997).

11. تشكل الزراعة بدون فلاحة أقل من 50% من نظام الزراعة الحافظة Conservation tillage في الولايات المتحدة الأمريكية، ولكنها الشكل الوحيد المطبق في أمريكا اللاتينية.

12. لابد أخيراً من القول: إنّ نظام الزراعة الحافظة ليس جرعة/موضة عصرية، أو توجهاً عابراً Transitory trend، ولكنها نظام زراعي أثبت جدواه وفعاليته في تحقيق التنمية الزراعية المستدامة.

عموماً، تتحدد إمكانية تطبيق نظام الزراعة الحافظة في منطقة ما بالمقدرة على إنتاج كتلة حية كبيرة، وتغطية سطح التربة على مدار السنة. وتتمثل العوامل البيئية التي يمكن أن تعيق انتشار تقانة البذر المباشر في معظم مناطق قارتي آسيا وأفريقية بالآتي:

1- انخفاض معدل الهطول المطري السنوي، وانخفاض إنتاج الكتلة الحية Biomass production.

2- قصر طول مواسم النمو Short growing seasons.

3- قابلية الأراضي الزراعية للانضغاط وتعرضها لخطر التغدق Waterlogging.

أما أهم المعيقات الاقتصادية والاجتماعية لانتشار نظام الزراعة الحافظة

1- الطلب الكبير على بقايا المحاصيل علفاً للحيوانات.

2- ضعف تطور البنية التحتية (الأسواق، المعاملات المالية Credit، وخدمات الإرشاد).

3- تفضيل الأسواق لمحصول واحد دون غيره (مثال، الذرة الصفراء في أفريقيا، والقمح في آسيا).

4- الحاجة الكبيرة لتطور إدارة المزرعة.

عموماً، في البيئات التي لا يمكن فيها تطبيق نظام الزراعة الحافظة (الزراعة بدون فلاحة) فإنّ الخيار الثاني الأفضل هو تطبيق نظام الزراعة المخففة Minimum tillage (GTZ, 1998). وتعزى أسباب الانتشار السريع لتقانة الزراعة بدون فلاحة No-tillage في دول أمريكا اللاتينية إلى ما يلي:

1- حدّت هذه التقانة بشكلٍ فعال واقتصادي من انجراف التربة تحت ظروف مناخية تُساعد بشكلٍ كبير على انجراف التربة وتدهورها.

2- توافر المعلومات المناسبة في المنطقة من خلال البحوث المنفذة، وتنامي خبرة المزارعين وتطورها.

3- انتشار استعمال محاصيل التغطية Cover crops لوقف نمو الأعشاب الضارة وتطورها، ما ساعد في تقليل معدلات استعمال مبيدات الأعشاب الضارة، وارتفاع محتوى التربة من المادة العضوية، والمكافحة الحيوية للآفات الزراعية.

4- إجماع كل قطاعات الدولة على أهمية تطبيق تقانة البذر المباشر، وإبراز التبعات الايجابية الناتجة عنها، ولم يكن هناك أي تعارض في وجهات النظر حتى بين القطاع العام والخاص (الدعم الحكومي).

5- كانت الزراعة الحافظة الوحيدة التي نصح بها المزارعون.

6- كان هناك توعية إرشادية كبيرة بين المزارعين أنفسهم حول فوائد تطبيق هذه التقانة من خلال الجمعيات الفلاحية Farmers associations.

7- توافر المنشورات التي تحتوي على معلومات تطبيقية ونظرية كافية بمتناول يد المزارعين، والمرشدين الزراعيين.

8- تنفيذ العديد من الدراسات الاقتصادية، التي بيّنت وجود عوائد اقتصادية مهمة جرّاء تطبيق هذه التقانة، واستعمال محاصيل التغطية الخضراء، واتباع الدورة الزراعية المناسبة عند تطبيق تقانة البذر المباشر.

9- لم يكن هناك قوة متنفذة تعارض هذا النظام.

العوامل المعيقة لإمكانية تبني تقانة البذر المباشر وسبل التغلب عليها

1. الآلات الزراعية المناسبة والكافية: لابد من تطوير البذارات المناسبة، التي يمكن أن تزرع كل من البذور الكبيرة (الزراعة على خطوط) (عباد الشمس، والذرة الصفراء، والذرة البيضاء، والحمص،... الخ)، ومحاصيل الحبوب الصغيرة الشتوية (الزراعة على سطور) (القمح، الشعير،...الخ)، حتى لا يضطر المزارع إلى شراء بذارتين، ما يشكل عبئاً مادياً كبيراً عليه ولاسيما بالنسبة إلى المزارع المتوسطة إلى الصغيرة المساحة. وتُساعد مثل هذه البذارات ثنائية الغرض في تطبيق الدورات الزراعية وزراعة محاصيل التغطية الخضراء خلال فصل الشتاء / الصيف، حيث يؤدي ترك الأرض مبورة إلى انتشار الأعشاب الضارة بشكلٍ كبير، ما يزيد من تكاليف التخلص من هذه الأعشاب.

2. توافر مبيدات الأعشاب الضارة Adequate herbicides: عادةً ما تكون السنوات الأولى من تبني تقانة البذر المباشر صعبة، بسبب انتشار الأعشاب الضارة بشكلٍ كبير، ويزداد الأمر صعوبة في حال عدم توافر مبيدات الأعشاب الضارة المناسبة والمعلومات الخاصة بالتعرف عليها، وسبل مكافحتها. فعل سبيل المثال، خلال السنوات الأولى من تطبيق تقانة البذر المباشر في أمريكا الجنوبية South America في عام 1970 فقد واجه المزارعون صعوباتٍ جمة بسبب وجود فقط آنذاك نوعين من مبيدات الأعشاب الضارة، هما Paraquat و 2,4 -D. وساعدت عمليات العزق الآلي Hand hoeing آنذاك في إنقاذ الكثير من المحاصيل من الفشل. ولكن في الثمانيات ازدادت بشكلٍ كبير الأنواع المتاحة من مبيدات الأعشاب، وترافق ذلك مع نشر كتاب كامل يضم صوراً لجميع الأعشاب الضارة المرافقة للمحاصيل المزروعة في تلك المناطق وبكل مراحلها،

وتعليمات استعمال المبيدات، وفي أي مرحلة من حياة النبات، وطريقة الرش. كل ذلك ساعد المزارعين من الخروج من عنق الزجاجة فيما يتعلق بمقاومة ومكافحة الأعشاب الضارة (Radrigues and Almeida, 1998; Lorenzi, 1994).

3. تغيير العقلية Mental change: يتوجب على المزارع أن يغير أولاً تفكيره قبل أن يفكر في تغيير بذارته. ويتوجب أولاً على المزارعين، والفنيين، والباحثين، والعاملين في مجال الإرشاد الزراعي تغيير نظرتهم في الزراعة الحافظة والابتعاد عن نظام فلاحة الأرض الهدام للتربة والاقتراب من حيث الفكر والممارسة من نظام الإنتاج الزراعي المستدام المتمثل بتطبيق نظام الزراعة بدون فلاحة. وسيكون من الصعب تحقيق أي نجاح من تطبيق تقانة البذر المباشر طالما أنّ عقول العاملين في ميدان الزراعة لا تزال تقليدية. ويختلف نظام الزراعة الحافظة (بدون فلاحة) تماماً عن الزراعة التقليدية، لدرجة أنّ من يود تبني مفهوم الزراعة المباشر فعلية أن ينسى أو يضع جانباً كل ما تعلمه مسبقاً عن نظام الزراعة التقليدية، ويكون مهيئاً لتعلم كل ما هو جديد في النظام الزراعي الجديد.

4. المعرفة Knowledge: يتمثل التحدي الكبير الذي سيواجه المزارعين عند الانتقال من نظام الزراعة التقليدية إلى الزراعة بدون فلاحة في كيفية مكافحة الأعشاب الضارة Weed control. ولكي يتمكنوا من التعامل مع هذه الحالة الجديدة فعليهم أن يمتلكوا المعرفة الكاملة، ولاسيما عن مبيدات الأعشاب، والأعشاب الضارة، وطرق التعرف على الأعشاب ومكافحتها.

أ- **مبيدات الأعشاب الضارة Herbicides:** لابد من توافر كتب شاملة تصف كل مبيدات الأعشاب الضارة المتاحة في السوق وخصائصها الكيميائية، والسمية Toxicological، والكمية الواجب استعمالها في الهكتار الواحد، وقائمة بأسماء الأعشاب الفعالة ضدها. وتمثل هذه المعلومات ضرورة لا يستطيع من دونها المزارعون أو الفنيون، أو المرشدون الزراعيون، وحتى الباحثين تحقيق نجاح وتقدم في مجال الزراعة الحافظة.

ب- **الأعشاب الضارة Weeds:** لابد من وجود كتيب يضم صور الأعشاب الضارة المنتشرة في المنطقة بكل مراحل حياتها للتعرف عليها بسهولة. ويبين أيضاً مبيد الأعشاب الأكثر فاعلية لمكافحتها.

ت- **تقانـة استخدام مبيدات الأعشاب Herbicide application technology:**
تشكل عملية رش مبيدات الأعشاب مهمة صعبة بالنسبة إلى المزارع، حيث تتطلب تحديد حجم المياه للهكتار الواحد، وضغط الرش، ومقدار تدفق المبيد، وسرعة الجرار وسعة الخزان، وكمية المبيدات الواجب إضافتها للحصول على المعدل المنصوح به من المادة الفعالة في وحدة المساحة من الأرض. وما لم يزود المزارع بمعلومات بسيطة وواضحة حول طريقة رش المبيدات، ومعايرة المرشات، فسيؤدي ذلك إلى سوء كفاءة عملية مكافحة الأعشاب الضارة وضعفها، حتى لو استخدمت أفضل مبيدات الأعشاب الضارة وأكثرها فاعلية.

النقاط الواجب مراعاتها قبل البدء بتطبيق نظام الزراعة الحافظة:

1. التربة Soil: يتوجب قبل الشروع في تبني تطبيق تقانة البذر المباشر إجراء تحليل كيميائي للتربة، وتحديد درجة حموضتها، ومعرفة هل هي حامضية Acidic أم قلوية Alkaline. فإذا كانت التربة حامضية فينصح المزارع بإضافة الكلس Lime قبل تطبيق تقانة البذر المباشر لأنّها قد تكون الفرصة الأخيرة لقلب الكلس في التربة. والوقوف على إمكانية تشكل القشرة السطحية الصلبة Soil crusting. بشكلٍ عام، لا تُعد القشرة السطحية القاسية مشكلة حقيقية في نظام الزراعة بدون فلاحة. لأنّ الغطاء النباتي يجنب التأثير المباشر لقطرات المطر في سطح التربة، وبالتالي لا تتشكل القشرة السطحية. وبشكلٍ عام، فإنّ الترب سيئة الصرف Badly drained soils غير مناسبة لنظام الزراعة المباشرة. والتحقق من مدى وعورة سطح التربة Soil surface roughness. وإنّ آلات البذر المباشر لا تعمل بشكلٍ جيد إذا لم تكن الأرض مسواة أو ممهدة Leveled بشكلٍ مناسب. حيث يعمد المزارعون عادةً في نظام الزراعة التقليدية إلى مكافحة الأعشاب الضارة من خلال إجراء فلاحة سطحية للتربة، بعد ريها ودفع بذور الأعشاب الضارة على الإنبات. ولكن يسبب ذلك وعورة سطح التربة، والذي يجب أن يمهد ويسوى بشكلٍ جيد قبل تطبيق الزراعة المباشرة لتجنب المشاكل أثناء عملية البذر Seeding، وسوء الإنبات وعدم تجانسه. والتأكد من قابلية انضغاط التربة Soil compaction. إنّ انضغاط التربة الناتج عن عمليات الفلاحة المتكررة في نظام الفلاحة التقليدية، مثل تشكل الطبقة الصماء الناتجة عن استعمال المحاريث القلابة، Plow pans أو المحاريث القرصية الثقيلة Heavy disc harrow pans يجب أن يزال قبل تطبيق نظام الزراعة

المباشرة. عموماً، يمكن كسر الطبقة الصماء إن وجدت باستخدام المحاريث الخاصة بنقب التربة مثل، Chisel plow.

2. الغطاء النباتي Mulch cover: تُعد عملية تغطية سطح التربة بشكلٍ دائم بطبقةٍ سميكة من البقايا النباتية عاملاً أساسياً لنجاح نظام الزراعة المباشرة. وإنّ المزارعين الذين لا يفهمون أهمية ترك البقايا النباتية فوق سطح التربة، فهم لم يستوعبوا بعد نظام الزراعة الحافظة. وتشير معظم البحوث التي نفذت في دول أمريكا اللاتينية إلى ضرورة ترك على الأقل من 6 - 10 طناً من المادة الجافة من محاصيل التغطية الخضراء في الهكتار الواحد في السنة. يُساعد ذلك في تثبيط نمو الأعشاب الضارة، ويُساعد الغطاء النباتي الكثيف في المحافظة على محتوى التربة المائي بسبب تقليل مساحة سطح التربة المعرّض بشكلٍ مباشر لأشعة الشمس، ما يحول دون فقد الماء بالتبخر، ويحول أيضاً دون ارتفاع درجة حرارة التربة بشكلٍ كبير، بالإضافة إلى تحسين خصائص التربة الفيزيائية، والكيميائية، والحيوية، ومن ثم خصوبة التربة. وبشكلٍ عام، يجب أن تكون البقايا النباتية موزعة بشكلٍ متجانس فوق سطح التربة، لذلك يجب أن تكون آلات الحصاد مصممة لنثر البقايا النباتية بشكلٍ متجانس Evenly distributed فوق كامل عرض خط القطع Cutting width. ولكن للأسف نادراً ما يأخذ مصنعوا الحصادات هذه النقطة بعين الاعتبار، وعادةً ما تتركز البقايا النباتية بكمياتٍ كبيرة في المنتصف، في حين توجد كميات قليلة جداً عند الأطراف. وعادةً ما يؤثر ذلك سلباً في أداء مبيدات الأعشاب، وآلات البذر، ولكن لا تظهر هذه المشكلة تحت ظروف الزراعة المطرية.

الخطوات الأساسية لتبني نظام الزراعة الحافظة Steps in no- tillage adoption

يجب على المزارع ألاّ يسارع إلى شراء آلة البذر المباشر، أو يستعيرها من جاره بمجرد السماع عن جدوى، وأهمية هذا النظام الزراعي. ولكن عليه أولاً أن يُلِمْ وبشكلٍ جيد بكل مكونات هذا النظام قبل أن يشتري البذارة. وهناك بعض العوامل المهمة جداً التي يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار قبل البدء بتطبيق نظام الزراعة المباشرة أهمها:

1- يجب على جميع العاملين في مجال تبني تطبيق الزراعة الحافظة أن يطوروا معلوماتهم حول كل ما يتعلق بهذه التقانة، ولاسيما مكافحة الأعشاب الضارة.

2-يجب على المزارع أن يقوم أولاً بتحليل تربته، ويضيف الكلس Lime إذا كانت حامضية، ويزيل نقص العناصر، ويصحح التوازن المعدني.

3-يجب على المزارع أن يتجنب تطبيق تقانة البذر المباشر في الترب سيئة الصرف (الترب الطينية الثقيلة جداً).

4-يجب على المزارع أن يقوم بتسوية سطح التربة إذا كان وعراً لأي سبب.

5-يجب على المزارع أن يزيل انضغاط التربة باستعمال المحاريث النقّابة .

6-يجب إنتاج أكبر كمية ممكنة من الغطاء النباتي.

7-يجب على المزارع أن يشتري آلة البذر المباشر.

8-يجب على المزارع أن يبدأ بتطبيق تقانة البذر المباشر على مساحة 10% فقط من أرضه ليكتسب الخبرة اللازمة.

9-يجب على المزارع أن يطبق الدورة الزراعية المناسبة، وأن تتضمن زراعة المحاصيل البقولية الغذائية والعلفية لجني كامل المنافع من تطبيق هذا النظام.

10-يجب أن يكون المزارع مهيئاً بشكلٍ دائم للتعلم، وتطوير معلوماته بكل ما هو جديد حول تقانة البذر المباشر.

11-يجب ألاّ نكون سلبيين تجاه التقانة، ونعتقد أنّها لن تنجح " It does not work "، لأنّ ذلك سوف لن يُساعد في حل المشكلة / المشاكل المرتبطة بتطبيق تقانة البذر المباشرNo- tillage. وإذا ما اقتنعنا بأنّ نظام البذر المباشر هو نظام الإنتاج الزراعي المستدام الحقيقي، والمثبت في الزراعة التكثيفية Extensive agriculture، عندئذ سيكون لدينا الحافز الحقيقي لإيجاد الحلول المناسبة. ويجب ألاّ يكترث المزارع بمسألة انخفاض الغلة نتيجة تطبيق الزراعة الحافظة طالما أنُه يحصل على أرباح أعلى، أو طالما أن قيمة الإنتاج أكبر بكثير من كلفته بالمقارنة مع هامش الربح في الزراعة التقليدية، وان كان الإنتاج الكلي أعلى.

تـأثير نظـم الفلاحـة و الـدورات الزراعيـة فـي محتـوى التربـة مـن الآزوت والكربـون العضويين

يؤدي كل من كربون وآزوت التربة العضويين (SOC) and (SON) دوراً مهماً في المحافظة على نوعية التربة Soil quality، وتحسين إنتاج الأنواع المحصولية المزروعة، وحماية البيئة (Bauer and Black, 1994; Doran and Parkin, 1994)، حيث تؤدي زيادة محتوى التربة من الآزوت والكربون إلى تحسين قدرة التربة على الاحتفاظ بالماء Water retention capacity، وتهوية التربة Soil aeration، ودورة العناصر المغذية Nutrient cycling، ونمو جذور النباتات (Sainjn and Kalisz, 1990; Sainjn and Goat, 1993). ويمكن أن تُسهم عمليات فقد الآزوت والكربون من التربة إلى الغلاف الجوي على هيئة غازات في زيادة ظاهرة الاحتباس الحراري (Reicosky, 1997a,b). ويمكن أن تكون أيضا التربة مصباً طبيعياً Natural sink من خلال احتجاز غاز الفحم الجوي (CO_2) من خلال عمليات الإدارة المناسبة للأرض والمحصول، مقللةً بذلك من تركيز غاز الفحم الجوي (Lal et al., 1995). وبيّنت العديد من الدراسات إمكانية زيادة مخزون التربة من الآزوت والكربون العضويين (SOC, SON) من خلال تطبيق بعض الممارسات الزراعية الحافظة المتعلقة بالأرض والمحصول على المدى البعيد (أكثر من عشر سنوات)، مثل اعتماد نظام الزراعة الحافظة، والدورات الزراعية (Robinson et al., 1996). وبشكلٍ معاكس، فإنّ الفلاحة المكثفة يمكن أن تقلل مخزون التربة من الآزوت والكربون العضويين، لأنها تدفن/ تخلط Incorporates بقايا المحصول في التربة، وتقلل من تماسك التربة disrupts soil aggregate، وتزيد من تهويتها (Balesdent et al., 1990; Combardella and Elliott, 1993). على كل حال، فإنّ تأثيرات عمليات إدارة الأرض والمحصول القصيرة الأجل (< 10سنوات) في التبدلات الحاصلة في محتوى التربة من الكربون والآزوت عادةً ما تكون معقدة ومتباينة. وبعد تحليل مجموعة كبيرة جداً من البيانات على مستوى العالم، استنتج الباحثان (Post and West , 2002) ازدياد الكربون المحتجز في التربة نتيجة تطبيق الزراعة بدون فلاحة No-tillage (NT)، ولكن لم تحدث مثل هذه الاستجابة قبل 5-10 سنوات على تطبيق تقانة الزراعة بدون فلاحة. وتتفق هذه النتائج مع النتائج المذكورة من قبل (Franzluebbers and Arshad 1996) مفادها أنه يمكن تحقيق زيادة قليلة جداً وأحياناً غير قابلة للقياس Not detectableفي محتوى التربة من الكربون خلال الفترة الأولى من تطبيق تقانة الزراعة

بدون فلاحة (2-5 سنوات) ولكن تمّ تحقيق زيادة ملحوظة وكبيرة بعد انقضاء 5-10 سنوات على التحول من نظام الزراعة التقليدية إلى الزراعة الحافظة.

تعتمد تأثيرات الممارسات الزراعية، وعمليات إدارة الأرض والمحصول على التبدلات التي يمكن أن تطرأ على محتوى التربة من الكربون والآزوت بشكلٍ جزئي على خصائص التربة، والعوامل البيئية السائدة، مثل بناء التربة، وطبوغرافية الأرض Topography، والمناخ، لذلك تُساعد عملية فهم تأثيرات الممارسات الزراعية في محتوى التربة من الكربون (SOC)، والآزوت (SON) للترب الرئيسة في منطقة إنتاج ذات طبقات بيئية محددة، في تحديد أفضل الممارسات الزراعية لتحسين محتوى التربة من هذين المكونين المهمين في تحديد نوعية التربة. ويمكن أن تؤدي نظم الفلاحة، وطرائق إدارة بقايا المحصول دوراً مهماً في تعويض الآزوت والكربون في التربة، و لكن عادةً ما تحتوي المواد النباتية على تنوع كبير من المركبات الآزوتية و الكربونية C and N compounds، التي لها معدلات تحلل مختلفة تتأثر بالعديد من عوامل التربة.

نُفذت تجربتان لتقويم التأثيرات الناجمة عن تطبيق نظم فلاحة مختلفة في محتوى التربة من الكربون والآزوت العضوي (SOC, SON) وكمية مدخلات كل من الآزوت والكربون الموجودة في البقايا النباتية، وغلة الدورة الزراعية المحصولية للذرة الصفراء وفول الصويا على مناطق مختلفة من ولاية Iowa الأمريكية. تكونت التجربة الأولى من معاملتين، هما الزراعة بدون فلاحة No-tillage (NT)، وباستخدام المحراث الحفار Chisel plow (cp) ابتدأت من عام 1994. وتكونت التجربة الثانية من الزراعة بدون فلاحة، والفلاحة الشرائطية Strip-tillage (ST) ، و CP، و deep-rip (DR)، ومعاملة الفلاحة باستخدام المحراث القلاب Moldboard-plow (MP)، ابتدأت في عام 1998. لوحظ زيادات معنوية في محتوى التربة من الكربون العضوي (SOC) مقداره 17.3، 19.5، 6.1 و 19.3% في أربعة مواقع تجريبية مختلفة، في نهاية سبع سنوات من تطبيق نظام الزراعة بدون فلاحة بالمقارنة مع CP على عمق 15سم من التربة، وباعتماد دورة زراعية من نوع ذرة صفراء- صويا. وتمخض عن تطبيق نظامي الزراعة بدون فلاحة (NT)، والفلاحة الشرائطية (ST)، عن زيادة في محتوى التربة العضوي مقدارها 14.7، و11.4% على التوالي، بالمقارنة مع معاملة استخدام المحراث القلاب (MP) بعد ثلاث سنوات. ولوحظ تفوق نظامي الفلاحة NT و ST بالمقارنة مع CPوMP في زيادة محتوى التربة من الكربون العضوي (SOC) والآزوت العضوي (SON) على عمق 15سم ضمن المدى القصير(Mahdi et al., 2005). من المعروف

أنّ استخدام المحراث الحفار Chisel plow يسبب خلخلة disturbance وخلط، وقلب أكبر لبقايا المحصول في التربة، ما يؤدي إلى زيادة معدل تحلل بقايا المحصول بالمقارنة مع نظام عدم الفلاحة (NT)، لذلك يمكن أن يُعزى المحتوى الأعلى من الآزوت و الكربون العضوي (SOC , SON) في معاملة الزراعة بدون فلاحة بالمقارنة مع CP على عمق 0 - 15سم إلى التحلل الأبطأ لبقايا المحصول السابق على سطح التربة وتراجع تماس البقايا النباتية مع الكائنات الحية الدقيقة في التربة (Schomberg and Steinerm, 1999). وتسبب أيضاً الزراعة بدون فلاحة تراجعاً في معدل تحول المادة العضوية إلى عناصر معدنية، بسبب الظروف الأبرد والأكثر رطوبة، وتراجع تهوية التربة، والتعرض الأقل لأجزاء الكربون العضوي ضمن الكتل الترابية (Doran, 1980; Eghball et al., 1994). بالإضافة إلى ذلك، تقلل الزراعة بدون فلاحة من انجراف التربة، مقللةً بذلك من فقد الكربون العضوي. ولكن بالمقابل وبشكلٍ معاكس، فإنّ قلب بقايا المحصول في التربة عند فلاحتها بالمحراث الحفار (CP) يمكن أن يسرّع من عملية تحليل بقايا المحصول، مقللاً من محتوى التربة من الآزوت والكربون العضوي (Blevins et al., 1983; Daran, 1987). وإذا ما زادت كمية الكربون الداخلة إلى التربة على كمية الكربون المفقودة منها، فإنّ محتوى التربة من الكربون العضوي (SOC) سوف يزداد، وينتج بشكلٍ عام ازدياد محتوى التربة من الكربون العضوي من تحسين النظم الزراعية، والعمل على زيادة كمية بقايا المحصول المنتجة، ودرجة تغطية بقايا المحصول لسطح التربة، والاستعمال الفعّال لمدخلات الإنتاج، مثل الآزوت والماء (Follett, 2001). عموماً، يساعد تبني هذه الممارسات في تحسين كمية الكربون العضوي المحتجزة في التربة، ما يُحسّن من كفاءة حفظ التربة، ومحتوى التربة المائي، ويقلل من التأثيرات الناجمة عن انبعاث غاز الفحم إلى الغلاف الجوي، وما يتمخض عنها من ارتفاع في درجات الحرارة (Lal et al., 1998,1999). وتعد بشكلٍ عام البقايا النباتية (الجذور، والأجزاء الهوائية) المصدر الأساسي للكربون الداخل إلى التربة، أما المصدر المحتمل للكربون المنبعث من التربة فهو تنفس الكائنات الحية الدقيقة Microbial respiration، وتحلل المادة العضوية Soil organic matter decomposition، والبقايا النباتية، ورشح Leaching الكربون الذوّاب Soluble carbon، ونقل الكربون العضوي أثناء انجراف التربة أو مع التربة المنجرفة Eroded sediments (Follett, 2000). ويُساعد بشكلٍ عام، وجود كمية أعلى من المادة العضوية في التربة على تحسين قدرة التربة على الاحتفاظ بالماء Water holding

capacity وتزيد من النشاط الحيوي في التربة وتقلل من فقد النترات بالرشح، وإبقاء مبيدات الآفات المضافة، والحيلولة دون ضياعها (Follett et al., 1995).

وكان للزراعة الحافظة في استراليا دور مهم في زيادة غلة محصول القمح وقد ربط Peterson ,Bradford (2002) ازدياد غلة القمح بتحسين خصائص التربة الفيزيائية ومحتوى التربة المائي، في حين ربط (1995) Janzen, Campbell ازدياد غلة القمح الحبية تحت نظم الزراعة الحافظة بتراجع معدل فقد الماء من التربة وازدياد محتواها من الكربون العضوي ولاسيما في طبقات التربة السطحية. من المعروف بأن نظام الدورة الزراعية يساعد في زيادة التنوع النباتي ويحافظ على غلة الأنواع المحصولية ويقلل من شدة الإصابة بالأمراض ويزيد من خصوبة التربة وتعداد وحيوية الكائنات الحية فيها. عموماً، يسبب اتباع نظام الفلاحة التقليدية بشكلٍ مستمر تراجع كبير في محتوى التربة من المادة العضوية بغض النظر عن نظام الدورة الزراعية المتبعة (Mrabet et al., 2001a). ويُساعد ترك كميات كافية من بقايا المحصول فوق سطح التربة في حمايتها من الانجراف ويحسن بشكلٍ معنوي من محتواها من الكربون العضوي (Mrabet and Bouzza, 2000). وبهدف تقليل تجفيف طبقات الترب السطحية فقد أوصى Mrabet (1997) بضرورة ترك بين 60-80 % من بقايا المحصول السابق فوق سطح التربة. ويمكن أن تُسهم بقايا المحصول السابق أيضاً في تحسين خصوبة التربة بعد تحلل المواد العضوية إلى عناصر معدنية مغذية، ما يقلل بشكلٍ كبير من تكاليف إضافة الأسمدة الآزوتية (Mrabet et al., 2001b).

تشتمل منطقة حوض البحر الأبيض المتوسط على تنوع كبير من النظم الزراعية، حيث يُعد الماء فيها أحد الأسباب الرئيسة المحددة للإنتاجية. وعادةً ما تتسم غلة الأنواع المحصولية في مناطق الزراعة الجافة بانخفاضها، وتباينها من موسمٍ زراعي لآخر، بسبب التباين الموسمي الكبير في معدل الهطول المطري، وعدم انتظام توزع الأمطار خلال موسم النمو، إذ يحدث قرابة 85% من الهطول المطري السنوي خلال الأشهر من تشرين الأول October الى شهر نيسان April. عموماً، يهطل معظم المطر خلال فصلي الخريف Autumn والشتاء Winter، وتبدأ معالم العجز المائي Water deficit بالظهور خلال فصل الربيع مسببةً تعرض النباتات خلال الإزهار للإجهاد المائي المتوسط الشدة Moderate stress ، وتزداد وطأة شدة الإجهاد المائي تدريجياً بسبب انحباس الأمطار، وارتفاع درجات الحرارة فتتعرض النباتات للإجهاد المائي الشديد خلال مرحلة امتلاء الحبوب Grain filling. ويُسبب هذا التباين في الأمطار، تبايناً قد يصل

إلى 75 % في غلة محصول القمح الحبية (Kun, 1988). وتختلف استجابة المحصول لنظام الفلاحة بشكلٍ كبير بسبب التباين في التفاعلات بين طريقة الفلاحة والعوامل الأرضية واحتياجات المحصول، والعوامل المناخية (Boone, 1988). وتعزى زيادة الإنتاجية إلى ازدياد محتوى التربة المائي واستعمال المياه من قبل نباتات المحصول، ولاسيما في المناطق الجافة وشبه الجافة. في حين يعزى تردي الإنتاجية إلى الإصابة بالأمراض و الحشرات، واستفحال الأعشاب الضارة وعدم حركة الآزوت (Mcmastel et al; 2002). وذكر (1996) Lopez-Bellido وزملاؤه أنّه تحت ظروف شح المياه، وعندما تكون كميات المياه المتاحة في التربة غير كافية لتأمين احتياجات النباتات المائية خلال كامل موسم النمو، فإنُ غلة محاصيل الحبوب عادةً ما تكون أكبر أو تساوي غلتها في نظام الزراعة الحافظة بالمقارنة مع الفلاحة التقليدية، وترتبط بشكلٍ إيجابي مع التبكير في ظهور البادرات، والنمو المبكر خلال فصل الخريف Autumn growth. عموماً، يساعد إبقاء بقايا المحصول فوق سطح التربة من خلال تطبيق نظام الزراعة الحافظة، مثل الفلاحة السطحية Shallow، أو الفلاحة المخففة Reduced tillage على المدى الطويل في تحسين قوام التربة، ودورة العناصر المعدنية المغذية فيها ولاسيما في البيئات المعتدلة(Lal, 1989).

تأثير الدورة الزراعية Influence of crop rotation

إنّ المحاصيل البقولية الغذائية الحولية التي تزرع في دورة زراعية مع محاصيل الحبوب يمكن أن تُسهم في تحسين مخزون التربة الكلي من الآزوت، وتُحسّن غلة محاصيل الحبوب (Herridge et al., 1995). وإنَ البقوليات التي تتسم بدليل حصاد عالٍ للآزوت يمكن أن تُسهم بكمياتٍ قليلة جداً بمحتوى التربة من الآزوت حتى لو قلبت بقايا المحصول في التربة (Carranca et al., 1999). وقد بين (2002) Miller et al., أنّ محصول الحمص يمكن أن يترك كمية من البقايا النباتية فوق سطح التربة تعادل تقريباً نصف الكمية التي يمكن أن يتركها محصول القمح الربيعي إذا ما زرع تحت الظروف البيئية نفسها. ويختلف معدل تثبيت الآزوت في الحمص بشكلٍ كبير باختلاف الصنف المزروع ومدى وجود الملقح البكتيري المناسب بالإضافة إلى تأثير العوامل الجوية والأرضية (Beck, 1992). ويمكن أن يثبت الحمص كمية من الآزوت تصل حتى 140 كغ.N هكتار$^{-1}$ خلال موسم النمو الواحد وبالرغم من أن الكثير من الاتجاهات بينت أنَ كمية الآزوت التي يمكن أن يثبتها الحمص تتراوح ما بين 20-60 كغ.N.هكتار$^{-1}$ (Kummar and Abbo, 2001). ويُعد الحمص من بين العديد من البقوليات التي

تزرع في دورة زراعية مع القمح الأقل كفاءة في تثبيت الآزوت الجوي، في حين يثبت الفول Faba been كمياتٍ أكبر من الآزوت بالمقارنة مع الحمص حتى تحت ظروف الجفاف. وتتراوح الزيادة في الغلة الحبية عند زراعة القمح في دورة زراعية مع الحمص بين 17-61 % وبزيادة متوسطة قدرها 40 % (25 كغ.هكتار$^{-1}$) (Dalal et al., 1998). وتؤدي زراعة القمح في دورة زراعية مع الحمص إلى تحسين تركيز البروتين في حبوب القمح، وتحسن بذلك من خصائصه التصنيعية (Dalal et al., 1998; Lopez-Bellido et al., 2001).

وأشارت أيضاً العديد من البحوث إلى أهمية اتباع الدورة الزراعية وجدواها المناسبة بالمقارنة مع الزراعة المفردة للمحصول نفسه عبر السنوات، وفي الأرض نفسها في تحسين إنتاجية محاصيل الحبوب (Halvorson et al., 2000; Galantini et al., 2000). وذكر البحاثة .Karlen (1994) et al و(2002) Fischel وزملاؤه في أنُ الدورة الزراعية لمحاصيل الحبوب مع البقوليات تساعد في كسر دورة حياة المسبباتٍ المرضية في التربة، وتحافظ على خصوبتها.

سببت الفلاحة المتكررة في الأرض نفسها Intensive cropping ونظم الفلاحة التقليدية المطبقة في بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط تدهوراً كبيراً في نوعية التربة (Lopez-Bellido, 1992). وبيّنت الدراسات الحديثة أنّ زيادة غلة محصول القمح الحبية يمكن أن تنتج من عملية الانتقال من الفلاحة التقليدية إلى نظام الزراعة بدون فلاحة (Nelson, 1996). وقد عزا الباحثون زيادة غلة محصول القمح في المناطق شبه الجافة في المغرب إما إلى زيادة كمية الماء المخزونة في التربة في نظام التبوير (بور- قمح)، أو إلى تحسين كفاءة استعمال الماء عندما زرع القمح بشكلٍ متكرر(Kacemi, 1992). وقد وجد أيضاً أنّ نظام الزراعة بدون فلاحة قد أدى إلى زيادة محتوى التربة من المادة العضوية وكمية العناصر المعدنية المغذية القابلة للامتصاص بالمقارنة مع نظام الزراعة التقليدية. ويعزى ذلك إلى تراكم بقايا المحاصيل فوق سطح التربة عند اعتماد نظام الزراعة بدون فلاحة، حيث يُساعد ذلك في جعل التربة أبرد، وأكثر رطوبة، ويقلل من أكسدة المادة العضوية.

يؤثر نظام الفلاحة المعتمد في محتوى التربة من المادة العضوية بعدة طرائق، ففي المناطق شبه الجافة والتي يكون فيها تحلل المادة العضوية قرب سطح التربة شبه معدوم بسبب الجفاف Drought (Campbell, 1999)، فإنَ تبني نظام الزراعة الحافظة يمكن

أن يقلل من فقد الماء بالتبخر، ويزيد من غلة المحصول، ما يُساعد في زيادة معدل تراكم المادة الجافة نتيجة إنتاج كمية كبيرة من الكتلة الحية (Campbell, 1995). ويمكن القول: إنَ زيادة عمليات الفلاحة يمكن أن تسرع من فقد المادة العضوية، وتصبح التربة أكثر حساسية للانجراف، لذلك فمن الأهمية بمكان العمل على تحسين مستويات المادة العضوية في التربة بهدف زيادة خصوبتها وتحقيق استدامة الإنتاج الزراعي. ويتطلب تحقيق ذلك بشكلٍ أساسي ترك بقايا المحصولCrop residues فوق سطح التربة. وتساعد المادة العضوية في المحافظة على بناء التربة وتماسكها حيث تعد بمنزلة الملاط الذي يربط حبيبات التربة مع بعضها البعض. عموماً، تساعد الممارسات الزراعية التي تتضمن ترك كمية كبيرة من بقايا المحصول فوق سطح التربة في تحسين تماسك التربة وثباتها (Carpenedo and Mielniczuk, 1990).

تطبيق نظام الزراعة الحافظة في سورية:

قام المركز العربي لدراسات المناطق الجافة والأراضي القاحلة (أكساد) بالتعاون مع الوكالة الألمانية للتعاون الفني (GTZ) على البدء بتجريب تطبيق نظام الزراعة الحافظة منذ عام 2006 – 2007، حيث زرعت خلطة من المحاصيل الحبية والبقولية العلفية، واعتمدت كغطاء نباتي Mulch، تزرع فوقه نباتات المحصول الرئيس خلال الموسم الزراعي 2007 – 2008. وكانت البداية على مستوى المحطات البحثية Research stations (محطتي بحوث إزرع وجلين). بلغت المساحة المزروعة بطريقة الزراعة الحافظة خلال الموسم الزراعي 2007 – 2008 قرابة 30 هكتاراً في حقول المزارعين (25 مزارعاً). وازدادت المساحة المزروعة إلى 120.3 هكتاراً، لدى 58 مزارعاً خلال الموسم الزراعي 2008 - 2009، أي بزيادة مقدارها تقريباً خمسة أضعاف في المساحة المزروعة، وضعفان في عدد المزارعين الذين رغبوا في تجريب تطبيق نظام الزراعة الحافظة. نُفذت التجارب في حقول المزارعين بالتعاون مع مديرية الإرشاد الزراعي في وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي، والهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية، حيث كان للإرشاد الزراعي دور مهم في اختيار المزارعين المتنورين، الذين لديهم الرغبة، والإمكانية لتجريب التقانات الزراعية الجديدة. وتمّ تحديد الحقول المناسبة بالتعاون بين خبراء المركز العربي، وعناصر الإرشاد، وفنيي مراكز البحوث العلمية الزراعية في المحافظات المستهدفة. ويلاحظ من الجدول (28) التطور الواضح في زيادة رقعة المساحات المزروعة بنظام الزراعة الحافظة، كذلك تضاعف أعداد المزارعين الذين طبقوا هذا النظام في حقولهم الخاصة في المحافظات المشمولة بالدراسة في الجمهورية

العربيــة الســورية باســتثناء محافظــة الســويداء فــي الموســم 2009/2010 بسـبب ظهـور إشكالات تتعلق بمدى تطبيق المبادئ الأساسية لإدارة المزرعة بشكل عام، و عدم دقة الالتزام بتطبيق كامل مفردات نظام الزراعة الحافظة بشكل خاص.

جدول رقم (28). تطور المساحات المزروعة بنظام الزراعة الحافظة وأعداد المزارعين خلال المواسم الزراعية الأربعة الماضية.

حسب المحافظات الموسم الزراعي	المساحة المزروعة (هكتار)	أعداد المزارعين						
		الحسكة	حلب	إدلب	حمص	درعا	السويداء	مجموع أعداد المزارعين
2007-2008	29	5	5	5	5	5	4	29
2008-2009	143	11	14	9	12	7	5	58
2009-2010	623	37	13	33	7	14	-	104
2010-2011	1788	102	22	40	7	5	5	181

المصدر: استمارة المسح الميداني للموسم الزراعي.

متوسط إنتاجية محصول القمح Wheat على مستوى المحافظة في سورية:

يُلاحظ من الجدول (29) أنّ متوسط إنتاجية محصول القمح (كغ . هكتار$^{-1}$) كان الأعلى تحت ظروف الزراعة الحافظة بالمقارنة مع الزراعة التقليدية في جميع المحافظات السورية المستهدفة في الدراسة. وكان متوسط الزيادة في إنتاجية محصول القمح نحو 15.3% تحت ظروف الزراعة الحافظة بالمقارنة مع الزراعة التقليدية، ما يشير إلى أهمية تطبيق نظام الزراعة في تحسين متوسط إنتاجية محصول القمح تحت ظروف الزراعة المطرية، في جميع المحافظات التي تنتشر فيها زراعة محصول القمح. ويُعزى التباين في نسبة الزيادة في متوسط الإنتاجية بين المحافظات السورية المستهدفة إلى التباين في خصائص التربة الفيزيائية والكيميائية والحيوية، والتباين في الصنف المزروع Cultivated variety، ومدى ملاءمته للمنطقة البيئية المستهدفة، والتباين في معدل

الهطول المطري السنوي، والممارسات الزراعية المطبقة، ولاسيما موعد الزراعة، ومعدل البذار، وكمية الأسمدة المعدنية المضافة، والمكافحة الفعّالة للأعشاب الضارة، وكمية بقايا المحصول المتروكة فوق سطح التربة من الموسم الماضي، والنوع المحصولي السابق في الدورة الزراعية.

جدول رقم (29): متوسط إنتاجية محصول القمح (كغ . هكتار$^{-1}$) تحت ظروف الزراعة الحافظة والتقليدية في بعض المحافظات السورية، خلال الموسمين الزراعيين 2010/2009 – 2011/2010.

المحافظة	الزراعة الحافظة	الزراعة التقليدية	نسبة الزيادة (%)
الحسكة	1952	1837	6.3
إدلب	2238	2173	3
حلب	2527	2314	9.2
حمص	2666.7	2216.7	20.3
درعا	1662.5	1037.5	60.2
متوسط الإنتاجية لكل المحافظات	2209.6	1915.7	15.3

وأدى تطبيق نظام الزراعة الحافظة إلى زيادة متوسط إنتاجية الأنواع المحصولية الأخرى (الشعير Barley، والعدس Lentils، والحمص Chickpea). وبلغت نسبة الزيادة في متوسط إنتاجية محصول الشعير(كغ . هكتار$^{-1}$) (كقيمة متوسطة لجميع المحافظات) قرابة 8.60%، ومحصول العدس قرابة 11.36%، ومحصول الحمص قرابة 18% (الجدول، 29). تشير النتائج إلى تباين استجابة النوع المحصولي المزروع لتطبيق نظام الزراعة الحافظة، حيث كان محصول القمح الأكثر استجابةً لهذا النظام الزراعي، في حين كان محصول الشعير الأقل استجابةً. وهذا مهم من وجهة نظر إنتاجية، لأنّ محصول القمح هو المحصول الحبي الأكثر أهميةً في سورية، والوطن العربي، ما يشير إلى أنّ نظام الزراعة الحافظة من الممارسات الزراعية المهمة في تحسين إنتاجية محصول القمح، وخاصةً تحت ظروف الزراعة المطرية، ما يُسهم بشكلٍ فعّال في تضييق الفجوة الإنتاجية، وزيادة الإنتاج الزراعي، بما يضمن تحقيق الأمن الغذائي الوطني والعربي، وتحسين دخل المزارع ومستوى معيشته.

ويُلاحظ من خلال مقارنة متوسط إنتاجية Productivity محصول القمح خلال الموسمين الزراعيين المدروسين (2009/2010 – 2010/2011) أنّ نسبة الزيادة في الإنتاجية كانت أعلى (21.80%) خلال الموسم الزراعي 2010 – 2011 (الجدول، 30) بالمقارنة مع الموسم الزراعي 2009 – 2010 (15.30%) (الجدول، 2). تشير هذه النتائج إلى أنّ تطبيق نظام الزراعة الحافظة يؤدي إلى زيادة الغلة الحبية بشكلٍ تدريجي وتراكمي. ويعزى ذلك إلى دور الزراعة الحافظة في تحسين خصائص التربة الفيزيائية (النفاذية، والتهوية)، والكيميائية، والحيوية (عدد الكائنات الحية ونشاطها)، من خلال تحسين محتوى التربة من المادة العضوية، وزيادة حجم الكتل الترابية وثباتيتها Aggregate size and stability، (الشكل، 94)، ما يؤدي إلى زيادة معدل رشح المياه إلى باطن التربة، ومقدرة التربة على الاحتفاظ بالماء، نتيجة زيادة مسامية التربة، ويؤدي ذلك أيضاً إلى تحسين خصوبة التربة، وكفاءة استعمال الأسمدة المعدنية. ويؤدي بالمقابل تطبيق الدورة الزراعية إلى كسر دورة حياة العديد من الآفات الزراعية، والمسببات المرضية، ما يقلل من حجم الضرر الناجم عن العوامل الحيوية Biotic factors. لذلك، يرتبط مقدار الزيادة الحاصلة في غلة المحصول الاقتصادية بمدى التحسين الحاصل في نوعية التربة "المحصول مرآة التربة"، ويتوقف هذا بدوره على التطبيق السليم لنظام الزراعة الحافظة، ولاسيما فيما يتعلق بترك أكبر كمية ممكنة من بقايا المحصول السابق فوق سطح التربة، حيث تشكل البقايا النباتية المادة الأولية للمادة العضوية في التربة، والغذاء الرئيس لجميع الكائنات الحية في التربة.

الجدول رقم (3): متوسط إنتاجية (كغ . هكتار$^{-1}$) محصول القمح تحت نظامي الزراعة الحافظة والتقليدية للمحافظات السورية المستهدفة خلال الموسم الزراعي 2010 - 2011.

المحافظة	الزراعة الحافظة	الزراعة التقليدية	نسبة الزيادة (%)
الحسكة	442.56	298.33	48.34
إدلب	3431.81	2459.09	- 0.78
درعا	356.66	248.33	43.62
حلب	1571.81	1429.09	9.98
حمص	4760	4500	5.77
المتوسط العام	2112.56	1786.96	21.38

الشكل رقم (94): يحسّن تطبيق الزراعة الحافظة من مسامية التربة، ومقدرتها على الاحتفاظ بالماء.

ويُلاحظ من الجدول (31) أنّ متوسط إنتاجية محصول الشعير كان الأعلى تحت ظروف الزراعة الحافظة بالمقارنة مع الزراعة التقليدية في المحافظات السورية المستهدفة. وتراوحت نسبة الزيادة في الإنتاجية بين 8.87 إلى 36.90%. ويعزى التباين في نسبة الزيادة إلى التباين في معدل الهطول المطري، والعوامل البيئية السائدة خلال موسم النمو ومدى ملاءمتها لمتطلبات نباتات الشعير البيئية، والتباين في نوعية التربة، والممارسات الزراعية المطبقة (موعد الزراعة، معدل البذار، عمق الزراعة، معدل الأسمدة المعدنية المضافة، مكافحة الأعشاب الضارة...إلخ) في كل حقل ومنطقة بيئية. وكانت نسبة الزيادة بالمتوسط قرابة 23.82%. ويُلاحظ أيضاً أنّ نسبة الزيادة خلال الموسم الزراعي 2010 – 2011 كانت أعلى بالمقارنة مع الموسم الزراعي السابق (8.60%)، ما يؤكد التأثير التراكمي الذي يؤديه تطبيق نظام الزراعة الحافظة، من خلال تحسين نوعية التربة وخصوبتها. ويمكن القول: **"إنّ تطبيق نظام الزراعة الحافظة يُساعد في إعادة تأهيل الترب الزراعية المتدهورة، واستعادة طاقتها الإنتاجية"**، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة إنتاجية الأنواع المحصولية المزروعة فيها، وهذا ينسجم مع مفهوم التنمية الزراعية المستدامة Sustainability. لذلك، كلما ازداد عدد سنوات تطبيق نظام الزراعة الحافظة في الحقل نفسه، تزداد الغلة الاقتصادية عاماً بعد آخر، وصولاً إلى الطاقة الإنتاجية الكامنة للأرض والمحصول.

الجدول رقم (31): متوسط إنتاجية (كغ . هكتار-1) محصول الشعير تحت نظامي الزراعة الحافظة والتقليدية للمحافظات السورية المستهدفة خلال الموسم الزراعي 2010 - 2011.

المحافظة	الزراعة الحافظة	الزراعة التقليدية	نسبة الزيادة (%)
الحسكة	700	525	33.33
إدلب	3767.85	3460.71	8.87
درعا*	-	-	-
حلب	2000	1460	36.90
حمص	215	185	16.20
المتوسط العام	1670.71	1407.67	23.82

*ملاحظة: لم يزرع الشعير لدى المزارعين في درعا خلال هذا الموسم.

يُلاحظ أيضاً من الجدول (32) أنّ متوسط إنتاجية محصول العدس كان الأعلى تحت ظروف الزراعة الحافظة بالمقارنة مع الزراعة التقليدية في جميع المحافظات السورية المستهدفة. ويُلاحظ أيضاً أنّ متوسط نسبة الزيادة في الإنتاجية كان أعلى (12.93%) خلال الموسم الزراعي اللاحق بالمقارنة مع الموسم الزراعي السابق (11.36%)، ما يؤكد مجدداً على أهمية تطبيق الزراعة الحافظة في تحسين الإنتاجية تدريجياً للمحاصيل البقولية الغذائية (العدس).

الجدول رقم (32): متوسط إنتاجية (كغ . هكتار-1) محصول العدس تحت نظامي الزراعة الحافظة والتقليدية للمحافظات السورية المستهدفة خلال الموسم الزراعي 2010 - 2011.

المحافظة	الزراعة الحافظة	الزراعة التقليدية	نسبة الزيادة (%)
الحسكة	912.50	833.33	9.50
إدلب	1695.00	1456.87	16.34
حلب	1482.50	1312.50	12.95
المتوسط العام	1363.33	1278.61	12.93

يُلاحظ من الجدول (33) أنّ تطبيق نظام الزراعة الحافظة في الحقول نفسها خلال أربعة مواسم زراعية متتالية قد سبب زيادة تراكمية في متوسط إنتاجية محاصيل الحبوب الصغيرة (القمح، والشعير)، والبقوليات الغذائية (العدس). ويُعزى ذلك إلى التحسين التدريجي الذي يطرأ على خصائص التربة، نتيجة عدم الفلاحة، حيث يُساعد ذلك في المحافظة على بناء التربة Soil structure (حجم الكتل الترابية وثباتها)، وتقليل معدل فقد الكربون العضوي من التربة، لأنّ عملية الفلاحة تؤدي إلى زيادة معدل أكسدة المادة العضوية، بالإضافة إلى دور عدم الفلاحة في تقليل معدل فقد المياه بالتبخر. ويُساعد أيضاً ترك بقايا المحصول فوق سطح التربة في الحد من انجراف التربة الريحي والمائي، الأمر الذي يُسهم في المحافظة على طبقات التربة السطحية الغنية بالمادة العضوية والعناصر المعدنية المغذية، بالإضافة إلى تقليل معدل فقد المياه بالجريان السطحي، الأمر الذي يقلل من حساسية الترب الزراعية للانجراف، ويزيد من معدل رشح المياه إلى باطن التربة. ويؤدي أيضاً ترك البقايا النباتية إلى زيادة معدل تشكيل المادة العضوية في التربة، وتتوقف وتيرة تراكم المادة العضوية على كمية بقايا المحصول المتروكة فوق سطح التربة. تؤدي هذه العوامل مجتمعةً إلى تحسين نوعية التربة، التي تؤدي بدورها إلى تحسين إنتاجية المحصول، والمياه.

الجدول رقم (33): نسبة الزيادة (%) في متوسط الإنتاجية تحت ظروف الزراعة الحافظة بالمقارنة مع الزراعة التقليدية لبعض الأنواع المحصولية عبر المواسم الزراعية.

المواسم الزراعية	القمح	الشعير	العدس
2007 – 2008	7.14	5.18	3.50
2008 – 2009	12.21	8.56	4.13
2009 – 2010	15.30	18.60	11.36
2010 - 2011	21.38	23.82	12.93

ملاحظة: تمثل القيم متوسط الزيادة في الإنتاجية لجميع المحافظات المستهدفة.

ثانياً- تكاليف الإنتاج الزراعي Agricultural Production Costs

يُساعد تطبيق نظام الزراعة الحافظة تدريجياً في تحسين خصوبة التربة Soil fertility، وكفاءة استعمال المياه Water Use Efficiency، ويمكن أن يؤدي ذلك مع الزراعة في الوقت المناسب Timely planting إلى زيادة غلة الأنواع المحصولية المزروعة، ومن ثمّ العوائد المادية للمزرعة. عموماً، تتمثل المنافع الاقتصادية الناجمة عن تطبيق الزراعة الحافظة بالنقاط الآتية:

1. زيادة متوسط الإنتاجية.
2. زيادة استقرار الإنتاج الزراعي.
3. زيادة نسبة مخرجات الإنتاج الزراعي إلى مدخلاته.
4. تقليل الحاجة للعمالة، واستهلاك الطاقة، بسبب الاستغناء عن فلاحة التربة، وعملية التعشيب.
5. التخفيف من الأضرار السلبية الناتجة عن الجفاف.
6. توفير الوقت والأيدي العاملة خلال أوقاتٍ حرجة من السنة، الأمر الذي يسمح بتنويع الإنتاج الزراعي، ومن ثمّ مصادر الدخل.

سيتم استعراض تكاليف عمليات الإنتاج الزراعي، ومستلزمات الإنتاج، والعوائد تحت ظروف الزراعتين الحافظة والتقليدية لجميع الأنواع المحصولية المزروعة في كل المحافظات السورية المستهدفة.

يُلاحظ من الجدول (34) أنّ متوسط تكاليف الإنتاج الزراعي لمحصول القمح كان أقل تحت ظروف الزراعة الحافظة (13799 ل. س . هكتار$^{-1}$) بالمقارنة مع الزراعة التقليدية (164119 ل. س . هكتار$^{-1}$)، بنسبة زيادة قرابة 15.9%. ويعزى انخفاض تكاليف الإنتاج الزراعي تحت ظروف الزراعة الحافظة إلى توفير أجور عملية تحضير الأرض قبل الزراعة، حيث تتم الزراعة مباشرةً في الأرض غير المحضرة بشكلٍ مسبق (بدون فلاحة)، باستعمال آلات زراعية خاصة تعمل على إحداث شق ضيق في الأرض غير المحضرة مسبقاً، بعرض وعمق كافيين فقط لوضع الأسمدة المعدنية والبذار على عمق مناسب ومتجانس، وتغطيتهما بشكلٍ جيد، ما يسمح بتوفير أجور الفلاحة ونثر الأسمدة المعدنية قبل الزراعة، في حين تتطلب الزراعة بالبذارات التقليدية (الهارو) ضرورة فلاحة التربة وتحضير المهد المناسب لإنبات البذور، وتختلف عدد مرات الفلاحة، وعمق كل فلاحة من مزارعٍ لآخر، وتقدّر بالمتوسط تكاليف تحضير الهكتار الواحد بنحو 1573 ل. س، بالإضافة إلى أجور نثر الأسمدة المعدنية قبل الزراعة، التي تقدر بالمتوسط بنحو

215 ل. س للهكتار، في حين يسمح استعمال آلات البذر المباشر بإجراء عمليتي التسميد والبذر بعملية زراعية واحدة (الشكل، 1). ويُلاحظ أيضاً أنّ متوسط ثمن البذار المزروعة في الهكتار الواحد كان أقل تحت ظروف الزراعة الحافظة (3124 ل. س . هكتار$^{-1}$) بالمقارنة مع الزراعة التقليدية (3870 ل. س . هكتار$^{-1}$)، بنسبة زيادة تقدّر بنحو 19.3%. ويعزى ذلك إلى تقليل معدل البذار Seeding rate، تحت ظروف الزراعة الحافظة، وتتراوح نسبة التخفيض بمعدل البذار بين 40 إلى 60% تحت ظروف الزراعة الحافظة بالمقارنة مع الزراعة التقليدية، لأنّ استعمال آلات البذر المباشر يسمح بوضع جميع البذار المزروعة على عمق مناسب (5 سم)، الأمر الذي يضمن إنبات جميع البذور الحية، أي أن نسبة الإنبات تصل تقريباً إلى 100%، وهذا يضمن الحصول على الكثافة النباتية المطلوبة Crop stand في وحدة المساحة من الأرض بزراعة عدد أقل من البذار، في حين يضطر المزارع تحت ظروف الزراعة التقليدية (باستعمال الهارو) أن يستعمل معدل بذار أعلى لضمان الحصول على الحد الأدنى من الكثافة النباتية المطلوبة في وحدة المساحة، بسبب ضياع نسبة كبيرة من البذار، حيث يضع الهارو جزءاً من البذار على أعماقٍ كبيرة (أكبر من 15 سم)، فتفشل البذور المنبتة Germinating seeds من الوصول إلى سطح التربة، لأنّ عمق الزراعة أكبر من الطول الأقصى للسويقة الجنينية، فتبقى البادرات تحت سطح التربة وتتعفن، ويضع بالمقابل جزء من البذار على سطح التربة، وهذه البذار عادةً ما تؤكل من قبل الطيور، أو تفشل في الإنبات بسبب الجفاف، ولا تتجاوز نسبة البذور التي توضع على العمق المناسب أكثر من 40 – 50%، لذلك لا بدّ من زيادة معدل البذار لضمان الحصول على الكثافة النباتية المثلى. ويُلاحظ أيضاً أنّ متوسط قيمة الأسمدة المعدنية المضافة كانت أقل تحت ظروف الزراعة الحافظة (3722 ل. س . هكتار$^{-1}$) بالمقارنة مع الزراعة التقليدية (3980 ل.س .هكتار$^{-1}$) بنسبة زيادة تقدّر بنحو 6.5%. ويُعزى ذلك إلى تقليل معدل الأسمدة المعدنية المضافة تحت ظروف الزراعة الحافظة بالمقارنة مع الزراعة التقليدية، لأنّ آلات البذر المباشر تعمل على وضع الأسمدة المعدنية على عمق مناسب ومتجانس (أسفل وجانب البذار، على مسافة 2 – 3 سم من البذار لتجنب التماس المباشر والتأثير الكاوي للأسمدة المعدنية في البذار)، الأمر الذي يُساعد في الحد من ضياع الأسمدة، ويزيد من كفاءة استعمالها، بالإضافة إلى حقيقة أنّ تطبيق الدورة الزراعية، التي تتضمن محصولاً بقولياً يُساعد في إغناء التربة بالآزوت Nitrogen، نتيجة عملية التثبيت الحيوي للآزوت الجوي Biological nitrogen fixation، بفضل العقد البكتيرية Nodules المتعايشة على جذور النباتات البقولية. ويُساعد أيضاً تحسين محتوى التربة من المادة العضوية في تقليل الحاجة للأسمدة المعدنية الخارجية، نتيجة التحرير البطيء للعناصر المعدنية المغذية من

المادة العضوية بفعل الكائنات الحية الدقيقة. ولكن يُلاحظ بالمقابل من الجدول (34) أنّ تكاليف أجور نثر الأسمدة المعدنية (نصف كمية الأسمدة الآزوتية المتبقية) كان أعلى تحت ظروف الزراعة الحافظة (261 ل.س.هكتار$^{-1}$) بالمقارنة مع الزراعة التقليدية (241 ل. س . هكتار$^{-1}$)، لأنّ المزارع يضطر إلى زيادة معدل الأسمدة الآزوتية تحت ظروف الزراعة الحافظة بسبب نمو النباتات وتطورها بشكلٍ أفضل بالمقارنة مع الزراعة التقليدية. ويؤدي أيضاً ترك بقايا المحصول، ولاسيما بقايا القمح والشعير إلى زيادة نسبة الكربون إلى الآزوت في التربة، الأمر الذي يمكن أن يُعرض النباتات إلى نقص الآزوت ما لم يُضفْ بكمياتٍ أكبر ولاسيما خلال السنوات الثلاثة الأولى من تطبيق نظام الزراعة الحافظة، إلى أن يتحسن محتوى التربة من المادة العضوية (SOMC)، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة احتياجات النباتات من الآزوت، ما يفسر زيادة أجور نثر الأسمدة المعدنية بعد الزراعة بنسبة 8% تحت ظروف الزراعة الحافظة. ويُلاحظ أيضاً أنّ ثمن مبيدات الأعشاب الضارة كان نسبياً أعلى تحت ظروف الزراعة الحافظة (614 ل. س . هكتار$^{-1}$) بالمقارنة مع الزراعة التقليدية (558 ل. س . هكتار$^{-1}$)، ولكن لم تكن هناك فروقات في أجور الرش. ويعزى ذلك إلى حقيقة أنّ كثافة الأعشاب الضارة، عادةً ما يكون أعلى في الحقول المزروعة بنظام الزراعة الحافظة، لأنّ فلاحة التربة قبل الزراعة تسمح بالتخلص من الأعشاب الضارة التي تنبت قبل الزراعة، لذلك فإنّ عدم فلاحة التربة يشجع انتشار الأعشاب الضارة بكثافةٍ أكبر، ومن ثمّ سيضطر المزارع لاستعمال كمية أكبر من مبيدات الأعشاب الضارة، ولكن هذا لا يعني بالضرورة استمرار استعمال مبيدات الأعشاب الضارة بكمياتٍ أكبر تحت ظروف الزراعة الحافظة، لعدة أسباب، أهمها:

1. إنّ عدم فلاحة التربة يعني عدم إحضار بذور أعشاب ضارة جديدة من طبقات التربة العميقة إلى طبقات التربة السطحية، وبالتالي تبقى البذور خلال السنوات اللاحقة لتطبيق نظام الزراعة الحافظة على أعماقٍ لا تسمح لها بالإنبات.
2. تسمح عملية المكافحة الكيميائية الفعّالة لنباتات الأعشاب الضارة خلال السنوات الثلاثة الأولى من تطبيق نظام الزراعة الحافظة في استنزاف مخزون طبقات التربة السطحية من بذور الأعشاب الضارة، بسبب عدم السماح لنباتات الأعشاب النامية من الوصول إلى مرحلة الإزهار وتشكيل البذور، وهذا يضمن انخفاض كثافة الأعشاب الضارة في حقول الزراعة الحافظة عاماً بعد آخر.
3. يسمح ترك بقايا المحصول السابق بكمياتٍ كافية فوق سطح التربة في خفض درجة حرارة التربة بين السطور المزروعة، ما يبطئ من سرعة إنبات بذور الأعشاب الضارة، ويؤخر ظهورها فوق سطح التربة بالمقارنة مع نباتات المحصول الاقتصادي، ما يؤدي إلى زيادة كفاءة نباتات المحصول الاقتصادي

التنافسية Competitive capacity، وحرمان نباتات الأعشاب الضارة من متطلبات النمو الأرضية (الماء والعناصر المعدنية المغذية)، والهوائية (الضوء، وغاز الفحم)، الأمر الذي يؤثر سلباً في معدل نمو نباتات الأعشاب الضارة، وتطورها، وإنتاجيتها. ويساعد أيضاً تطبيق الدورة الزراعية المناسبة الطويلة الأمد في تقليل كثافة الأعشاب الضارة.

وتشير نتائج البحوث السابقة في الدول التي طبقت الزراعة الحافظة على مدار أكثر من عشر سنوات، أنّ كمية مبيدات الأعشاب الضارة المستعملة لمكافحة الأعشاب الضارة في حقول الزراعة الحافظة قلّت بمقدار النصف بعد السنة الثالثة، وتمّ الاستغناء عنها تماماً بعد مضي 5 – 7 سنوات على تطبيق نظام الزراعة الحافظة بشكلٍ مستمر. لذلك، يسمح تطبيق نظام الزراعة الحافظة في توفير ثمن المبيدات العشبية، وأجور رشها بد مضي 5 سنوات، في حين يستدعي الاستمرار بالزراعة التقليدية ضرورة المكافحة الكيميائية للأعشاب الضارة بشكلٍ سنوي، لأنّ عملية الفلاحة تعني إحضار بذور أعشاب جديدة في كل سنة من طبقات التربة العميقة إلى طبقات التربة السطحية. ولكن نود أن نؤكد في هذا الصدد على أهمية المكافحة الفعّالة للأعشاب الضارة في الحقول المزروعة بنظام الزراعة الحافظة، وإلاّ سيكون هذا النظام الزراعي كارثياً على المزارع، لأنّ عدم فلاحة التربة يعني إمكانية انتشار الأعشاب الضارة بكثافةٍ أكبر، وقد تظهر أنواع عشبية جديدة حولية ومعمرة. أما زيادة التكاليف المتمثلة بثمن الأكياس (15%)، فهي تُعزى إلى زيادة متوسط الإنتاجية تحت ظروف الزراعة الحافظة بالمقارنة مع الزراعة التقليدية. يُلاحظ بشكلٍ عام، أنّ تطبيق نظام الزراعة الحافظة قد قلّل تكاليف الإنتاج الزراعي لمحصول القمح بنحو 15.9% (كقيمة متوسطة لمحصول القمح المزروع في جميع المحافظات المستهدفة، وخلال الموسمين الزراعيين المدروسين).

جدول رقم (34): متوسط تكاليف الإنتاج الزراعي (ل. س/هكتار) تحت ظروف الزراعتين الحافظة والتقليدية لمحصول القمح خلال الموسمين الزراعيين 2010/2009 – 2011/2010.

البيان	حافظة	تقليدية	نسبة الفروقات (%)
أجور تحضير الأرض	0	1573	100
أجور نثر الأسمدة قبل الزراعة	0	215	100
أجور نثر الأسمدة بعد الزراعة	261	241	8.3 -
أجور تعبئة الأسمدة	105	105	0

ثمن الأسمدة	3722	3980	6.5
المجموع	4088	4541	9.9
ثمن بذار	3124	3870	19.3
أجور عملية البذر	950	964	1.5
المجموع	4074	4834	15.7
ثمن مبيدات أعشاب	614	558	10 -
أجور رش مبيدات أعشاب	289	290	0.3
ثمن مبيدات أخرى	750	750	0
أجور رش مبيدات أخرى	160	160	0
المجموع	1813	1758	3.03
أجور حصاد	2200	2200	0
ثمن أكياس	874	763	-15
أجور نقل	750	750	0
متوسط اجمالي التكاليف	13799	16419	% 15.9

المصدر: استمارة المسح الميداني للموسمين الزراعيين 2010/2009 – 2011/210.

ونظراً إلى الأهمية الإستراتيجية لمحصول القمح، فقد سُلّط الضوء على المؤشرات التي تبين الأهمية النسبية لتطبيق نظام الزراعة الحافظة في محصول القمح فقط. يؤدي تطبيق نظام الزراعة الحافظة في حقول محصول القمح، تحت ظروف الزراعة المطرية، ضمن دورة زراعية مع المحاصيل البقولية (الحمص، والعدس، والبيقية)، مع مراعاة ترك قرابة 30 – 50% من بقايا المحصول فوق سطح التربة إلى تقليل تكاليف الإنتاج الزراعي بنحو 16%، وزيادة الإنتاجية بنحو 15.3%، وتقليل كمية الوقود المستهلكة بنحو 43%، وتقليل عدد ساعات العمل بنحو 32%، وتقليل كمية البذار المزروعة بنحو 17.7%، وزيادة الإيرادات بنحو 12.8%، وزيادة الربح بنحو 33%، وزيادة هامش الربح الاقتصادي بنحو 34.29% (الجدول، 35). تشير هذه النتائج بشكلٍ لا لبس فيه إلى الجدوى الاقتصادية من تطبيق نظام الزراعة الحافظة.

الجدول رقم (35): بعض المؤشرات الاقتصادية للدلالة على الأهمية النسبية لنظام الزراعة الحافظة (محصول القمح).

نوع الزراعة المؤشر	الزراعة الحافظة	الزراعة التقليدية	نسبة الفروقات (%)
التكاليف (ل.س/هـ)	13799	16419	16
الإنتاجية (كغ/هـ)	2210	1916	15.3
الوقود (ل/هـ)	29	51	43
ساعات عمل آلية (ساعة/هـ)	11	7.5	32
كمية البذار (كغ/هـ)	158	192	17.7
الإيرادات (ل.س/هـ)	44950	39820	12.8
الربح (ل.س/هـ)	31151	23401	33
هامش الربح الاقتصادي (نسبة مخرجات الإنتاج الزراعي إلى مدخلاته)	3.25	2.42	34.29

الاستنتاجات والتوصيات من تطبيق نظام الزراعة الحافظة في سورية

- يُعد نظام الزراعة الحافظة من النظم الزراعية الواعدة تحت ظروف الزراعة المطرية، للعديد من البيئات والأنواع المحصولية، لأنه يُسهم في تقليل تكاليف الإنتاج الزراعي، وزيادة الإنتاجية، ويقلل انبعاث غاز الكربون، نتيجة تقليل معدل أكسدة المادة العضوية (بسبب عدم الفلاحة)، وزيادة معدل تراكم المادة العضوية في التربة، وتقليل كمية الوقود المستهلكة لإنجاز العمليات الزراعية المختلفة.
- أدى تطبيق نظام الزراعة الحافظة إلى زيادة إنتاجية وحدة المساحة لجميع الأنواع المحصولية المختبرة، حيث ازدادت الإنتاجية بنحو 21.8%، 23.82%، 12.93% لمحاصيل القمح، والشعير، والعدس على التوالي.
- يُسهم تطبيق نظام الزراعة الحافظة في زيادة هامش الربح للمزارع، نتيجة زيادة نسبة مخرجات الإنتاج الزراعي إلى مدخلاته. ويتأتى ذلك من توفير أجور الفلاحة ونثر الأسمدة المعدنية قبل الزراعة، وتقليل معدل البذار، وتقليل كمية الوقود المستهلكة، وتقليل عدد ساعات العمل، وزيادة الغلة الاقتصادية بالمقارنة مع الزراعة التقليدية.
- ارتفاع نسبة الإقبال على الاستمرار بتطبيق نظام الزراعة الحافظة بين صفوف المزارعين (96%)، بسبب التوفير الكبير في تكاليف الإنتاج الزراعية ابتداءً من السنة الأولى، وتقليل حالات فشل المحصول، وتقليل عدد ساعات العمل.

• الاستمرار في نشر نظام الزراعة الحافظة، والتوسع ضمن مناطق بيئية لم تستهدف من قبل، لإيصال هذه التقانة إلى أكبر شريحة ممكنة من المزارعين، ولاسيما في مناطق الزراعة المطرية.

• زيادة مستوى الوعي والمعرفة بهذا النظام الزراعي لدى جميع المهتمين، ولاسيما المزارعين لضمان التطبيق السليم لنظام الزراعة الحافظة لتحقيق الفوائد المرجوة منه، من خلال الأيام الحقلية، والندوات العلمية، والنشرات الإرشادية، (الشكل، 36).

• تنفيذ الدورات التدريبية المعمّقة للعاملين في مجال الإرشاد الزراعي، لزيادة كفاءتهم في نقل هذه التقانة الزراعية الواعدة بالشكل الصحيح، وتسريع وتيرة تبني نظام الزراعة الحافظة.

• ضرورة إدماج نظام الزراعة الحافظة ضمن السياسات الزراعية الحكومية، وتقديم الدعم للمزارعين لتسهيل عملية شراء الآلات الزراعية المناسبة لهذا النظام الزراعي.

• تشجيع التصنيع المحلي لآلات الزراعة الحافظة، وفق المواصفات المناسبة لكل منطقة بيئية، لضمان إتاحتها بأسعارٍ مناسبة، لا تتجاوز 40 – 50% من أسعار الآلات المستوردة من الخارج، (الشكل، 36).

الشكل رقم (95):. انتشار تطبيق نظام الزراعة الحافظة في حقول المزارعين في مختلف المحافظات السورية، وأهمية تشجيع التصنيع المحلي للآلات الزراعية لضمان انتشار هذا النظام الزراعي الواعد.

جامعة دمشق
وقل رب زدني علما
Damascus University

الفصل الحادي عشر

التغيرات المناخية وتأثيرها في الإنتاج الزراعي

Impact of Climate Changes on Agricultural Production

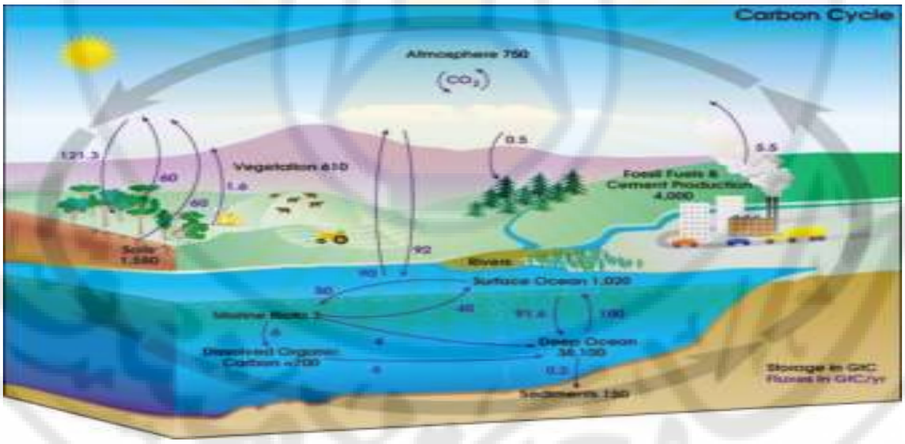
أصبح من المسلم به الآن أن مناخ الأرض يتغير, ومن المتوقع أن تزداد درجة حرارة الأرض بشكلٍ واضح خلال العقود القليلة القادمة, ويعزى السبب الرئيس لهذا التغيّر إلى ازدياد معدل انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2), وغازات أخرى، تسمى جميعها غازات الدفيئة، أو غازات البيت الزجاجي Greenhouse gases، ويُسمى التأثير الناتج عن هذه الغازات بتأثير البيت الزجاجي، لأنّ آلية عمل هذه الغازات تشبه إلى حدٍ كبير تلك التي تقوم بها الألواح الزجاجية في البيت الزجاجي.

يحدث تأثير البيت الزجاجي أو الصوب الزجاجية، بشكلٍ طبيعي بسبب وجود طبقة من الغازات التي تحيط بسطح الأرض، تسمح بمرور الأشعة الشمسية وخاصةً قصيرة الموجة، حيث تصل هذه الأشعة إلى سطح الأرض ويتم امتصاصها ويرتد جزء منها على شكل أشعة تحت الحمراء طويلة الموجة، ولكن يتم امتصاص هذه الأشعة المرتدة عن سطح الأرض الدافئ من قبل غازات معينة في الغلاف الجوي (بخار الماء،CO_2، N_2O، CH_4،O_3, ومركبات كلورفلور الكربون)، التي تسمح أيضاً بدورها بارتداد جزء من هذه الأشعة, ومن خلال هذه العملية من امتصاص وارتداد للأشعة الشمسية يعود جزء كبير من الأشعة الحرارية إلى سطح الأرض، ما يُسهم برفع حرارتها (الشكل، 96)، الأمر الذ يجعل متوسط درجة حرارة الأرض قرابة 15 درجة مئوية وذلك وفقاً للحسابات أعلى بـنحو 33 درجة مما كانت ستكون عليه درجة حرارة الأرض في حال عدم وجود تلك الطبقة من الغازات، ومن ثمّ فهي مهمة لضمان الحياة على سطح البسيطة.

الشكل رقم (96): تأثير الغازات الدفيئة في رفع درجة حرارة الأرض.

ارتفاع تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في الجو:

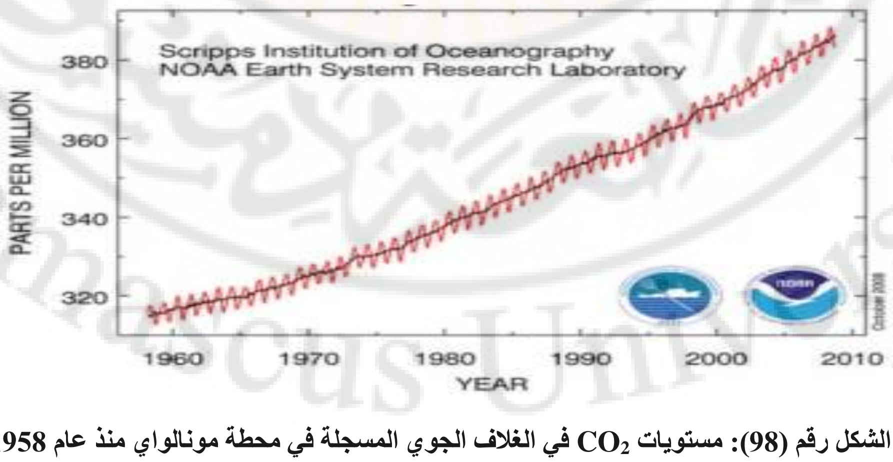
إنّ أهم الغازات المؤدية لارتفاع درجة حرارة الأرض هو غاز ثاني أكسيد الكربون، بسبب توافره بنسبة أعلى بكثير من بقية الغازات, ويتم انتقال هذا الغاز وتبادله بين مجموعة من المخازن الطبيعية للكربون تتمثل بكلٍ من الغلاف الجوي, والمحيطات والبحار والغلاف الحيوي ضمن ما يسمى بحلقة الكربون (الشكل، 97). ويتم ضمن هذه الحلقة تدوير نحو ربع كمية الكربون الموجودة في الغلاف الجوي أو تبادلها من الغلاف الجوي وإليه كل سنة, حيث يتم تبادل وانتقال نصف هذه الكمية مع النباتات والحيوانات على اليابسة عبر عمليتي التمثيل الضوئي والتنفس, في حين يتم تبادل النصف الآخر مع المحيطات عبر عمليات فيزيائية وكيميائية. ويتم انتقال هذا الغاز بين مخازنه الطبيعية ضمن هذه الحلقة عبر توازنٍ دقيق, وإن أي تغيير بسيط في المخزون الموجود في المحيطات أو في اليابسة (الذي هو أكبر بكثير من ذلك الموجود في الغلاف الجوي) سيؤدي إلى تغيرات كبيرة في الغلاف الجوي، فعلى سبيل المثال لو أنّ 2% فقط من الكربون المخزون في المحيطات تمّ تحريره, فإنّ مستوى غاز الفحم في الجو سيتضاعف.



الشكل رقم (97): يبين حلقة الكربون.

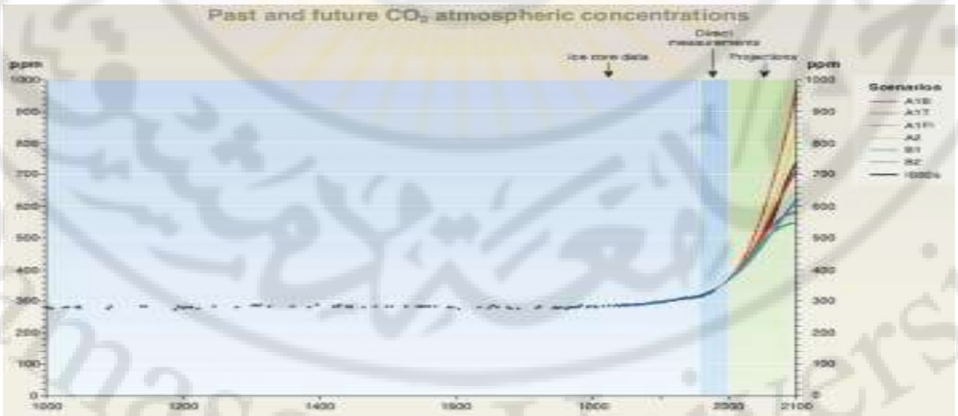
ارتفع تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بشكلٍ ملحوظ منذ قيام الثورة الصناعية (1750-1850), وتبين من دراسة الفقاعات الغازية من عينات الجليد الجوفية في القطب المتجمد الجنوبي أنّ تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون كان ثابتاً لعدة آلاف من السنين بمتوسط قدره 280 ppm حتى قيام الثورة الصناعية، حيث بدأ يزداد بعدها. هذا

وقد بيّنت القراءات الدقيقة والمتسلسلة المأخوذة من محطة مونالواي في هاواي منذ عام 1958 أنّ تركيز CO_2 في الجو قد ازداد من قرابة 307 ppm إلى 360 ppm في التسعينات، وإلى 379 ppm المسجلة في عام 2005 (IPCC,2007)، وإلى ما فوق 380 ppm حالياً (الشكل، 98). وهذه الزيادة في تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون هي ناتجة بشكلٍ أساسي عن ازدياد استهلاك الوقود الإحفوري وحرقه (الفحم الحجري, والنفط, والغاز) منذ منتصف القرن التاسع عشر، حيث تمّت ذلك إضافة كميات كبيرة من غاز الفحم إلى الغلاف الجوي, تقدّ بالمتوسط بنحو 20 Gt في الثمانينات, وارتفع إلى 23.5 Gt في التسعينيات, وإلى 26.4 Gt في الفترة ما بين 2000 و 2005، بالإضافة إلى ذلك فإنّ صناعة الاسمنت وحدها تضيف نحو 2-3% من مجموع انبعاثات غاز الفحم. ويؤدي أيضاً التغيير في استعمالات الأراضي, وإزالة الغابات واستبدالها بالحوليات والشجيرات الصغيرة إلى ازدياد انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في الجو، الذي يضيف نحو 9.5 Gt سنوياً. وتبعاً لتقارير FAO، فإنّ الغابات الموجودة حالياً تخزن ما يقارب 283 Gt في كتلتها الحيوية فقط, وتصل كمية الكربون المخزنة في كتلة الأشجار والخشب الميت والبقايا والتربة إلى ما يقارب تريليون طن، وهي أكبر بنحو 50% من كمية الكربون الموجودة في الغلاف الجوي. تمتص الغابات كمياتٍ كبيرة من انبعاثات غاز الكربون الناتجة عن حرق الوقود الإحفوري من خلال عملية التمثيل الضوئي وتخزن على شكل مركبات عضوية كربونية في الخشب والمجموع الخضري وفي الدبال، لذلك تُسهم إزالة الغابات في عدم امتصاص كمية كبيرة من انبعاثات غاز الكربون إلى الغلاف الجوي، بالإضافة إلى ذلك فإنّه عند إزالة الغطاء النباتي في الغابات فإنّ التربة تكون معرّضة بشكلٍ أكبر لدرجات حرارة مرتفعة، ما يزيد من معدل تحلل المادة العضوية فيها، ومن ثمّ انبعاثات غازات الدفيئة إلى الغلاف الجوي.



الشكل رقم (98): مستويات CO_2 في الغلاف الجوي المسجلة في محطة مونالواي منذ عام 1958.

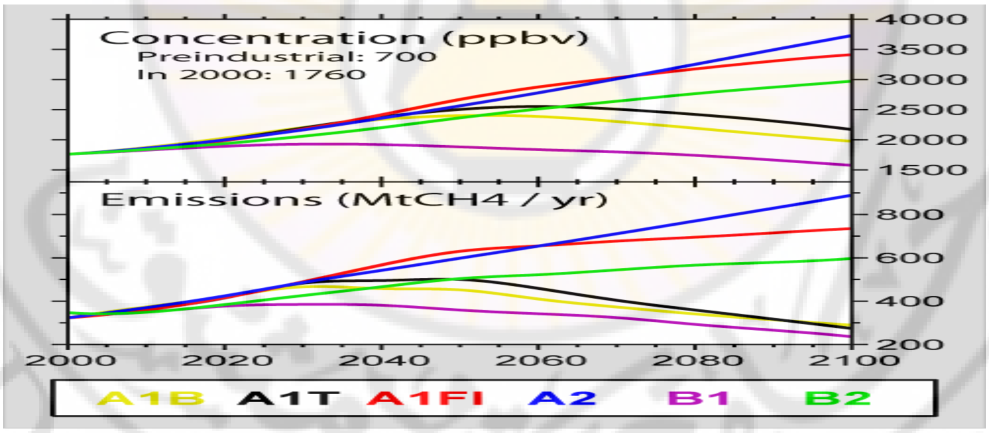
إنّ قرابة 40-50% من انبعاثات غاز الفحم يتم امتصاصها من قبل المحيطات التي تؤدي دوراً مهماً في الحفاظ على توازن الكربون. وإنّ التوازن بين تركيز CO_2 في الجو والطبقة السطحية من الماء تحكمه قوانين كيميائية، حيث أنّه في حال حدوث تغيير في مستوى الكربون في الغلاف الجوي بمقدار 10% فإنّ مستواه في الطبقة السطحية من ماء المحيطات يتغير بمقدار 1%, وهذا يُسهم إلى حدٍ ما في امتصاص جزء من انبعاثات CO_2. ولكن يأخذ امتصاص CO_2 في الطبقات الأعمق من الماء وقتاً أطول، وكذلك فإن مزج الماء بين طبقات الماء السطحية والعميقة يحتاج إلى مئات بل وآلاف السنين أحياناً، لذلك لا تُعد المحيطات مصبّات آنية لانبعاثات غاز الفحم المتزايدة. ومن أجل تقدير التغيّر المتوقع نتيجة استمرار الانبعاثات من غاز الفحم والغازات الدفيئة الأخرى, فقد تمّ وضع العديد من السيناريوهات التي تبين المستويات المتوقعة لهذه الغازات تحت العديد من المعطيات والظروف الممكن حصولها خلال القرن الواحد والعشرين, وأهم هذه السيناريوهات وأحدثها هي تلك المقدمة من قبل Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيّر المناخ)، التي تدعى SRES Scenarios، التي نُشرت في التقرير الخاص حول سيناريوهات انبعاث الغازات (Special Report on Emission Scenarios) في عام 2000، التي اعتمدت لاحقاً في التقرير التقييمي الثالث في عام (2001)، والرابع في عام (2007) (الشكل، 99). وبناءً على هذه السيناريوهات فإنّه من المتوقع أن يزداد تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي لغاية العام 2100 بحيث يكون تركيزه ضمن مدىً يتراوح منppm 540 إلى ppm 970.



الشكل رقم (99): مستويات CO_2 السابقة من العام 1000 ولغاية العام 2000 المأخوذة من قراءات الفقاعات الغازية المحبوسة في الجليد, ويبين أيضاً المستويات المتوقعة لغاية عام 2100.

انبعاثات غاز الميثان (CH_4):

الميثان هو المكون الرئيس للغاز الطبيعي, وتأتي انبعاثات هذا الغاز من مصادر طبيعية وأخرى ناتجة عن النشاطات البشرية. يأتي 60 % من انبعاثات غاز الميثان عن مصادر بشرية مثل مناطق ردم النفايات أو طمرها، والمناجم، والعمليات التي تعتمد على الغاز والنفط، ومن زراعة محصول الأرز (التحلل اللاهوائي للمادة العضوية), وتربية الحيوانات، وما ينتج عنها من المخلفات الحيوانية, وتخمير السماد الحيواني، في حين يأتي 40% من انبعاثات الغاز من مصادر طبيعية وبشكلٍ رئيس من المستنقعات، وهيدرات الغاز (مواد صلبة بلورية مكوّنَة من جزئيات الميثان كل منها مطوق بجزئيات من الماء)، والأراضي الرطبة Wetlands، حيث تحتوي أنواع من البكتيريا التي ينتج عنها غاز الميثان, والنمل الأبيض, والحرائق الطبيعية وغيرها. وقد ازدادت مستويات غاز الميثان بشكلٍ ملحوظ منذ قيام الثورة الصناعية, فقد ازداد من نحو 700 ppbv إلى 1760 ppbv في العام 2000، ومن المتوقع أن يزداد تركيزه خلال العقود القليلة القادمة. ويوضح (الشكل، 100) السيناريوهات المتوقعة لانبعاثات هذا الغاز وتركيزه لغاية العام 2100 من قبل الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيّر المناخ (IPCC).



الشكل رقم (100): يوضح السيناريوهات المقدمة من قبل الـ IPCC لانبعاثات وتركيز غاز الميثان في الغلاف الجوي لغاية العام 2100.

انبعاثات غاز أكسيد النتروز (N_2O):

تأتي انبعاثات N_2O من مصادر طبيعية وأخرى بشرية. وتتمثل المصادر البشرية بالنقاط الآتية:

• الممارسات الزراعية المتعلقة بالتربة، التي تتضمن إضافة مواد عضوية (حيوانية، ونباتية) تحتوي على الآزوت (النيتروجين)، أو إضافة السماد الآزوتي بشكلٍ مباشر, حيث تزداد كمية N_2O المفقودة عبر عمليات التأزت Nitrification, ونزع النتروجينات Denitrification.

• مصادر بشرية أخرى تتضمن معالجة المياه العادمة, وحرق الوقود, وإنتاج حمض النتريك.

• المصادر الطبيعية، تأتي بشكلٍ أساسي من مصادر حيوية في التربة أو المياه، ولاسيما نشاط الأحياء الدقيقة في الغابات الرطبة الاستوائية.

تبعاً لتقارير الـ IPCC فقد ازداد تركيز أكسيد النيتروجين الثنائي من 270±7 ppbv قبل قيام الثورة الصناعية إلى 319±12 ppbv في 2005.

وبشكلٍ عام، فإنّ السيناريوهات المقدمة من قبل الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيّر المناخ أو غيرها من السيناريوهات المقدمة من مراكز بحثية أخرى كلها تشير إلى أنّ تركيز غاز الفحم والغازات الدفيئة الأخرى سيزداد خلال العقود القليلة القادمة. وسيؤدي الارتفاع في مستوى انبعاثات غاز الفحم وغيرها من الغازات الدفيئة إلى ارتفاع درجة حرارة الأرض, وتبعاً لتقارير الـ IPCC فأنه حتى العام 2100 سيتراوح هذا الارتفاع بين 1.8 و 4 درجة مئوية, وذلك ممكن أن يكون له آثار كارثية، حيث سيؤدي ذلك إلى تمدد مياه المحيطات وذوبان سريع للجبال والصفائح الجليدية في القطب الجنوبي، ما يؤدي إلى ارتفاع مستوى سطح البحر بين 18 و 59 سم، تبعاً لتقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيّر المناخ. وهناك تقارير لمنظمات أخرى كاللجنة الدولية لأبحاث القطب الجنوبي تشير إلى أنّ مستوى سطح البحر سيرتفع بمقدار 1.4 متر بحلول عام 2100 إذا استمرت درجات الحرارة في الارتفاع بمعدلاتها الحالية، الأمر الذي يمكن أن يؤدي إلى إغراق جزر مثل المالديف في المحيط الهندي، وتوفالو في المحيط الهادئ، ويدمر مدناً ساحلية مثل كلكتا وداكا، ويفرض على لندن ونيويورك وشنغهاي أن تنفق المليارات على إجراءات الحماية من الفيضانات. وإذا لم تتم حماية السواحل فإنّ الفيضانات الناتجة عن ارتفاع مستوى سطح البحر ستزداد لعشرة أضعاف أو أكثر بحلول العام 2080، ما سيؤثر في 100 مليون نسمة سنوياً. وسيكون سكان مناطق مثل الدلتا عرضةً لهذه العوامل أكثر من غيرهم، إذ أنه سيتسبب ارتفاع مستوى سطح البحر في زيادة ملوحة المياه الجوفية ومصبات الأنهار، وهو ما يعني انخفاض كمية المياه العذبة

المتوافرة للإنسان. وسوف يتسبب التغير المناخي في زيادة استفحال بعض الظواهر المناخية مثل موجات الحر والجفاف والفيضانات والأعاصير Hurricans.

من جهة أخرى، أصبحت بعض أجزاء الكرة الأرضية تتعرض لتساقط كمية أكبر من الأمطار، إذْ تُشير كثير من الدراسات إلى أنّه خلال الفترة من عام 1900 حتى 2005، ازداد هطول الأمطار بدرجة ملحوظة في المناطق الشرقية من أمريكا الشمالية والجنوبية، وفي شمال أوروبا وشمال ووسط آسيا, في حين باتت بالمقابل بعض أجزاء من الكرة الأرضية أكثر جفافاً، حيث انخفض معدل هطول الأمطار في منطقة البحر المتوسط، وإفريقيا الجنوبية وأجزاء من جنوب آسيا. وبحسب بيانات اللجنة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ IPCC، فإنّ المناطق المتأثرة بالجفاف قد ازدادت منذ فترة السبعينيات. عموماً، سيؤدي تراجع معدل الهطول المطري إلى زيادة شدة الإجهاد المائي، ولاسيما في نظم الزراعة الجافة في بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط، ما سيؤدي إلى تراجع غلة العديد من الأنواع المحصولية، وسيخرج جزء كبير من الأراضي الزراعية من نطاق الاستثمار الزراعي، الأمر الذي يؤدي إلى تهديد الأمن الغذائي في هذه المناطق، وأهمها إفريقيا. انطلاقاً من ذلك، فلابد على جميع الدول العمل على الحد من مستوى انبعاثات غازات الدفيئة وخاصةً غاز الفحم لتقليل الآثار الكارثية المتوقعة في حال استمر الوضع كما هو عليه حالياً. وفي الواقع حتى لو تمّ الحد من مستوى الانبعاثات إلى أقصى حد فإنّ مستوى غاز الفحم سيزداد حتى نهاية القرن، ولو أنّه سيكون بمستويات أقل (540 ppm)، ولابد لهذا الارتفاع المتوقع في مستويات غاز ثاني أكسيد الكربون من أن يكون له تأثير مباشر في إنتاجية المحاصيل الزراعية من خلال تأثيره المباشر في عملية التمثيل الضوئي وتصنيع المادة الجافة. وسيختلف تأثير غاز الفحم باختلاف الأنواع النباتية (ثلاثية أم رباعية الكربون)، وباختلاف المجموعات النباتية، والأصناف ضمن الأنواع, وستتأثر استجابة النباتات بالظروف البيئية المحيطة.

تأثير ارتفاع غاز ثاني أكسيد الكربون في عملية التمثيل الضوئي:

في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون (كالقمح, والشعير, والعدس, والشوندر السكري ..الخ.)، التي تشكل نحو 90% من الأنواع النباتية على وجه الأرض, يتم إرجاع الكربون إلى كربوهيدرات عبر سلسلة من التفاعلات تُسمى حلقة إرجاع الكربون، أو حلقة كالفن. وإن تفاعل ضم CO_2 إلى المستقبل الأولي (RuBP) Ribulose 1,5 biphosphate في هذه الحلقة يتوسطه الأنزيم المسمى روبيسكو Rubisco (RuBP-carboxylase/oxygenase)، الذي يتميز أيضاً بقدرته على ضم الأوكسجين, ويؤدي

إلى حدوث ما يُسمى بالتنفس الضوئي Photorespiration, الذي يتم فيه استهلاك O_2وانطلاق CO_2 بوجود الضوء. وعلى الرغم من أنّ الأنزيم روبيسكو يفضل أو ينجذب بشكلٍ أكبر لغاز الفحم, فإنّ وجود O_2 بنسبة أكبر بكثير من CO_2 يؤدي إلى حدوث التنفس الضوئي بنسبة عالية، ولاسيما عندما يكون تركيز CO_2 داخل الأوراق منخفضاً في حال انغلاق المسامات لمنع فقد الماء بالنتح تحت ظروف الإجهاد المائي والحرارة المرتفعة. تتم في عملية التنفس الضوئي إضافة الأكسجين بدلاً من الكربون إلى RuBP بوساطة الأنزيم روبيسكو، وينتج عن ذلك تشكل مركب 3-phosphoglycerate الذي يدخل في حلقة كالفن ومركب 2-phosphoglycolate الذي يُعد مركباً ساماً للنبات، ويثبط عملية التمثيل الضوئي إذا تراكم بكمياتٍ كبيرة, لذلك لا بد للنبات من تحويله إلى مادة غير سامة, ويتم ذلك من خلال إدخال هذا المركب عبر سلسلة كبيرة من التفاعلات تتم عبر ثلاثة مكونات خلوية هي الصانعة الخضراء, والبيروكسيزم, والمتيتوكوندرية, ويتشكل في النهاية مركب Glycerate الذي يعود إلى الصانعة الخضراء، حيث تتم فسفرته إلى مركب 3-phosphoglycerate الذي يدخل من جديد في حلقة كالفن, ويتم خلال هذه التفاعلات فقد جزيء من غاز الفحم لكل جزئيتي أوكسجين تدخلان التفاعل مع روبيسكو. وللحصول على مركب 3-phosphoglycerate فإنه يتم استهلاك طاقة كبيرة مقدارها 2ATP و1NADH. وبالتالي فإنّ عملية التنفس الضوئي تخفض من كفاءة عملية التمثيل الضوئي من خلال ثلاث طرائق: هدر الكربون، ويتراوح هذا الهدر للكربون بين 20-50%, واستهلاك طاقة إضافية لا يتم استعمالها في عملية التمثيل الضوئي, وتنخفض فعالية الأنزيم RuBp-Carboxylase نتيجةً لذلك. بشكلٍ عام, عند درجة حرارة 25م° فإنّ التنفس الضوئي في النباتات ثلاثية الكربون يستهلك 25% من الكربون اللازم لعملية التمثيل الضوئي، وهذا يؤدي إلى خفض كفاءة التمثيل الضوئي بحوالي 40%. تتميز النباتات رباعية الكربون وكذلك نباتات CAM بامتلاكها آليات لتركيز غاز ثاني أكسيد الكربون عند المواقع الفعّالة للأنزيم روبيسكو, وهذا يؤدي إلى عدم حدوث التنفس الضوئي في هذه النباتات التي تحافظ على نسبة مرتفعة من غاز الفحم إلى الأوكسيجين. ويتم في النباتات رباعية الكربون إضافة غاز الكربون إلى المستقبل الأولي Phosphoenol pyruvate في خلايا النسيج المتوسط لتشكيل الأحماض العضوية رباعية الكربون (حمض الماليك، أو حمض الأسبارتيك), ومن ثمّ يتم نقل هذه الأحماض إلى خلايا الحزم الوعائية حيث يتم نزع غازالفحم منها، ويدخل في حلقة ارجاع الكربون أو حلقة كالفن، وبالتالي تقوم النباتات رباعية الكربون بعملية نقل لغاز الفحم من الوسط المحيط إلى المواقع الفعّالة للأنزيم روبيسكو، حيث يتم ضم غاز الفحم إلى المستقبل الأولي RuBp في خلايا الحزم الوعائية, وتسمح هذه العملية بزيادة تركيز

CO_2 ضمن الحزم الوعائية، بحيث يكون تركيزه أكثر بنحو 3-10 مرات من تركيزه في الوسط المحيط بالنباتات، وهذا يعمل على منع حدوث التنفس الضوئي .

يلاحظ مما تقدم، أنّ النباتات ثلاثية الكربون هي المستفيد الأكبر من الارتفاع المتوقع لتركيز CO_2 في الغلاف الجوي على عكس النباتات رباعية الكربون التي من المتوقع أن تكون استجابتها ضعيفة أو معدومة نظراً إلى وجود ثاني أكسيد الكربون عند حدود الإشباع عند المواقع الفعّالة للتمثيل الضوئي في هذه النباتات. ولمعرفة مدى استجابة النباتات والمحاصيل المختلفة لارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون, فقد نفذت العديد من التجارب على العديد من المحاصيل والأنواع النباتية تحت ظروف بيئية مختلفة, وأظهرت بشكل عام هذه التجارب أنّ مضاعفة المستويات الحالية لغاز CO_2 ستؤدي إلى زيادة غلة الأنواع النباتية ثلاثية الكربون بمتوسط قدره 35%, ووصلت الزيادة أحياناً إلى 75% في بعض الأنواع النباتية، لذلك سمي ارتفاع تركيز غاز الفحم بالتسميد الكربوني CO_2-enrichment. ولكن لا بد من الإشارة إلى أنّه على المدى الطويل يمكن أن يؤدي التعرض لمستوياتٍ مرتفعة من CO_2 لفتراتٍ طويلة إلى ما يُسمى بظاهرة تأقلم التمثيل الضوئي Photosynthetic acclimation، حيث تتراجع كفاءة التمثيل الضوئي مع مرور الوقت إلى مستوياتٍ قريبة من المستويات الحالية. ولكن غالباً ما لوحظت هذه الظاهرة في النباتات المزروعة في أصص زراعية صغيرة الحجم نسبياً، حيث يكون نمو الجذور وتطورها، وعدد الأجزاء الثمرية في هذه النباتات وحجمها بشكلٍ عام أقل منه في البيئة الطبيعية أو الحقل, الأمر الذي يحد من حجم المصبات للمواد المصنّعة بعملية التمثيل الضوئي والمتزايدة تحت المستويات المرتفعة لـ CO_2، ما يؤدي إلى تراكم النشاء في الأوراق وبالتالي تقليل كفاءة التمثيل الضوئي نتيجة لتراكم المنتج النهائي End product inhibition، وعدم استخدامه في عملية النمو. و في الواقع، لم تُلحظ ْهذه الظاهرة بشكلٍ كبير في التجارب الحقلية (Jacob et al., 1995). وأوضح Arp (1991) أنّ مقدار الانخفاض في كفاءة التمثيل الضوئي مع الوقت كان أقل في الأصص الأكبر حجماً التي تزيد عن 3500 سم^3. وهذا الأمر تم تأكيده من قبل (Thomas and Strain, 1991) في تجربة على القطن تحت المستويات المرتفعة من CO_2, حيث إنه عندما تم نقل النباتات من الأصص الصغيرة نسبياً والتي ظهرت فيها ظاهرة تأقلم التمثيل الضوئي, إلى أصص أكبر حجماً فإنّ معدل التمثيل الضوئي ارتفع مجدداً خلال أربعة أيام فقط, ما يؤكد أن هذه الظاهرة مرتبطة بشكلٍ وثيق بحجم المصب (الجذور، والأجزاء الاقتصادية). ولوحظ أنّ ظاهرة تأقلم التمثيل الضوئي عند التراكيز المرتفعة من CO_2 تترافق مع نقص في مستوى الأنزيم روبيسكو داخل الأوراق, ويختلف تفسير الأسباب المؤدية لهذا التناقص, فالبعض يقول: إنّ ذلك مرتبط مع تغيّر في توجيه المصادر(نواتج

التمثيل الضوئي) المتاحة، حيث تعمل النباتات على تسخير كمية أكبر من نواتج التمثيل الضوئي لزيادة عدد المصبات وحجمها من أجل إعادة التوازن بين حجم المصدر والمصب Source to sink ratio (Stitt and Schulze, 1994)، أو أنّ الأنزيم يعمل بشكلٍ عالي الفعالية فيقوم النبات باستخدام المواد الداخلة في تركيبه لأجل تصنيع مركبات أخرى تكون محددة لعملية التمثيل الضوئي أو غيرها من العمليات الاستقلابية في النبات (Sage, 1994). وعدّ Stitt (1991) أنّ تراكم النشاء في الصانعات الخضراء تحت المستويات المرتفعة من غاز الفحم غير كافٍ وحده لتفسير تناقص معدل التمثيل الضوئي, بالرغم من أنّ هناك دراسات أشارت إلى انخفاض في معدل التعبير المورثي لـ mRNA للوحدات الصغرى في الأنزيم روبيسكو تحت تأثير تراكم المنتج النهائي (السكريات) في النبات (Van Oosten and Besford,1994).

إنّ المصادر المتاحة للنبات وبشكلٍ خاص العناصر المعدنية وأهمها الآزوت والفوسفور يمكن أن تصبح محددة للنمو بشكلٍ كبير عند المستويات المرتفعة من CO_2, وأشارت تجارب عديدة إلى وجود ارتباط وثيق بين محتوى الأوراق من الآزوت وظهور ظاهرة تأقلم التمثيل الضوئي، حيث تزداد هذه الظاهرة وضوحاً كلما انخفض مستوى الآزوت في الأوراق (Jacob *et al*., 1995). وإنّ للفوسفور المعدني دوراً مهماً في فسفرة العديد من المركبات أثناء تصنيع الكربوهيدرات, وله دور مهم أيضاً في تنظيم انتقال مركب Trios phosphate بين الستوبلاسما والصانعة الخضراء، وهو المركب الأساسي في تصنيع السكريات وبالتالي في تنظيم توزيع الكربون بين تصنيع النشاء (في الصانعة الخضراء) والسكروز في السيتوبلاسما، وسيؤدي انخفاض تركيز الفوسفور المعدني إلى تناقص في معدل تصنيع السكروز في السيتوبلاسما، وبالتالي سيتراكم النشاء في الصانعة الخضراء, وهذا يؤدي إلى خفض معدل التمثيل الضوئي نتيجة لتراكم المنتج النهائي. ولكن لا بد من الإشارة إلى أنّه بالرغم من حدوث ظاهرة تأقلم التمثيل الضوئي في معظم الحالات المدروسة، ولاسيما في تجارب الأصص، فإنّ هذا الانخفاض في كفاءة التمثيل الضوئي لم يؤدِ إلى انخفاض معدل صافي التمثيل الضوئي (NAR), وهناك دراسات كثيرة جداً أشارت كلها إلى أنّ تضاعف تركيز CO_2 أدى إلى زيادة مستوى التمثيل الضوئي بين 20-50%.

تأثير ارتفاع غاز ثاني أكسيد الكربون في الناقلية المسامية, وكفاءة استعمال المياه والنتح:

تُعد المسامات هي الممر الوحيد الذي يتم من خلاله انتشارDiffusion غاز ثاني أكسيد الكربون, وفي الوقت نفسه خروج الماء على هيئة بخار ماء عبر عملية النتح. ويشكل

انغلاق المسامات تحت ظروف الإجهاد المائي, خط الدفاع الفيزيولوجي الأول في النباتات المعرّضة للإجهاد, ما يؤدي إلى تقليل الماء المفقود بعملية النتح، ويزيد من كفاءة استعمال المياه (WUE) (كمية المادة الجافة المُصنّعة (غ)/ كمية الماء المنتوحة (كغ))، ولكن سيكون ذلك على حساب كمية المادة الجافة المصنُّعة, حيث إنّ انغلاق المسامات سيعيق انتشار غاز ثاني أكسيد الكربون, ما يؤدي إلى تراجع تركيز غاز الفحم ضمن مراكز تثبيت الكربون في الصانعات الخضراء، وبالتالي تراجع معدل التمثيل الضوئي Assimilation rate (Ball and Passioura, 1995).

أشارت الكثير من الدراسات إلى تناقص درجة انفتاح المسام تحت التراكيز المرتفعة لغاز الفحم, والآلية الضابطة لهذه الاستجابة غير واضحة تماماً, ولكن يُعتقد أنّ لذلك علاقة بتصنيع المالات التي لها دور منظم لنقل الأنيونات في الأغشية البلاسمية للخلايا الحارسة. ولكن هل يحد هذا الانغلاق للمسامات تحت المستويات المرتفعة من غاز الفحم الجوي من معدل التمثيل الضوئي؟ إنّ معدل التمثيل الضوئي مرتبط بتركيز غاز الفحم داخل الأوراق, وفي الظروف الحالية عادة ما تكون النسبة بين تركيز CO_2 داخل الأوراق (C_i) وتركيزه الخارجي في الوسط المحيط بالأوراق (C_a) نحو 0.70 ويكون معدل التمثيل الضوئي عند C_i قرابة 0.90 منه عند التركيز الخارجي ($AC_i = 0.90\ AC_a$), لذلك يمكن استخدام التناسب C_i/C_a كمقياس للمقارنة, فإذا ما انخفضت هذه النسبة عند المستويات المرتفعة لغاز الفحم بالمقارنة مع المستويات الحالية، فإنّ ذلك يُشير إلى أنّ انغلاق المسامات الناتج عن ارتفاع تركيز غاز CO_2 يحد من معدل التمثيل الضوئي. وفي هذا المجال، فقد أشارت دراسات عديدة على عدد كبير من الأنواع النباتية أنّ هذه النسبة لم تتغير تحت المستويات المرتفعة من CO_2 وبالتالي فإنّ هذا يؤكد على أنّ معدل التمثيل الضوئي سوف يزداد عند ارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ولن يتأثر بانخفاض نسبة انفتاح المسامات وانخفاض الناقلية المسامية. وإنّ الزيادة في معدل التمثيل الضوئي والمترافقة مع انخفاض كمية المياه المنتوحة سيؤدي بالضرورة إلى زيادة مباشرة في كفاءة استعمال المياه, وإنّ لهذه الاستجابة أهمية كبيرة في المناطق الجافة وشبه الجافة كمنطقة شرق البحر الأبيض المتوسط (Kaddour and Fuller, 2004). هذا وقد بيّن (Kimball and Idso, 1983) من دراسة 46 تجربة سابقة, أنّه بتضاعف تركيز CO_2 فإنّ معدل النتح سيتناقص بمتوسط قدره 34%, وستتضاعف بالمقابل كفاءة استعمال المياه. ولا بد من الإشارة هنا إلى أنّه ليس بالضرورة أن ينخفض معدل النتح من المجموع الخضري للنبات أو للغطاء النباتي، أو يحصل وفر للمياه المتاحة للغطاء النباتي بارتفاع تركيز غاز الفحم، ويعزى ذلك إلى حدوث زيادة واضحة في دليل المساحة الورقية (LAI) بنسبة قد تفوق الانخفاض في الناقلية المسامية. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ

ارتفاع تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون يؤدي إلى تغيرات في خواص الجذور, ولاسيما في البيئات المجهدة مائياً حيث يكون هناك كمية أكبر من نواتج عملية التمثيل الضوئي متاحة للجذور, ما يزيد من معدل نمو الجذور وتطورها, ومن ثمَّ تغلغلها وانتشارها في التربة, الأمر الذي يزيد من كفاءتها في امتصاص الماء, فتزداد إنتاجية المياه Water productivity (Chaves and Pereira, 1992). وفي الحقيقة, فإنّ كل الأبحاث التي درست استجابة الجذور لارتفاع ثاني أكسيد الكربون, أشارت إلى تحسن نمو الجذور في النباتات النامية في البيئات الغنية بغاز CO_2, فقد ازداد نمو جذور نباتات القمح في كافة مراحل النمو, وتمّ الوصول إلى النمو الأعظمي لها بشكلٍ أسرع في النباتات النامية تحت المستويات المرتفعة من غاز الفحم بالمقارنة مع النباتات النامية تحت المستويات الحالية له (Chaudhuri *et al* ., 1999). كذلك الأمر، فقد ازدادت كتلة الجذور وطولها في نباتات القطن والبرسيم والعدس وغيرها من الأنواع النباتية في البيئات الغنية بغاز الفحم.

تأثير ارتفاع تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في عملية التنفس:

كما هو معروف, فإنّ عملية التنفس مهمة جداً لأجل نمو كافة الأنسجة في النبات وصيانتها, ولها دور كبير في الحفاظ على توازن الكربون سواء على المستوى الخلوي, أو على مستوى النبات الكامل, أو على مستوى النظام البيئي, حيث تترافق عملية التنفس التي يتم بوساطتها أكسدة نواتج عملية التمثيل الضوئي من أجل إنتاج الطاقة مع تحرير لغاز ثاني أكسيد الكربون, ولهذا فإنّ لتنفس النباتات في النظام البيئي دوراً مهماً في دورة الكربون. ويتم تبادل نحو 120 Gt من الكربون سنوياً بين النظام البيئي الأرضي والغلاف الجوي عبر عمليتي التمثيل الضوئي والتنفس, ونحو نصف كمية الكربون المثبتة عبر عملية التمثيل الضوئي يتم فقدها إلى الغلاف الجوي عبر تنفس النباتات. وكان الاعتقاد السائد أنّ ازدياد معدل التمثيل الضوئي نتيجة ارتفاع تركيز CO_2 سيؤدي إلى ازدياد معدل التنفس, ولكن هناك كم كبير من المراجع يُشير إلى حدوث العكس, حيث لوحظ في معظم الحالات انخفاض معدل التنفس في النباتات النامية تحت مستوياتٍ مرتفعة من غاز ثاني أكسيد الكربون بمعدلٍ وسطي تراوح بين 15-20 % عند ضعف التركيز الحالي لغاز الفحم (Amthor, 1998). وفسّر ذلك نتيجة للتأثير المباشر لارتفاع CO_2 في الأنزيمات التي تتوسط عملية التنفس, وبشكلٍ غير مباشر من خلال التأثير في التركيب الكيميائي للنبات. فعلى سبيل المثال, أشار ,.Gonza`lez-Meler et al, (1996) إلى أنّ مضاعفة المستويات الحالية لثاني أكسيد الكربون قد خفضت من فعّالية الأنزيم Succinate dehydrogenase والأنزيم Cytochrome C oxidase في الميتوكوندرية المعزولة من الجذور والفلقات في فول الصويا. ويشير البعض أيضاً إلى

أنّ ارتفاع CO_2 يمكن أن يؤدي إلى زيادة معدل تثبيت CO_2 أثناء الليل بوساطة الأنزيم Phosphoenolpyruvate carboxylase، الأمر الذي يقلل من كمية CO_2 المتبادلة التي يتم قياسها, وبالتالي يمكن أن يشير ذلك إلى انخفاض في معدل التنفس (Drake et al., 1999), ولكن لا بد من الإشارة هنا إلى أنّ دراسات عديدة بينت أنّ هذا التأثير كان محدوداً في عدد كبير من التجارب, وهناك أكثر من 600 قراءة للتبادل الغازي لـ CO_2 و O_2 الليلي في الأوراق لم يتبين فيها حدوث أي تبدل في هذا المعدل عند ارتفاع تركيز مستوى ثاني أكسيد الكربون الجوي. كذلك الأمر, لا بد من الأخذ بعين الاعتبار, أنّ ارتفاع تركيز CO_2 يؤدي إلى ازدياد فعّالية طرق غير مفسفرة بديلة لطريق أكسدة السيتوكروم Cytochrome oxidase الذي ينخفض بتأثير ارتفاع تركيز CO_2 في الجو, حيث إنّ هذه الطرق البديلة تخفض من فعّالية الطاقة الناتجة عن الطريق التأكسدي أو كفاءتها لدعم صيانة النبات ونموه (Gonzalez- Meler and Taneva, 2004).

تأثير ارتفاع تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في غلة النباتات ونوعيتها:

من الواضح أنّ ازدياد معدل التمثيل الضوئي نتيجةَ ارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون سيؤدي إلى ازدياد غلة النباتات, ولكن تختلف هذه الاستجابة باختلاف الأنواع النباتية والظروف البيئية المحيطة كالضوء, والحرارة, ومدى توافر الماء والعناصر المغذية ...الخ. وبشكلٍ عام, فإنّ متوسط الزيادة في غلة المحاصيل تبعاً لتقارير عديدة ستكون بين 30-40% "(Kimball, 1983). ومن الملاحظ أنّ هذه الزيادة في الإنتاجية هي أقل من تلك الملاحظة في معدل التمثيل الضوئي, ويمكن أن يكون السبب الرئيس في ذلك هو عدم استعمال كافة المواد المصنَّعة بعملية التمثيل الضوئي في عملية النمو, وبدلاً من ذلك تتراكم على شكل نشاء في الصّانعات الخضراء. وأشارت بعض الدراسات على خلاف ما هو متوقع إلى ارتفاع إنتاجية بعض الأنواع النباتية رباعية الكربون ضمن مدى تراوح بين 22-33%. في الواقع, من الصعب تحديد الآلية المؤدية لهذه الزيادة, ولكن لوحظ أنّ الاستفادة من ارتفاع تركيز غاز الفحم كانت تزداد بازدياد درجة جفاف التربة, وحدة التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط, وبارتفاع درجة حرارة الهواء, والشدة الضوئية, وكمية الآزوت المتاح. وكانت الزيادة أكثر وضوحاً في الأنواع العشبية بالمقارنة مع المحاصيل المزروعة، ولاسيما محصولي الذرة الصفراء والبيضاء, وهما المحصولان الأهم والأكثر دراسة من النباتات رباعية الكربون. وأشارت معظم الدراسات على هذين المحصولين إلى عدم حدوث أي تحسن في النمو بارتفاع تركيز CO_2 أو كان التحسن بسيطاً فقط وذلك تحت ظروف الزراعة المروية غالباً. ولكن يمكن أن يُحسّن ارتفاع CO_2 من نمو النباتات رباعية الكربون من خلال الطرق التالية:

1- رفع تركيز CO_2 داخل الأوراق وبالتالي زيادة معدل التمثيل الضوئي: بالرغم من أنّ تركيز CO_2 يقترب من حدود الإشباع عند المواقع الفعّالة للأنزيم, ولا تشير معظم القراءات التي يتم أخذها في مراحل متقدمة من حياة المحصول إلى حدوث تحسن كبير في معدل التمثيل الضوئي, إلاّ أنّ البعض يُفسر التحسن في معدل النمو إلى أنه ربما يكون ناتجاً عن ارتفاع معدل التمثيل الضوئي خلال المراحل الأولى من النمو, وبشكلٍ عام، يمكن تفسير تحسن النمو نتيجة ارتفاع تركيز CO_2 الداخلي في بعض النباتات رباعية الكربون من خلال آليات تتعلق:

- اختلاف مستوى التسرب من خلايا الحزم الوعائية Leakiniss (نسبة تسرب CO_2 من خلايا الحزم الوعائية إلى نسبة ضم CO_2 للمستقبل PEP)، حيث تزداد الاستجابة لارتفاع CO_2 بازدياد نسبة التسرب.
- أو من خلال حدوث التثبيت المباشر لـ CO_2 في خلايا الحزم الوعائية, ولكن حدوث ذلك يُعد قليلاً جداً، حيث إنّ خلايا الحزم الوعائية المُعرضة مباشرةً لـغاز الفحم الداخلي قليلة جداً, ورغم ذلك، يشير بعض العلماء إلى أنّ هناك 0-10% من CO_2 يتم تثبته مباشرةً في خلايا الحزم الوعائية.
- أو من خلال وجود آلية تثبيت CO_2 شبيهة بتلك في C_3 في الأوراق الحديثة النمو لبعض نباتات C_4, ولكن هناك دراسات تنفي حدوث ذلك.
- إنّ مستوى الإشباع من CO_2 في بعض الأنواع رباعية الكربون يمكن أن يزداد في حال زيادة مستوى السطوع الشمسي, وازدياد وفرة الآزوت وارتفاع درجة الحرارة, وبالتالي يمكن أن يزداد معدل التمثيل الضوئي بارتفاع تركيز CO_2.

- تحت ظروف الجفاف وانغلاق المسام, سيؤدي ارتفاع تركيز CO_2 في الجو إلى زيادة تركيز CO_2 الداخلي (C_i) وبالتالي رفع معدل التمثيل الضوئي.

2- خفض الناقلية المسامية وبالتالي خفض معدل النتح, وهذا يعمل على تحسين النمو من خلال الحفاظ على رطوبة التربة وتحسين حالة الأوراق المائية, ورفع درجة حرارة الأوراق: هذا التأثير مهم جداً في ظروف الإجهاد المائي, حيث وجد أنّ الجهد المائي للأوراق المُعرضة لمستوياتٍ مرتفعة من CO_2 كان أعلى من تلك تحت المستويات الحالية من CO_2, وهذا يسمح باستمرار النمو في الأوراق لفترةٍ أطول. ويؤدي الحفاظ على محتوى مائي عالٍ في الخلايا إلى ازدياد معدل التمثيل الضوئي من خلال الحفاظ على حجم خلية أكبر واستمرار العمليات الاستقلابية فيها. بالإضافة إلى ذلك, فإنّ انخفاض

معدل النتح يؤدي إلى ارتفاع حرارة الأوراق ما يُسهم في تحسين معدل التمثيل الضوئي في النباتات رباعية الكربون التي تُفضل درجات الحرارة المرتفعة (بين 30-40 °م).

3- يمكن أن يؤدي ارتفاع تركيز CO_2 كما في النباتات ثلاثية الكربون إلى خفض معدل التنفس الميتوكوندري، الأمر الذي يؤدي إلى رفع معدل صافي التمثيل الضوئي، وبالتالي معدل النمو, ولكن لا بد من الإشارة إلى أنّ الدراسات في هذا المجال قليلة جداً ولا يمكن الجزم في ذلك.

يمكن القول: إنّ الزيادة المسجلة في النمو لبعض الأنواع رباعية الكربون هي بشكلٍ أساسي نتيجة تحسين كفاءة استعمال المياه من خلال تقليل كمية الماء المنتوحة نتيجة الانغلاق الجزئي للمسامات تحت التراكيز المرتفعة لـ CO_2, وإنّ نسبة إسهام انخفاض كمية الماء المنتوحة في تحسين غلة النباتات رباعية الكربون إلى نسبة إسهام زيادة معدل التمثيل الضوئي تبعاً لدراسات عديدة هي 27:73 (73 لانخفاض معدل النتح).

تختلف استجابة الأنواع النباتية لارتفاع تركيز CO_2 باختلاف المجموعات النباتية, ويقترح البعض أنّ استجابة البقوليات ستكون أكبر من غيرها من المجموعات النباتية, وذلك لقدرتها على تأمين الكميات الإضافية من الآزوت اللازم للنمو المتزايد تحت المستويات المرتفعة من CO_2 من خلال تثبيت الآزوت الجوي في العقد البكتيرية (Reich *et al.* 1996). بالإضافة إلى ذلك، فإنّ العقد البكتيرية تشكل مصباً قوياً Strong sinksللكربون الإضافي الذي يتم تثبيته, ومن المعروف أنّ توافر مصبات قوية هو أمر ضروري لاستمرار الاستفادة من ارتفاع تركيز CO_2, لأنّ عدم توافر مصبات قوية سيؤدي إلى تراكم المواد المصنَّعة في الأوراق وعدم استعمالها في عمليات النمو, ما يؤثر سلباً في كفاءة التمثيل الضوئي، حيث تنخفض على المدى البعيد نتيجة التأثير المثبط لتراكم المنتج النهائي (Díaz, 1996).

أما بالنسبة إلى تأثير ارتفاع تركيز CO_2 في الصفات النوعية للنباتات، فغالباً ما تترافق الزيادة الكمية في الكتلة الحيوية والغلة الاقتصادية للأنواع النباتية بتناقص في المحتوى النسبي لهذه النباتات من الآزوت والعناصر المعدنية الأخرى (Colemen et al., 1993), ويزداد في المقابل محتواها من مركبات الكربون (نشاء) والمركبات الدفاعية كالتانين (Tannins). بشكلٍ عام، تختلف استجابة النباتات باختلاف الأنواع والأصناف النباتية, ومدى توافر متطلبات النمو اللازمة للنبات (Lindorth, 1996). في دراسةٍ أجريت على 27 نوعاً نباتياً من الأنواع ثلاثية الكربون, أشارت النتائج إلى أنّه عند التراكيز المرتفعة لـغاز CO_2 فإنّ محتوى النباتات من البروتين انخفض بمتوسط قدره

18%, والمحتوى من الآزوت الكلي انخفض بمقدار 21% , ومن النترات بمقدار 22%. بشكلٍ عام, لم تتأثر القيمة الغذائية للمنتجات المستهلكة من قبل الإنسان بشكلٍ كبير. فعلى سبيل المثال, فقد بيّن (Rogers *et a.l,* 1994) في تجربة أُجريت على كلٍ من فول الصويا والذرة, أنّ محتوى البذور المائي ومحتواها من الدهون والبروتين والألياف لم يتغير بشكلٍ معنوي تحت تأثير المستويات المرتفعة من CO_2 في الجو. كذلك الأمر في دراسة أخرى أجريت على البطاطا الحلوة, فلم تؤثر المستويات المرتفعة من CO_2 في نوعية البطاطا من ناحية المذاق (Bhattacharya, 1993).

التأثير المتبادل لارتفاع ثاني أكسيد الكربون والجفاف:

إنّ الجفاف هو من أهم العوامل التي تؤدي إلى نقص الغلة المحصولية عالمياً، ويعادل التأثير السلبي الناتج عن الجفاف بتأثيره التأثير الناتج عن بقية العوامل الأخرى مجتمعة (Kramer, 1980). كما ذكر سابقاً, نتيجة لزيادة انبعاثات غاز الفحم وغيرها من غازات الصوب الزجاجية, فإنّ درجة حرارة الأرض ستزداد, وفي مناطق عديدة سيؤدي ذلك إلى ازدياد شدة الإجهاد المائي فيها, ومن بينها منطقة شرق المتوسط. وعادةً ما تستجيب النباتات المعرضة للجفاف بإغلاق مساماتها ما يؤثر بشكلٍ سلبي في كمية CO_2 الداخلة عبر المسامات إلى المواقع الفعّالة في التمثيل الضوئي في الصانعات الخضراء وبالتالي يقل معدل التمثيل الضوئي (Fuller and Jellings, 2003). في الواقع إنّ انخفاض معدل التمثيل الضوئي نتيجة الإجهاد المائي يمكن أن يكون نتيجة لكلٍ من انغلاق المسامات وحدوث ضرر مباشر لنظام التمثيل الضوئي, وإنّ زيادة تركيز غاز CO_2 الخارجي سيؤدي إلى تقليل الأضرار الناتجة عن السبب الأول وهو انغلاق المسامات, ما يؤدي إلى تحسن معدل التمثيل الضوئي تحت ظروف الإجهاد المائي. وكما ذكر سابقاً سيؤدي ارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون إلى خفض الناقلية المسامية وتحسين كفاءة استعمال المياه من خلال زيادة معدل التمثيل الضوئي وتقليل معدل فقد الماء بالنتح, بالإضافة إلى ذلك، فإنّ كثافة الجذور وطولها وانتشارها سيزداد بازدياد تركيز ثاني أكسيد الكربون, ما يمّكن الجذور من امتصاص كمياتٍ أكبر من الماء على أعماق أكبر من التربة (Rogers *et al.*, 1999), كل ذلك سيحسن من نمو النباتات المعرضة للجفاف وإنتاجيتها. أشارت تقارير عديدة إلى أنه هناك دائماً زيادة في إنتاجية النباتات المعرضة للإجهاد المائي والنامية عند تراكيز مرتفعة من غاز CO_2 (Gifford, 1979). حتى إنّ بعض الأبحاث بينت أنّ الزيادة النسبية في الكتلة الحيوية وغلة البذور للعديد من المحاصيل نتيجة ارتفاع تركيز CO_2 كانت أكبر في النباتات المعرضة للإجهاد المائي منه في النباتات المروية (Idso and Idso, 1994). فعلى سبيل المثال, عندما

زرعت نباتات القمح في بيئة غنية بـ CO_2 عند مستوى 550 ppm فإنّ الغلة الحبية لكل وحدة ماء مفقودة ازدادت بمقدار 17% في النباتات المروية, في حين كانت الزيادة 33% في النباتات المجهدة مائياً. وفي تجربة أخرى أجراها Manderscheid and Weigel (2007) على القمح, فإنّ الزيادة النسبية في كل من الكتلة الحيوية والغلة الحبية لم تتجاوز 10% في النباتات المروية, في حين كان متوسط هذه الزيادة 44% تحت ظروف الجفاف. وفي دراسة أجريت على نباتات البرسيم الأبيض (*Trifolium repense*), فإنّ المستوى المرتفع من CO_2 (700 ppm) أدّى إلى ازدياد معدل صافي التمثيل الضوئي (NAR) في النباتات المروية بمقدار 50%, في حين كانت الزيادة النسبية في النباتات المجهدة مائياً 300% (Clark *et al., 1999*). وكذلك الأمر, فإنّ الزيادة النسبية لكلٍ من صافي التمثيل الضوئي والكتلة الحيوية وغلة القرون في نباتات الفول السوداني (*Arachis hypogaea* L.) النامية تحت تراكيز عالية من CO_2, كانت أكبر في النباتات المعرضة للإجهاد المائي منها في النباتات المروية. وقد لوحظت استجابات مماثلة في القطن وأنواع نباتية أخرى. وبشكلٍ عام، فإنّه من الممكن القول: إنّ الآثار السلبية للجفاف في نمو النباتات وغلتها سوف تتحسن عند نمو النباتات تحت تركيز مرتفع من CO_2 التي يمكن أن تصل إلى 970 ppm في نهاية هذا القرن, ولكن مدى الاستجابة سيختلف باختلاف الأنواع وحتى الأصناف النباتية والظروف البيئية المحيطة. ومن أجل الحفاظ على الأمن الغذائي مستقبلاً في ظل التغيرات المناخية, فيجب الاستمرار في تطوير الأصناف المتحملة للجفاف والحرارة المرتفعة ولكن ضمن الظروف التي يرتفع فيها تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون بحيث يتم الوصول إلى أصناف تبدي أعلى استجابة وأكبر إنتاجية تحت الظروف البيئية الجديدة المتوقعة.

التأثير المتبادل لارتفاع ثاني أكسيد الكربون ومدى توافر العناصر المغذية:

يؤدي النمو المتزايد للنباتات, وازدياد الكتلة الحيوية المتشكلة تحت المستويات المرتفعة من غاز ثاني أكسيد الكربون إلى استنزاف سريع للعناصر المعدنية المغذية الموجودة في التربة, وهذا ما دعا إلى الاعتقاد بأنّه على المدى البعيد سيؤدي نقص العناصر المغذية ولاسيما الآزوت إلى الحد من مدى الاستفادة من ارتفاع تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في الجو. وعادةً ما تترافق ظاهرة تأقلم التمثيل الضوئي بنقص في محتوى الأنسجة من الآزوت, وسيكون ذلك أكثر وضوحاً عند تناقص نسبة الآزوت ومدى توافره في التربة. وقد تمت دراسة التفاعل بين ارتفاع ثاني أكسيد الكربون ومدى توافر العناصر المغذية للنبات، وخاصةً الآزوت في عدد كبير جداً من التجارب. أشارت بعض هذه الدراسات إلى تحسن النمو تحت التراكيز المرتفعة لثاني أكسيد الكربون ضمن مدى واسع من مدى وفرة

الآزوت في التربة, ولكن هناك دراسات أشارت إلى انخفاض في الإنتاجية عند عدم توافر الآزوت بكمياتٍ كافية في التربة. ويعود هذا الاختلاف بشكلٍ أساسي إلى اختلاف الأنواع النباتية المدروسة, وإلى درجة نقص الآزوت أو مدى وفرته, وإلى طريقة إضافة الأسمدة المعدنية. بشكلٍ عام, فقد لُوحظ أنّه كلما ازدادت وفرة العناصر المغذية للنبات كانت استجابة النباتات لارتفاع ثاني أكسيد الكربون أكثر وضوحاً, حيث يزداد معدل نمو النباتات وغلتها بشكلٍ أكبر فيما لو كانت هذه العناصر أقل توافراً. فعلى سبيل المثال, فقد ازدادت غلة القطن من البذور في النباتات النامية عند مستوى 650 ppm بالمقارنة مع تلك النامية عند مستوى 330 ppm, بمقدار 56% و74% في النباتات المروية والمجهدة مائياً على التوالي عندما تمّت إضافة السماد الآزوتي, وعندما لم تتم أية إضافة سمادية, فقد ازدادت الإنتاجية أيضاً ولكن بنسبة أقل نسبياً حيث إنه تحت كانت الزيادة الظروف المروية قرابة 54%، في حين كانت 52% تحت ظروف الجفاف. وعادةً ما تزداد كفاءة النباتات في استعمال العناصر المغذية عند المستويات المرتفعة لـCO_2، فعلى سبيل المثال في دراسة أجريت على شجيرات من الآكاسيا المثبتة للآزوت الجوي (*Acacia auriculiformis* Cunn), أشارت النتائج إلى انخفاض معدل التمثيل الضوئي في النباتات النامية تحت المستويات الحالية لغاز ثاني أكسيد الكربون عندما تناقصت نسبة الفوسفور في التربة, في حين لم يلحظ ذلك الانخفاض عند زراعة النباتات عند مستوياتٍ مرتفعة من CO_2 (800 ppm), ما يشير إلى تحسن كفاءة النبات في استعمال الفوسفور عند ارتفاع تركيز CO_2. ولكن في حالاتٍ أخرى كان التركيز المنخفض للفوسفور محدداً لمعدل التمثيل الضوئي ولنمو النباتات، ولم يحسن ارتفاع مستوى ثاني أكسيد الكربون من أداء النباتات عند نقص الفوسفور (Campbell and Sage, 2005). بشكلٍ عام, في حال نقص العناصر المغذية ستكون استجابة النباتات لارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون أقل وضوحاً, وسيكون مدى توافر هذه العناصر عاملاً محدداً للنمو تحت المستويات المرتفعة من CO_2 بالرغم من أنّه غالباً ما تتحسن كفاءة النباتات في استعمال هذه العناصر المغذية.

بعض التأثيرات الناتجة عن ارتفاع درجة الحرارة وتأثيرها المتبادل مع ارتفاع تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في نمو وإنتاجية النباتات

كما ذكر سابقاً, فإنه من المتوقع أن تزداد درجة حرارة الأرض بمتوسط قدره 1.8- 4 م° مع نهاية هذا القرن, ولابد أن يكون لهذه الزيادة تأثير كبير في كلٍ من سلوكية الأنواع النباتية وإنتاجيتها، وتوزعها جغرافياً.

تؤثر الحرارة في كافة العمليات الحيوية والإستقلابية والفيزيولوجية في النبات, فهي تؤثر في عملية التمثيل الضوئي والتنفس, وفي امتصاص الماء والعناصر المغذية وفي النمو, وتكوين البراعم الزهرية, وتكوين الثمار والسنابل....الخ. على المستوى الخلوي مثلاً, تتأثر فعّالية الأنزيمات بشكلٍ كبير بالتغيرات التي تحصل في درجة الحرارة, فعلى سبيل المثال, عند ارتفاع درجة الحرارة تزداد فعّالية الأنزيم Phosphate-synthase في تصنيع السكروز في أوراق كل من البطاطا وفول الصويا, وتتناقص بالمقابل فعالية أنزيمات أخرى مثل أنزيم ADPG-phosphorylase المسؤول عن تصنيع النشاء في درنات البطاطا. إنّ استجابة النباتات لكلٍ من ارتفاع متوسط درجة الحرارة وزيادة تركيز CO_2 في الجو, هو معقد بعض الشيء, ويختلف ذلك باختلاف الأنواع النباتية المدروسة, ومدة التعرض للظروف البيئية الجديدة المطبقة, واختلاف الظروف البيئية للتجارب المطبقة. سيتم وبشكلٍ مختصر مناقشة أهم النقاط التي تتعلق بالتأثير المتبادل لارتفاع درجة الحرارة وارتفاع تركيز CO_2 على الأنزيم Rubisco وعملية التمثيل الضوئيPhotosynthesis, وعلى عملية النتح, والمراحل التطورية للنباتات.

إنّ الأنزيم Rubisco هو الأنزيم الرئيس في عملية التمثيل الضوئي, وفي النباتات ثلاثية الكربون يتنافس الأوكسجين مع غاز ثاني أكسيد الكربون على المواقع الفعالة للأنزيم. يزيد ارتفاع درجة الحرارة من انجذاب الأنزيم للأوكسجين بدرجة أكبر من انجذابه لـ CO_2, وارتفاع درجة الحرارة يزيد أيضاً من معدل انحلال O_2 بشكلٍ أكبر من CO_2 ضمن الصانعة الخضراء, ما يؤدي إلى زيادة معدل التنفس الضوئي على حساب التمثيل الضوئي. ولكن يؤدي ارتفاع تركيز CO_2 في الجو إلى ارتفاع تركيزه عند المواقع الفعّالة للأنزيم ما يزيد من معدل التمثيل الضوئي. بشكلٍ عام، فإنّ التأثير الأكثر مشاهدة لكل من ارتفاع تركيز CO_2 وارتفاع درجة الحرارة هو ازدياد معدل التمثيل الضوئي في النباتات ثلاثية الكربون ضمن المدى الحراري 20- 35 م° وهو عادةً المدى الأمثل لنمو معظم الأنواع النباتية. وأحد الأسباب الرئيسة المؤدية لتلك الاستجابة هو أنّ التنفس الضوئي يتناقص بشكلٍ يتناسب مع زيادة تركيز CO_2, والسبب الثاني يمكن أن يُفسر بأنّ كل من معدل الاستقلاب وحاجة المصبات للمواد الناتجة عن التمثيل الضوئي عادةً ما تكون أعلى عند درجات الحرارة المرتفعة (ولكن غير المجهدة للنبات)، وذلك يمنع تراكم نواتج التمثيل الضوئي في الأوراق ما يحسن من كفاءة التمثيل الضوئي بالمقارنة مع درجات الحرارة المنخفضة.

من المعروف أنّ كل من الناقلية المسامية ومعدل فقد المياه بالنتح ينخفض بشكلٍ ملموس عند المستويات المرتفعة من CO_2، ولكن يؤدي هذا أيضاً إلى تقليل التأثير المبرد للنتح،

ما يؤدي إلى رفع درجة حرارة الأوراق, وإن الارتفاع المتزايد في درجة حرارة الهواء سيؤدي إلى ازدياد الإرتفاع في درجة حرارة الأوراق ما يؤدي إلى انفتاح المسام وزيادة معدل النتح, وذلك يقلل من التأثير الإيجابي لارتفاع CO_2 في تقليل درجة انفتاح المسام ومعدل النتح ذي الأهمية الخاصة في المناطق الجافة.

تتأثر المراحل التطورية للنباتات أيضاً بشكلٍ كبير بدرجة الحرارة, وضمن المدى الحراري غير المجهد للنبات، فإنّ النبات عادةً ما يستجيب للحرارة بحيث إنه لايتم الانتقال من من مرحلة تطورية إلى أخرى إلاّ في حال تمّ تراكم قدر معين من درجات الحرارة تُسمى بالوحدات الحرارية (Heat units). وهذه تكون متوسطات الحرارة اليومية فوق درجة حرارة دنيا معينة تسمى base temperature, ومعرفة مقدار هذه الوحدات لكل محصول يمكننا من تقدير الوقت اللازم للوصول للإزهار والنضج. ولذلك فإنّ ارتفاع متوسط درجات الحرارة المتوقع حدوثه خلال العقود القليلة القادمة سيؤدي إلى تسريع الوصول إلى المراحل التطورية المختلفة للنبات، وبالتالي تقصير فترة مكوث المحصول في التربة، وبالتالي ستكون الغلة أقل وذلك نتيجة تقصير الفترة التي سيتم فيها تشكيل المادة الجافة خلال فترة النمو الخضري, وسيؤدي هذا التأثير السلبي إلى تقليل مدى الاستفادة من زيادة تركيز CO_2 في الجو, لذلك من المهم جداً الوصول إلى أصناف ذات فترة نمو طويلة نسبياً لتعطي أفضل النتائج في ظل الظروف المستقبلية المتوقعة التي يرتفع فيها كل من تركيز CO_2 ومتوسط درجة الحرارة. بشكلٍ عام, يمكن القول: إنّه ضمن المدى الحراري غير المجهد للنباتات سيؤدي ارتفاع تركيز CO_2 إلى زيادة ملحوظة في معدل نمو النباتات وانتاجيتها, ولكن بالمقابل ستكون هناك زيادة طفيفة فقط وغير ملموسة عند درجات الحرارة المجهدة سواء المنخفضة منها أو المرتفعة. فعلى سبيل المثال, لوحظ عند مضاعفة تركيز CO_2, فإنّ غلة القمح المزروع شتوياً عند متوسط درجة حرارة 12.5 م° ازدادت فقط بمتوسط قدره 7%, وإن زيادة درجة الحرارة بمعدل 2 م° لم يكن له تأثير كبير في استجابة النباتات لـ CO_2، في حين عند زراعة المحصول ربيعياً عند متوسط حرارة 20 م°, فإنّ متوسط الزيادة في الغلة نتيجة تضاعف مستويات CO_2 كان 34%. ولوحظ الأمر ذاته في تجارب أخرى على القمح وعلى محاصيل زراعية أخرى. وكذلك الأمر عند إجهاد الحرارة المرتفعة فإنّ مدى الاستفادة من ارتفاع تركيز CO_2 كان بسيطاً وفي بعض الأحيان كان معدوماً. فعلى سبيل المثال, لوحظ أنّ غلة الفول لم تزددْ عند مضاعفة تركيز CO_2 عند درجات حرارة أعلى من 35/12 (ليلاً/ نهاراً)، وذلك ليس بسبب تأثير الحرارة المباشر في عملية التمثيل الضوئي وإنّما بسبب تشكل عدد قليل من القرون عند درجات الحرارة المرتفعة، تؤثر درجات

الحرارة المرتفعة سلباً في درجة خصوبة الأزهار، ونسبة العقد فيها. بشكلٍ عام, فقد لوحظ أنّه عند درجات الحرارة المرتفعة فوق المثالية لنمو المحصول يحصل تراكم لنواتج التمثيل الضوئي في الأوراق بشكلٍ أكبر وذلك نتيجة تناقص المتطلبات على هذه المواد من المصبات النهائية لهذه المواد. عموماً، في ظروف الحرارة المرتفعة, لابد من البحث عن أصناف متحملة للحرارة تبدي استجابة أفضل لارتفاع تركيز CO_2 من الأصناف الأقل تحملاً.

عموماً, إن التأثير الناتج عن ارتفاع كل من درجة الحرارة وتركيز CO_2 واسع جداً ومعقد ولامجال هنا لذكر المزيد من التفاصيل, ولكن لابد من الإشارة إلى أنه لابد من إجراء المزيد من الأبحاث في هذا المجال بحيث يتم التوصل لأصناف متأقلمة مع الظروف الجديدة تكون متحملة للحرارة المرتفعة وظروف الجفاف، وتعطي غلة أعلى تحت التراكيز المرتفعة لغاز الفحم. ولابد من الإشارة أيضاً إلى أنّ معظم النتائج المستحصل عليها من التجارب المتعلقة بارتفاع تركيز CO_2 هي تجارب مخبرية أو نمت في بيت زجاجي, أو في غرف النمو، ولابد من القيام بتجارب حقلية للتأكد من صحة النتائج ومراقبة استجابة النباتات بشكلٍ أكثر دقة وواقعية.

التأثير المتبادل لارتفاع CO_2 وارتفاع تركيز الأوزون:

يتشكل الأوزون بشكلٍ طبيعي في طبقات الغلاف الجوي العليا التي تُسمى Stratosphere (على ارتفاع 15-35 كم)، حيث تعمل الأشعة فوق البنفسجية على فصل جزيء الأكسجين إلى ذرتي أكسجين مفرد Single oxygen atoms, ومن ثمّ كل ذرة مفردة ترتبط مع جزيء أوكسجين ليتشكل الأوزون O_3 الذي يُعد ذا قدرة تفاعلية عالية وهو الأوزون المفيد، حيث تعمل طبقة الأوزون هذه كطبقة واقية تقوم بفلترة الأشعة الشمسية الواصلة إلى الأرض من الأشعة فوق البنفسجية القصيرة الموجة المؤذية -UV B, UV-C، التي تُسبب حروقاً وسرطانات جلدية, وأضراراً كبيرة للنباتات والمحاصيل, وللحياة البحرية. وبالمقابل يزداد تركيز الأوزون في طبقات الغلاف الجوي الدنيا أو القريبة من سطح الأرض، التي تسمى التروبوسفير Troposphere (7-17 كم فوق سطح الأرض)، ويُعد الأوزون هنا أحد الملوثات الهوائية، وعلى عكس الغازات الأخرى، لا يتم انبعاث هذا الغاز بشكلٍ مباشر من أي مصدر، وإنّما يتشكل نتيجة تفاعل الأشعة الشمسية وبشكلٍ خاص الأشعة فوق البنفسجية مع مركبات الهيدروكربونات (Hydrocarbons) وأكسيد النتروجين (Nitrogen oxides) وغيرها، وتشكل عوادم السيارات ونواتج حرق الوقود الأحفوري وصناعات أخرى مصدراً رئيساً لانبعاثات هذه الغازات التي تزداد بشكل مستمر، وهذا ما أدى إلى زيادة تركيز الأوزون في طبقات الجو

الدنيا بشكلٍ كبير منذ بداية الثورة الصناعية، ومتوسط التركيز الحالي هو 40 ppm. وبالرغم من وجود تباين كبير في تركيز الأوزون خلال اليوم الواحد وبين فصول السنة، إلاّ أنّه من المتوقع أن يزداد تركيزه بمعدل 40-60% بحلول العام 2100 (IPCC, 2007). ويُعد الأوزون مؤكسداً قوياً، وللتركيز المرتفع منه أضرار كبيرة على الإنسان والحيوانات والنباتات، وحتى الأبنية (Kalabokas et al., 2000)، لذلك يسمى بالأوزون السيئ Bad ozone.

يؤثر الأوزون بشكلٍ مباشر في النبات ويؤدي التركيز المرتفع منه إلى حدوث أضرارٍ عديدة ولاسيما على المجموع الخضري فوق سطح التربة، ويمكن أن يقتصر التأثير بداية الأمر على تغيرات بيوكيميائية بسيطة يمكن أن تؤدي لاحقاً إلى انخفاض في معدل التمثيل الضوئي، وتغيرات في توزيع وتوضع الكربون بين أجزاء النبات، وظهور إصابات ورقية واضحة وشيخوخة مبكرة، وانخفاض في معدل النمو ونقص في الغلة.

بعد دخول الأوزون الأوراق عبر المسامات يعمل على أكسدة بعض المركبات وتشكيل الجذور الحرة، مثل جذر الهيدروكسيل الحر وجذر الأكسجين المفرد وجذر السوبر أكسيد وغيرها، التي لها قدرة تفاعلية كبيرة تؤدي لحدوث الإجهاد التأكسدي الذي يحدث أضراراً مباشرة للأنظمة الضوئية وعملية التمثيل الضوئي. وعادةً ما تنخفض الناقلية المسامية بتأثير ارتفاع تركيز الأوزون، ولكن بشكلٍ غير مباشر، وذلك من خلال زيادة تركيز CO_2داخل الأوراق (C_i) نتيجة تعطيل عملية التمثيل الضوئي.

كما هومعلوم، يؤثر ارتفاع تركيز CO_2 وعلى العكس من ارتفاع تركيز الأوزون إيجابياً في النبات ويُحسن عملية التمثيل الضوئي والنمو والغلة، ولكن هل يعوض التأثير الإيجابي لارتفاع CO_2 التأثير السلبي الناتج عن ارتفاع تركيز الأوزون؟ أشارت معظم الأبحاث إلى أنّ ارتفاع تركيز CO_2 يمكن أن يحد من شدة الأضرار الناتجة عن ارتفاع تركيز الأوزون، وبشكلٍ خاص في درجة الإصابة الورقية. فعلى سبيل المثال، في تجربةٍ أجريت على نباتات القمح بوجود تركيز مرتفع من CO_2 (700 ppm) ومن الأوزون O_3 (0.075 ppm)، لوحظ أنّ الإصابة الورقية عند نمو النباتات تحت تركيز مرتفع من الأوزون فقط كانت 30%، في حين تناقصت نسبة الإصابة إلى 5% فقط عندما ترافق ذلك مع وجود تركيز مرتفع من CO_2 (Balaguer et al., 1995). وبشكلٍ مماثل، أوضح Barnes and Pfirmann (1992) في تجربتهما على نباتات من الفجل التي تم تعريضها لمستويين من CO_2 (350, 750 ppm) ومن O_3 (0.020, 0.080 ppm) أن نسبة الإصابة الورقية الناتجة عن التعرض لتركيز مرتفع من O_3 انخفضت من 28% إلى 18% عند تعريض النباتات لتركيز مرتفع من CO_2 أيضاً.

أما من ناحية دراسة التأثير الناتج عن كل من ارتفاع CO_2 و O_3 في معدل التمثيل الضوئي ونمو النباتات، فقد أشارت دراسات عديدة إلى قدرة التركيز المرتفع لـ CO_2 على تخفيف التأثير الناتج عن ارتفاع تركيز O_3 وتحسين النمو والغلة سواءً بشكل جزئي أو كلي. ففي تجربة على فول الصويا، بيّن Fiscus et al., (1997) أنّ تركيز الأوزون المرتفع (1.5 مرة التركيز في الشاهد) أدى إلى انخفاض معنوي في الغلة (41%)، وتم تعويض هذا النقص بشكلٍ كامل في النباتات المعرضة للتركيز المرتفع من CO_2 (700 ppm). وفي دراسةٍ أخرى على القمح، أوضح Barnes et al., (1995) أنّ الغلة ازدادت في النباتات النامية تحت تركيز مرتفع من كل من الأوزون وغاز ثاني أكسيد الكربون بالمقارنة مع النباتات المعرضة للتركيز المرتفع من الأوزون فقط. عموماً، يمكن تفسير التأثير الإيجابي لارتفاع تركيز ثاني أكسيد في التخفيف من شدة الأضرار الناتجة عن ارتفاع تركيز الأوزون بشكل رئيسي من خلال الآليات التالية:

1- تقليل درجة انفتاح المسام وخفض الناقلية المسامية بتأثير ارتفاع تركيز CO_2, وهذا يُسهم في الحد من دخول O_3 إلى داخل الأوراق وبالتالي التقليل من الضرر الناتج عنها.
2- إمكانية زيادة إنتاج مضادات الأكسدة والأنزيمات الدفاعية تحت التراكيز المرتفعة من CO_2، حيث تكون كمية الكربون المثبتة أكبر وبالتالي هناك مرونة أكبر في توجيه الكربوهيدرات لتصنيع هذه المضادات.

ويجب التنويه أيضاً بأنّ مدى وفرة العناصر المغذية تؤثر في تصنيع مضادات الأكسدة والأنزيمات الدفاعية، لذلك في الظروف التي لا تكون فيها العناصر المغذية عاملاً محدداً للنمو فإن التأثير الإيجابي للتركيز المرتفع من CO_2 يكون أكثر وضوحاً في تعديل الأثر السلبي لارتفاع تركيز O_3. وبالمقابل، لا بد من الإشارة إلى أنّ ارتفاع تركيز CO_2 لم يترافق دائماً بتحسين النمو في النباتات المعرضة لارتفاع تركيز الأوزون، بل على العكس من ذلك هناك أبحاث عديدة أشارت إلى عدم قدرة CO_2 على تخفيف التأثير الناتج عن ارتفاع الأوزون، فكما بيّن (Balaguer et al., 1995) في تجربتهم على القمح أن ارتفاع تركيز CO_2 لم يتمكن من حماية العمليات الفيزيولوجية المدروسة من تأثير الأوزون، ولم يتحسن مقدار الانخفاض في معدل التمثيل الضوئي، ومعدل النمو بفعل التركيز المرتفع للأوزون عند المستويات المرتفعة لغاز CO_2. بشكلٍ عام، يختلف التأثير الناتج عن ارتفاع تركيز الأوزون وCO_2 باختلاف التركيز المطبق، والنوع النباتي المدروس، وباختلاف مرحلة نمو النبات، وباختلاف الظروف البيئية المحيطة، ومدة التعرض لهذه الظروف.

الفصل الثاني عشر

تأثيرات التبدلات المناخية في استدامة إنتاجية النظم البيئية الزراعية

Impacts of Climatic Changes on the Sustainability of the Agro-ecosystems

يُعرَّف التبدل المناخي العالمي بأنه التغير Variation في متوسط درجة الحرارة نتيجة التأثيرات المباشرة أو غير المباشرة لأنشطة الإنسان، التي تغير تركيب الغلاف الجوي. وحسب تقديرات الهيئة الدولية المهتمة بالتبدلات المناخية (IPCC)، فقد ارتفع متوسط درجة حرارة سطح الأرض بنحو 0.6ْم خلال القرن الماضي. ووصلت كمية انبعاثات غاز الفحم (CO_2) نتيجة حرق الوقود إلى قرابة 6.25 بليون طن خلال عام 1996. وكان بالمقابل عام 1996 أحد الأعوام الخمسة الأكثر حرارةً. وقدرت الخسائر بفعل الكوارث الناتجة عن التبدلات المناخية بنحو 60 بليون دولار أمريكي خلال العام نفسه. وتشير التنبؤات إلى أنَّ تضاعف تركيز غازات الصوب الزجاجية Greenhouse gases، سيؤدي إلى زيادة متوسط درجة حرارة الأرض من 1ْم إلى 3ْم، وهذا سيجعل عملية استعادة توازن النظم البيئية القائمة، والتكيف Adaptation أمرٌ غاية في الصعوبة.

غازات الصوب الزجاجية وتأثير الدفيئة: تُعد غازات الفحم (CO_2)، والميثان (CH_4)، وأول أكسيد الآزوت (N_2O)، ومركبات الكلوروفلوروكربون (CFC'S)، والأوزون (O_3)، وبخار الماء (H_2O) من غازات الصوب الزجاجية. ورغم أنّ غازات الفحم (CO_2)، والميثان (CH_4)، وأول أكسيد الآزوت (N_2O) لا تشكل أكثر من 1/10 من أصل 1% من بين الكمية الكلية لغازات الغلاف الجوي، إلاّ أنّها تؤدي دوراً مهماً وفعَّالاً في تسخين الغلاف الجوي، حيث تشكل غطاءً واقياً حول الأرض.

إنَّ الطاقة التي تتلقاها الأرض من الشمس، عادةً ما توازن بواسطة الإشعاع المنبعث من سطح الأرض. وفي حال الغياب الكامل للغازات التي تشكل الغلاف الجوي Atmosphere فسوف تكون درجة حرارة الأرض قرابة 18 ºم، ما يجعل الحياة مستحيلة على وجه البسيطة. وتُعرف درجة الحرارة هذه، بدرجة الحرارة الفعّالة Effective temperature، التي تعادل بوجود الغلاف الجوي قرابة 15ْم. وُيعزى التباين في درجة الحرارة الفعَّالة إلى حقيقة أنَّ الغلاف الجوي نفوذ Translucent للأشعة الشمسية قصيرة الموجة، ولكنه يمتص جزءاً كبيراً من الأشعة طويلة الموجة المنبعثة Emitted من سطح الأرض، ثمّ لا تلبث هذه الأشعة الممتصة من قبل غازات

الدفيئة، وخاصةً CO_2، وبخار الماء (H_2O) أنْ ترتد من جديد إلى سطح الأرض، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارتها، وتسمى هذه الظاهرة اصطلاحاً بتأثير الدفيئة Hot house effect. ومن أكثر العوامل المهددة للنظم البيئية، وقابلية الحياة فيها:

1. التأثيرات المباشرة للاستعمال المفرط للمصادر الطبيعية Natural resources.
2. حرق الوقود الاحفوري Fossil fuel، والكتلة الحية Biomass.
3. اقتطاع الأشجار، وحرائق الغابات Forest fires.

لقد كان تركيز غاز ثاني أوكسيد الكربون خلال عام 1750 قرابة 270 جزءاً بالمليون (PPm) ووصل تركيزه بحلول عام 1990 إلى قرابة 370 جزءاً بالمليون، ولا يزال يرتفع بمعدَّل 0.4% كل سنة (IPCC, 2001). ويعتقد أنَّ قرابة 70 – 90% من غاز الفحم المضاف إلى الغلاف الجوي ناتج عن حرق الوقود الأحفوري (OTA, Fossil fuels (1993، ويأتي الباقي نتيجة إزالة الغابات Deforestation. ويزداد كل من تركيز غاز الميثان، وN_2O، ومركبات الكلوروفلوروكربون بالنسبة نفسها. ولكن بسبب كون مركبات الكلوروفلوروكربون تدمر Destroy الأوزون، فإنَّ تأثير التسخين الناجم عنها عادةً ما يكون معدوماً، ولكنها تقود إلى مشكلة مختلفة تماماً تتمثل باستنزاف الأوزون في طبقات الجو العليا Stratospheric o zone. ويتوقع عند هذا المعدل أنْ يتضاعف تركيز غاز الفحم بحلول عام 2100 (IPCC, 2001). عموماً، في Mid- continent region، سيكون معدل فقد الماء بالتبخر- نتح أكبر من معدل الهطول المطري، مما يؤدي إلى تعرُّض هذه المناطق إلى موجات طويلة وحادة من الجفاف More severe longer- lasting droughts. وسيسبب ارتفاع درجات الحرارة أيضاً ارتفاعاً في منسوب مياه البحار والمحيطات بنحو قرابة 20 سم بحلول عام 2030 (OTA, 1993). ولا أحد يعرف من سيتضرر، ومن سيستفيد من التبدلات المناخية المحدثة بارتفاع تركيز غاز الفحم، ولكن من الواضح أنَّ المناطق الساحلية سوف تعاني من الغرق بسبب ارتفاع منسوب مياه البحار، أما بالنسبة إلى المناطق الداخلية Interior، قد تستفيد من الزيادة الحاصلة في الإنتاج الزراعي، بسبب ارتفاع الحرارة وازدياد معدل الهطول المطري ولاسيما في المناطق التي تقع عند خطوط العرض العليا Higher latitudes عبر كندا وروسيا. ويسبب الازدياد المطرَّد في تركيز غاز الفحم استفحال ظاهرة الاحتباس الحراري Global warming. ويمكن أن يؤدي ذلك خلال الـ 45 سنةً القادمة إلى ارتفاع مستوى مياه البحار إلى حدٍ كافٍ لإغراق المدن الساحلية المنخفضة، والمنشآت العمرانية والزراعية على ضفاف الأنهار River deltas. وتسبب أيضاً تغيراً في الإنتاج الزراعي العالمي، وأسواق التبادل التجاري. وُتعد الولايات المتحدة الأمريكية أكبر مُلوِّث Polluter في العالم. حيث تعد الولايات المتحدة الأمريكية مصدراً لأكثر من

30% من الانبعاثات الكلية من الملوثات الجوية على مستوى العالم كما هو مبين في الجدول (37):

الجدول رقم (37): كمية غاز الفحم المنبعثة نتيجة الأنشطة المختلفة في الدول الصناعية.

الدولة	الإنبعاثات الكلية	Emission per capita (Equivalent in CO_2 metric
USA أمريكة	**6503.8**	**24.3**
China الصين	4964.8	4.0
India الهند	**2081.7**	**2.2**
Russia روسيا	1980.3	13.4
Japan اليابان	**1166.1**	**9.3**
Germany ألمانيا	956.0	11.6
Brazil البرازيل	**695.7**	**4.2**
South Africa جنوب أفريقيا	677.2	15.9
Canada كندا	**634.0**	**20.9**
United kingdom إنكلترا	618.7	10.5

الزراعة كمسهم رئيس في التبدلات المناخية: تؤدي إزالة الغابات لاستثمار الأراضي الخصبة في الإنتاج الزراعي، وحرق بقايا المحصول، وزراعة محصول الرز بالغمر، وتربية القطعان الكبيرة من الماشية والمجترات الأخرى، والإفراط في استعمال الأسمدة الآزوتية، إلى تحرير غازات الدفيئة إلى الغلاف الجوي. وتسهم الزراعة بأكثر من 15% من الغازات الكلية المنبعثة، ويسهم تغيير استعمال الأراضي التي تستعمل لأغراض زراعية بنحو 8%. عموماً، تُصنف الزراعة في المرتبة الثالثة كقطاعٍ مهم في انبعاث غازات الصوب الزجاجية، بعد حرق واستهلاك الطاقة (مصادر الوقود) ومركبات الكلوروفلوروكربون (CFC´s). وحقيقةً، سوف يزداد انبعاث غازات الدفيئة من الأنشطة الزراعية خلال السنوات القادمة، بسبب الحاجة الملحة لزيادة الإنتاج الزراعي لتأمين متطلبات النمو السكاني المتزايد. وهذا سيلقي بمسؤوليةٍ كبيرة على الباحثين للعمل على

إيجاد طرائق تسمح بزيادة الإنتاج الزراعي مع مراعاة ضبط ارتفاع تركيز الملوثات الجوية الناجمة عن النشاط الزراعي. ويمكن تحقيق ذلك من خلال:

- تقليل إزالة الغابات لتأمين مساحات زراعية جديدة.
- الحد من حرق الكتلة الحية في المناطق المدارية.
- تحسين عوامل إدارة الحقول المزروعة بالرز، وتربية الماشية للحد من انبعاث غاز الميثان.
- تحسين كفاءة استعمال الآزوت Nitrogen use efficiency للحد من تحول الآزوت إلى N_2O.

يمكن أنْ تؤدي الزراعة التقليدية، ولاسيما نظم الزراعة المكثفة إلى انجراف التربة بوساطة الرياح والمياه، من خلال فلاحة التربة. وعادةً ما تسبب الزراعة، تلوث التربة والمياه الجوفية بالنترات (NO_3) والمواد الكيميائية الأخرى، بسبب إضافة الأسمدة الكيميائية والمبيدات.

ويعني مفهوم الزراعة المستدامة Sustainable agriculture، الحد من استعمال مدخلات الإنتاج الزراعي الكيميائية Chemical inputs، والطاقة في النظم الزراعية من أجل الحد من الأضرار التي يمكن أنْ تلحق بالنظام البيئي الزراعي، وضمان الإنتاجية العالية لفترةٍ زمنيةٍ أطول. ويمكن أن تؤثر التبدلات المناخية في استدامة إنتاجية النظم الزراعية بطريقتين:

1. تقليل كفاءة النظم البيئية الزراعية في تأمين الغذاء والكساء على المدى البعيد لسكان العالم.

2. إحداث تحوّل/تغيير في المناطق الزراعية التي يمكن أنْ تزحف إلى البيئات الطبيعية Natural habitats، على حساب التنوع الحيوي النباتي والحيواني.

ويمكن أن يؤدي الاحتباس الحراري العالمي إلى تشجيع التوسع في الأنشطة الزراعية إلى مناطق تشكل الآن نظم زراعية طبيعية، مثل الغابات، ولاسيما عند خطوط العرض الوسطى والعليا.

عموماً، هناك حاجة لإجراء المزيد من البحوث لفهم العمليات التي تؤدي إلى انبعاث غازات الدفيئة من مختلف الممارسات الزراعية. وهناك حاجة إلى بذل الجهود لنشر المعرفة المكتسبة لتطبيقها في المزارع. وسيكون هناك تفاوت في الحد من انبعاثات بعض الغازات، فيمكن تحقيق ذلك بسهولة في بعضها، وبصعوبة في بعضها الآخر. وستختلف

الإستراتيجيات الملائمة باختلاف المنطقة. وستكون مهمة تقليل انبعاثات غازات الدفيئة معقدة جداً بسبب تداخل تأثير المتغيرات المناخية (الحرارة، والهطول المطري، والشدة الضوئية، والرياح...الخ) في العمليات المؤدية إلى انطلاق غازات الصوب الزجاجية.

التأثيرات المحتملة للتبدلات المناخية في الزراعة وكمية الغذاء: من المعروف أنَّ أي تبدل ملموس، وحقيقي في الظروف المناخية على مستوى العالم سيؤثر سلباً في الإنتاج الزراعي، ما يؤثر سلباً في كمية المصادر الغذائية المتاحة للاستهلاك البشري، والموارد العلفية اللازمة للثروة الحيوانية المتزايدة. ولكن توجد العديد من العوامل التي تقلل من دقة تقدير التبدلات الحاصلة في الإنتاج الزراعي استجابة للتبدلات المناخية، أهمها: مقدار التبدل في متوسط درجة الحرارة، وتوزعها الجغرافي، ومقدار التبدل المرافق في معدل الهطول المطري، وطبيعة توزعه خلال موسم النمو، الذي يحدد بدوره كمية المياه المتاحة لنباتات الأنواع المحصولية المزروعة، ولاسيما تحت ظروف الزراعة المطرية (البعلية)، وتأثير الارتفاع في درجة الحرارة في كمية المياه المفقودة بالتبخر- نتح Evapo-transpiration. بالإضافة إلى صعوبة تحديد طبيعة الاستجابات الفسيولوجية للمحاصيل تحت ظروف ارتفاع تركيز غاز الفحم CO_2 enrichment في الغلاف الجوي. وتكمن المشكلة في إمكانية التنبؤ الدقيق Accurate predicting بمآل الزراعة في ظل التبدلات المناخية المستقبلية، في حقيقة أنَّ النظم البيئية الزراعية معقدة جداً.

السيناريو الأسوأ للتبدلات المناخية:

1. يمكن أنْ تنخفض إنتاجية الأنواع المحصولية بنحو 17.1%، أو بقيمة 2.7 بليون دولاراً أمريكياً في السنة.
2. ستزيد احتياجات نباتات الأنواع المحصولية المائية بنحو 23%، نتيجة ازدياد معدل فقد الماء بالتبخر- نتح، بسبب ارتفاع الحرارة، وتراجع محتوى التربة المائي بسبب تراجع معدل الهطول المطري.
3. سيستعمل المزارعون كمية إضافية من الطاقة تقدَّر بنحو 3 – 4%.
4. ستعاني الصناعات الإقليمية المعتمدة على المنتجات الزراعية، ويمكن أن تصل خسائرها إلى 1.4 بليون دولاراً أمريكياً سنوياً.

السيناريو الأكثر إشراقاً:

1. تنخفض الإنتاجية بنحو 3.3%، أو ما قيمته 500 مليون دولار أمريكي في السنة.
2. ستزيد احتياجات نباتات الأنواع المحصولية المائية بنحو 15%، ولكن تبقى المصادر المائية محدودة.
3. يتبنى المزارعون نظم الري الأكثر كفاءة.
4. ستعاني الصناعات الإقليمية المعتمدة على الزراعة من خسائر تقدر بنحو 410 مليون دولار أمريكي سنوياً.

الاستجابات المتوقعة للنظم البيئية الزراعية Expected responses of the agro-ecosystem

تأثير ارتفاع تركيز غاز الفحم [CO_2] في نمو المحاصيل: تنمو النباتات بفضل المادة الجافة Dry matter المصنّعة بعملية التمثيل الضوئي Photosynthesis، حيث يتم خلال عملية التمثيل الضوئي تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية مخزونة في روابط المركبات العضوية المصنّعة (الكربوهيدرات). ويدخل غاز الفحم النبات عن طريق مسامات Stomata الأوراق أثناء عملية التبادل الغازي مع بخار الماء (H_2O) المفقود بالنتح. ويؤدي ارتفاع تركيز غاز الفحم في الوسط الخارجي إلى زيادة فرق التدرج في تركيزه بين الأوراق والوسط المحيط Partial pressure difference، مما يؤدي إلى زيادة معدل صافي انتشار غاز الفحم عبر المسامات إلى داخل الأوراق، فيزداد معدل التمثيل الضوئي وتصنيع المادة الجافة. ولكن تختلف الأنواع النباتية في استجابتها لارتفاع تركيز غاز الفحم في الوسط المحيط، حيث يزداد معدل التمثيل الضوئي في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون C_3 plants، مثل الرز Rice والقمح Wheat، وفول الصويا Soybean بالمقارنة مع الأنواع النباتية رباعية الكربون C_4 plants، مثل الذرة الصفراء Corn، والذرة البيضاء Sorghum وقصب السكر Sugar cone، والدخن Millet. ورغم حقيقة أنَّ كفاءة الأنواع النباتية رباعية الكربون التمثيلية في ظل المستويات الراهنة من CO_2 أعلى من الأنواع النباتية ثلاثية الكربون ولكن تعد الأنواع النباتية ثلاثية الكربون أكثر استجابة لارتفاع تركيز غاز الفحم، بسبب تثبيط حدوث التنفس الضوئي Photorespiration في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون عند المستويات المرتفعة من CO_2، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة معدل التمثيل الضوئي، وتصنيع المادة الجافة في حين لا تحدث عادةً عملية التنفس الضوئي في الأنواع النباتية رباعية الكربون، لأنها تمتلك آلية تركيز CO_2 في خلايا الحزم الوعائية CO_2-Concentratng

mechanisms، التي تساعد في المحافظة على نسبة مرتفعة من CO_2/O_2 التي تثبط نشاط الأنزيم Rubisco oxygynase وتفعّل نشاط الأنزيم Rubisco Carboxylase. ولكن بينت نتائج الدراسات المنفذة في غرف النمو Growth chambers، والبيوت الزجاجية أنَّ الاستجابة الموجبة لدى نباتات الأنواع النباتية ثلاثية الكربون لارتفاع تركيز CO_2 المتمثلة بارتفاع معدل تثبت الكربون بنحو 35% غالباً ما تكون قصيرة الأمد، ولا يلبث أنْ يتراجع معدل التمثيل الضوئي نتيجة تراكم نواتج التمثيل الضوئي، وعدم تصريفها (حجم المصدر سيكون أكبر من حجم المصب)، وهذا ما يسمى اصطلاحاً بتأثير المنتج النهائي End-product effect، لذلك تتطلب عملية المحافظة على استجابة الأنواع النباتية ثلاثية الكربون لارتفاع تركيز غاز الفحم في الوسط المحيط، ضرورة تحسين حجم المصب وقوته Sink size في أصناف الأنواع المحصولية ثلاثية الكربون الإستراتيجية (مثل، القمح، والشعير، والرز، وفول الصويا...الخ)، من خلال زيادة نقاط الاستهلاك Consuming points، عن طريق زيادة عدد السنابل/ القرون في النبات، وعدد الحبوب/ البذور في السنبلة/ القرون، وحجم الحبوب/ البذور لزيادة كفاءتها التخزينية Storage capacity، مما يساعد في تحسين صفة دليل الحصاد Harvest index، ومن ثمَّ غلة المحصول الاقتصادية Economic yield.

ويعمل ارتفاع تركيز CO_2 في الوسط المحيط إلى تراجع الناقلية المسامية Stomatal conductance (g_s) دون أنْ يتسبب في الانغلاق الكامل للمسامات. ويؤدي الانغلاق الجزئي للمسامات Patchiness، إلى تراجع معدل فقد بخار الماء بالنتح عن طريق المسامات، ويتراجع أيضاً معدل انتشار CO_2، ولكن لا يؤثر ذلك سلباً في معدل التمثيل الضوئي، بسبب قابلية انجذاب غاز الفحم العالية High affinity للأنزيم Rubisco، وعادةً ما تكون الطاقة الحرة السالبة الناتجة عن انخراط غاز الفحم مع مجموعة الكربوكسيل في الجزء العلوي من المركب السداسي الكربون المتشكل من تفاعل ضم غاز الفحم (CO_2) إلى المستقبل الأولي خماسي الكربون Ribulose 1,5 biphosphate عالية جداً ($\Delta G^{o\prime} = -12.4$ Cal mol^{-1})، مما يشجع الاتجاه الأمامي للتفاعل، أي باتجاه تثبيت غاز الفحم. عموماً، يؤدي تراجع معدل فقد الماء بالنتح، وعدم تأثر معدل التمثيل الضوئي Assimilation rate (´A`)، إلى تحسين كفاءة استعمال الماء Water use efficiency، مما يساعد في تحسين كفاءة الأنواع / الطرز الوراثية الإنتاجية، وخاصةً ضمن ظروف الزراعة البعلية، حسب المعادلة المقترحة من قبل Passioura (1977):

$$\mathbf{GY = T_E \times WUE \times HI}$$

لذلك، لا بدَّ من تطوير طرز وراثية تتسم بكفاءة عالية في استعمال الماء Capacity types. ولكن التبدلات المناخية المتمثلة بارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط، وتراجع معدل الهطول المطري، وتذبذبه، وعدم انتظام توزعهِ خلال موسم النمو بما يتناسب مع احتياجات نباتات المحاصيل الشتوية المائية، وتراجع محتوى التربة المائي، بسبب ازدياد معدل فقد الماء بالتبخر Evaporation، والنتح Transpiration، بسبب الحرارة المرتفعة، يمكن أنْ تقلل من التأثيرات النافعة الممكنة نتيجة التسميد الكربوني CO_2-fertilization في الوسط المحيط.

تأثير ارتفاع درجة الحرارة: يؤدي الاحتباس الحراري عند خطوط العرض الوسطى والعليا Middle and higher latitudes إلى زيادة طول موسم النمو، مما يسمح بزراعة المحاصيل بشكلٍ مبكر في الربيع ويسمح بنضجها بشكلٍ مبكر Earlier maturation، ومن ثمَّ الحصاد بوقتٍ أبكر، مما يعطي إمكانية إكمال دورة حياة محصولين أو أكثر خلال الموسم نفسه. ويمكن أن تتسع مساحات الأراضي الزراعية Crop-producing areas باتجاه القطبين في بعض الدول مثل كندا وروسيا، رغم حقيقة أنَّ الإنتاجية في الأراضي عند خطوط العرض العليا ستكون منخفضة بسبب قلَّة خصوبة تلك الأراضي. بالإضافة، إلى حقيقة أنَّ العديد من الأنواع المحصولية أصبحت متكيفة مع طول الفترة الضوئية السائدة عند خطوط العرض الوسطى والأدنى، ويمكن أن لا تستجيب لفترات النهار الطويلة Longer days خلال فصل الصيف عند خطوط العرض العليا. أما عند خطوط العرض السفلى الأكثر سخونة، فإنَّ ارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط ستؤدي إلى زيادة معدل انطلاق غاز الفحم نتيجة التنفس Respiration. وتؤدي زيادة معدل التنفس إلى زيادة معدل أكسدة المادة الجافة Dry matter oxidation، وتسبب الحرارة المرتفعة بالمقابل تراجع معدَّل التمثيل الضوئي، ولاسيما في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون، مما يؤدي إلى تراجع صافي التمثيل الضوئي Net Assimilation Rate (NAR) فتقل كمية المادة الجافة المتاحة لنمو أجزاء النبات المختلفة (الخضرية، والثمرية)، مما يؤثر سلباً في معدل نمو نباتات المحصول وتطورها، وغلة المحصول الاقتصادية. وتؤدي التبدلات المناخية إلى زيادة درجة حرارة الليل، الأمر الذي يزيد من معدل التنفس الذي لا يقابله تعويض بالبناء الضوئي الذي لا يحدث إلا خلال النهار بوجود الضوء، مما يزيد من مقدار التراجع الحاصل في إنتاجية الأنواع المحصولية.

وتسبب أيضاً الحرارة المرتفعة تسريعاً في معدلات النمو، ومن ثمَّ تقصيراً في أطوال مراحل النمو الفينولوجية، مما يؤثر سلباً في الطاقة الإنتاجية الكامنة، نتيجة تراجع كلٍ من

حجم المصدر Source size، بسبب تقصير طول مرحلة النمو الخضري، الأمر الذي يؤثر سلباً في حجم المسطح الورقي الأخضر الفعَّال في عملية التمثيل الضوئي (LAI)، نتيجة تراجع كمية الطاقة الضوئية الممتصة Intercepted light energy (I)، وتراجع حجم المصب Sink size، بسبب تقصير طول مرحلة الإزهار Flowering (فيتراجع عدد الأزهار)، وطول فترة نمو الحبوب/ البذور Grain growth period، وطول فترة امتلاء الحبوب/ البذور Seed filling period، مما يؤثر سلباً في كلٍ من عدد الحبوب المتشكلة، ومتوسط وزن الحبة/ البذرة الواحدة، فتتراجع غلة المحصول الاقتصادية، لأنَّ هذين المكونين من أهم مكونات الغلة العددية.

تأثير التبدلات المناخية في إتاحة المياه: تتحدد إنتاجية الأنواع المحصولية في النظم الزراعية بكمية المياه المتاحة. وتؤدي التبدلات المناخية إلى تغيير معدل الهطول المطري، ومعدل فقد الماء بالتبخر Evaporation والجريان السطحي للمياه Runoff، ومخزون التربة المائي Soil moisture torage. وُيعد التبدل في معدل الهطول المطري السنوي الكلي ونظام توزع الأمطار خلال موسم النمو من العوامل المهمة المحددة لإنتاجية الأنواع المحصولية. ويسبب انحباس الأمطار (الإجهاد المائي) خلال مرحلة الإزهار Flowering، والتلقيح Pollination، وفترة امتلاء الحبوب تراجعاً كبيراً في غلة معظم الأنواع المحصولية، ولاسيما الذرة الصفراء، وفول الصويا، والقمح، لذلك لا بدَّ من تطوير أصناف عالية التحمل للجفاف، وذات طاقة إنتاجية جيدة.

يتوقع أنْ يزداد الطلب على المياه للري في ظل التبدلات المناخية المستقبلية، مما يزيد من شدة المنافسة على المياه بين قطاع الزراعة، الذي هو أصلاً المستهلك الأكبر للمصادر المائية في المناطق شبه الجافة، وقطاع الصناعة، والاستعمالات المنزلية. وسيؤدي تراجع منسوب المياه الجوفية Water table إلى استهلاك كمية أكبر من الطاقة لضخ المياه، الأمر الذي يجعل عملية الري مكلفة جداً، ولاسيما في المناطق الأكثر جفافاً التي تتطلب كمية أكبر من المياه في وحدة المساحة. وقد يؤدي ذلك إلى خروج مساحات كبيرة من الأراضي الزراعية من نطاق الزراعات المروية، ويمكن أن يضطر المزارع إلى استبدال الأنواع المحصولية السابقة بأخرى ذات متطلبات مائية أقل. وسيتطلب ذلك بهدف تأمين الكميات اللازمة من مياه الري إنشاء السدود Dams، والخزانات المائية Reservoirs، وقنوات الري المغطاة Canals، وحفر المزيد من الآبار Wells، وشراء المزيد من المضخات Pumps، وإنشاء شبكات الري Irrigation networks في مواقع جديدة، مما يزيد حجم الاستثمارات Investments، ويقلل من العائد الاقتصادي من العمل الزراعي. ويؤدي أيضاً إلى ازدياد خطر تراكم الأملاح في قطاع التربة، وتصبح التربة معرَّضة إلى خطر التملح Salinization.

تأثيرات الجفاف Effects of drought

الجفاف Drought: هي الفترة التي تنحبس خلالها الأمطار، وُتصاب النباتات بالعجز المائي water Deficit الذي يؤدي إلى تضرر نباتات المحاصيل المزروعة بعلاً بشكلٍ كبير، مما يؤدي إلى تراجع إنتاجيتها. وعندما يبدأ الجفاف، فإنَّ القطاع الزراعي عادةً يتأثر أولاً بسبب اعتمادهِ بشكلٍ كبير على مخزون التربة المائي. وإذا ما امتدَّ الجفاف لفترات طويلة فعادةً ما يستنزف محتوى التربة المائي بشكلٍ سريع. وإذا ما استمر الجفاف، وانحباس الأمطار، فإنَّ الناس الذين يعتمدون على المصادر المائية الأخرى سيبدؤون بالشعور بنقص المياه. عموماً، الأشخاص الذين يعتمدون في احتياجاتهم المائية على مصادر المياه السطحية Surface water (الخزانات المائية Reservoirs، والبحيرات Lakes)، والمياه تحت السطحية Subsurface water (المياه الجوفية Ground water) عادةً ما يكونون أقل الناس تأثراً بالجفاف، ولا تؤثر فترات الجفاف القصيرة (3-6 أشهر) بشكلٍ كبير في مثل هذه القطاعات، وذلك حسب خصائص النظم المائية Hydrologic systems، ومتطلبات استخدام المياه.

التأثيرات المباشرة للجفاف Direct impacts of drought

1. انخفاض إنتاجية الأنواع المحصولية، والرعوية، والغابوية.
2. ازدياد خطر الحرائق Fire hazard.
3. تراجع حجم الموارد المائية السطحية والجوفية.
4. ازدياد معدلات النفوق في الحيوانات البرية والماشية.
5. تضرر الموائل البيئية البرية Wildlife، والمائية Fish habitats.

التأثيرات غير المباشرة Indirect impacts of drought

1. تراجع دخل المزارعين، ومربي الماشية، والعاملين في تجارة الخشب Timber.
2. ارتفاع أسعار المواد الغذائية، وأسعار الخشب.
3. ارتفاع نسبة البطالة Unemployment.
4. انخفاض العائدات من الضرائب بسبب انخفاض الإنفاق Expenditure، وازدياد معدل الجرائم Crime.
5. ازدياد الإصابة بالحشرات والأمراض في النبات، والانجراف الريحي.

تأثير التبدلات المناخية في خصوبة التربة والانجراف: تؤدي ظاهرة الاحتباس الحراري إلى رفع درجة حرارة التربة، فيزداد معدل تحلل المادة العضوية، وازدياد معدلات العمليات الحيوية الأخرى التي تحدث في التربة، التي تؤثر سلباً في خصوبة التربة.

وسيتطلب تحسين خصوبة التربة، وتأمين احتياجات النباتات من العناصر المعدنية المغذية نتيجة ازدياد معدل نموها بفضل ارتفاع تركيز CO_2، ضرورة إضافة كمياتٍ أكبر من الأسمدة الكيميائية، ما يؤدي إلى زيادة تكاليف الإنتاج الزراعي Production costs، وتُسبب تلوث المياه الجوفية والهواء، ما يزيد من وطأة المخاطر البيئية Environmental risks. ويؤدي الاحتباس الحراري إلى تسريع دورة العناصر المعدنية، مثل الكربون، والآزوت والفوسفور، والبوتاسيوم، والكبريت في نظام التربة والنبات والغلاف الجوي Soil-plant-atmosphere continuum، ما يؤدي إلى ازدياد معدل انطلاق غاز الفحم CO_2، وأول أكسيد الآزوت N_2O، التي تعد من غازات الدفيئة المهمة.

ويؤدي جفاف التربة بشكلٍ كبير إلى تثبيط نمو الجذور وتحلل المادة العضوية، مما يقلل من فعَّالية الجذور في تثبيت التربة، وتصبح التربة أكثر عرضة للانجراف الريحي Wind erosion. ويؤدي ازدياد فرق التدرج في الضغط والحرارة إلى زيادة الرطوبة النسبية الجوية نتيجة ازدياد معدل فقد الماء بالتبخر والنتح، وسيؤدي ذلك إلى هطول الأمطار بشكلٍ غزير خلال فترات زمنية قصيرة، مما قد يؤدي إلى تعرض التربة إلى الانجراف المائي Water erosion.

تأثير التبدلات المناخية في الآفات الزراعية والأمراض: يُؤدي ارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط، والرطوبة النسبية الجوية ضمن البيئة الدقيقة للمجتمع النباتي إلى استفحال Proliferation العديد من المسببات المرضية Pathogens والحشرات Insects. وسيسمح ارتفاع درجة حرارة فصل الشتاء Warmer winter لليرقات Larvae بأنْ تمضي فترة البيات الشتوي في مناطق كانت غير مناسبة لها بسبب البرودة، مما يؤدي إلى ازدياد شدة الإصابة Infestation على نباتات المحصول خلال موسم النمو اللاحق. ويمكن أنْ تتغير طبيعة تفاعل المحصول مع الآفة Crop-pest interaction، نتيجة تغير توقيت مراحل التطور المختلفة لكلٍ من نباتات المحصول Hosts، والآفات Pests. ويستدعي استفحال الآفات الزراعية ضرورة استعمال كميات أكبر من المبيدات الكيميائية لمكافحتها، مما يزيد من كلفة الإنتاج، وخطر تلوث التربة والمياه، أو اللجوء إلى استخدام تقانات المكافحة المتكاملة Integrated pest management technologies.

تأثير التبدلات المناخية في منسوب مياه البحر: يتوقع أنْ يؤدي الاحتباس الحراري إلى ارتفاع منسوب مياه البحر نتيجة ذوبان الجليد بشكلٍ جزئي، وذوبان الجبال الجليدية في

البحار، مما يؤدي إلى ارتفاع منسوب مياه البحر بنحو (0.1 -0.5 م (10 – 50 سم) خلال منتصف القرن الحالي حسب تقديرات الهيئة الدولية للتبدلات المناخية (IPCC). وسيهدد ذلك النظم الزراعية في المناطق الساحلية المنخفضة ويكمن أن يتسبب ذلك في تعطيل صرف المياه السطحية والجوفية، وطغيان مياه البحر إلى المياه الجوفية Sea water intrusion. وتعاني حالياً العديد من المناطق الساحلية المنخفضة في كلٍ من مصر، وبنغلادش، وإندونيسيا، والصين، وهولندا، وفلوريدا من الصرف الضعيف Poor drainage، وسيكون من الصعب استدامة الإنتاج الزراعي في تلك المناطق.

التأثيرات الاقتصادية الناجمة عن التبدلات المناخية

1. الخسائر التي يمكن أنْ تلحق بالمنتجين الزراعيين نتيجة:
   - الفقد الحاصل في غلة الأنواع المحصولية الحولية والمعمرة.
   - تراجع نوعية Quality المنتجات الزراعية.
   - تدني دخل المزارعين بسبب انخفاض إنتاجية الأنواع المحصولية، وارتفاع تكاليف عمليات الإنتاج.
   - تدني إنتاجية الأراضي الزراعية، بسبب الانجراف الريحي، وفقد المادة العضوية على المدى البعيد.
   - استفحال الإصابة بالأمراض والحشرات.
   - ارتفاع تكاليف عملية الري.
   - مصاريف إضافية لإنشاء متطلبات الري التكميلي، مثل حفر الآبار Wells وإنشاء السدود، ومد أنابيب الري.

2. تكاليف مربي الثروة الحيوانية وخسائره:

   - تردي إنتاجية المراعي الطبيعية Rangeland.
   - تدني إنتاج الحليب.
   - ازدياد نسبة النفوق، وتراجع أعداد الثروة الحيوانية.
   - عدم توافر، وارتفاع تكاليف تأمين مياه الشرب للثروة الحيوانية.
   - ارتفاع تكاليف/قلة توافر العلف للحيوانات.
   - ارتفاع تكاليف نقل الأعلاف.
   - اضطراب الدورة التكاثرية Reproduction cycle لدى الحيوانات.

- ازدياد الافتراس Increased predation.
- ازدياد نسبة الحرائق في المراعي الطبيعية.

التأثيرات الاقتصادية العامة:

1. انخفاض أسعار الأراضي Decreased land prices.
2. خسائر الصناعات التي تعتمد بشكلٍ مباشر على الإنتاج الزراعي، مثل صناعة الآلات الزراعية Machinery، وصناعة الأسمدة الكيميائية، وصناعة المنتجات الزراعية وصناعة الألبان Dairies... الخ.
3. ازدياد نسبة البطالة، بسبب تردي الإنتاج الزراعي نتيجة الجفاف.
4. ارتفاع أسعار المواد الغذائية، بسبب تراجع العرض Supply، وازدياد الطلب Demand.
5. ارتفاع حجم الواردات من المواد الغذائية، بأسعار مرتفعة.

التأثيرات البيئية: تتمثل باختلال توازن النظم البيئية الزراعية، والطبيعية، والموائل البيئية، وتدهور نوعية المياه والهواء، وازدياد نسبة الحرائق في المراعي الطبيعية والغابات، وما ينتج عنها من ارتفاع في تركيز الملوثات الجوية، وخاصةً غاز الفحم (CO_2)، بالإضافة إلى تدهور المناطق الطبيعية وفقد التنوع الحيوي، وانجراف التربة Soil erosion. تكون بعض هذه التأثيرات قصيرة الأجل، ويمكن أنْ تعود إلى حالتها الطبيعية بعد انقضاء فترة الجفاف، ولكن بعض التأثيرات البيئية يمكن أنْ تكون مديدة، وقد لا تتمكن من استعادة حالتها الطبيعية، وتصبح مشكلة دائمة.

التأثيرات الاجتماعية:

1. فقدان الأمن والأمان Public safety.
2. ازدياد حدة المشاكل الصحية.
3. نشوب الخلافات Conflicts بين مستخدمي المياه.
4. تدني مستوى المعيشة، وازدياد شظف الحياة.
5. عدم تكافؤ توزع الأضرار، ومعونات الإغاثة وقت حدوث الكوارث.
6. ازدياد نسبة الهجرة Migration إلى المناطق غير المنكوبة، مما يؤدي إلى استفحال الكثير من المشاكل الصحية، والاجتماعية، والاقتصادية في تلك

المناطق، ولاسيما ضمن مناطق السكن العشوائي التي تفتقر إلى البنية التحتية، ومياه الشرب الصحية، والصرف الصحي. وتمتد أحياناً الهجرة إلى خارج أسوار الوطن، مما يؤدي إلى ظهور مشاكل اللاجئين Refugee problems، وحتى بعد انقضاء الجفاف، فنادراً ما يعود أولئك المهاجرون إلى أوطانهم أو قراهم، مما يؤدي إلى غياب القوى العاملة البشرية البنّاءة في المناطق الريفية Rural areas، مما يحول دون إمكانية تحقيق التطور الاقتصادي فيها.

ماذا يجب على المزارعين أنْ يفعلوا لترشيد استهلاك المصادر المائية المتاحة بكمياتٍ محدودة بما يضمن استدامة واستقرار الإنتاج الزراعي في مزارعهم خلال فترات الجفاف؟ هناك مجموعة من الإرشادات التي يجب التقيد بها، أهمها:

1. تحسين القدرة الاستيعابية للمواقع المصممة لحصاد وتجميع مياه الأمطار.
2. تحسين معدل رشح المياه في التربة Water infiltration، وتحسين مقدرة التربة على الاحتفاظ بالماء من خلال تحسين محتوى التربة من المادة العضوية التي تحسن بدورها من خصائص التربة الفيزيائية والحيوية.
3. تقديم المياه للنباتات فقط خلال فترات الاستهلاك الأعظمي، وخلال المراحل الحرجة Critical stages من حياة النبات.
4. تحسين كفاءة نظم الري القائمة.
5. إنشاء مصدّات الرياح Wind breaks لتقليل معدل فقد المياه بالتبخر – نتح.
6. مكافحة الأعشاب الضارة Weeds التي يمكن أن تنافس نباتات المحصول على محتوى التربة المائي.

بالإضافة إلى المبادئ الرئيسة الآنفة الذكر، هناك ثلاث نصائح يمكن أن تستخدم بشكلٍ خاص في نظم الزراعة الحولية:

1. **التخطيط:** على المزارع أنْ يحدد أولاً حجم المورد المائي المتاح لديه، ثمَّ يقرر المساحة المزروعة لضمان كامل احتياجات النباتات المائية للحصول على أعلى إنتاجية ممكنة. وهنا على المزارع أن يستخدم أفضل جزء من أرضه.
2. **اختيار النوع المحصولي والدورة الزراعية المناسبة:** على المزارع أنْ يقوم بزراعة الأنواع المحصولية ذات المتطلبات المائية المحدودة، أو ذات الكفاءة العالية في استعمال المياه، وخلال المواسم التي يكون فيها معدل فقد الماء بالتبخر- نتح أقل ما يمكن، فعلى سبيل المثال، تستهلك محاصيل الحبوب الصغيرة الشتوية (مثل القمح، والشعير) كمية أقل من الماء بالمقارنة مع محاصيل الحبوب الصيفية (الذرة الصفراء)، والمحاصيل الصناعية (القطن)، والزيتية (فول الصويا، وزهرة الشمس)

وحتى محاصيل الخضار الصيفية (خيار، بندورة...الخ). وعند الرغبة في الزراعة خلال فصل الصيف، فعلى المزارع أنْ يختار الأنواع المحصولية/الأصناف المبكرة بالنضج، أو ذات موسم النمو القصير جداً.

3. **فهم دورة حياة المحصول:** لا بد من معرفة المراحل الحرجة للعجز المائي في الأنواع المحصولية التي ينوي المزارع زراعتها في أرضهِ، وهذا مهم جداً لتجنب تعريض النباتات للإجهاد المائي خلال المراحل الحرجة المحددة لغلة المحصول الحبية (مثال، مرحلتي الإزهار وامتلاء الحبوب في محاصيل الحبوب الشتوية الصغيرة).

4. **إدارة كربون التربة Management of Soil Carbon:** يؤدي تحويل أراضي الغابات إلى أراضٍ زراعية، أو سكنية إلى تغيير توازن انبعاثات الكربون من التربة على هيئة غاز الفحم (CO_2). وتسبب الزراعة عامةً، والفلاحة المكثفة خاصةً Intensive tillage تراجعاً مقداره 30 – 50 % في محتوى التربة من الكربون (Schlesinger, 1986; Houghton, 1995). ويتطلب المحافظة على استدامة إنتاجية الأرض Sustainable land productivity ضرورة الفهم الجيد لدور عمليات الحراثة Tillage في زيادة معدل فقد الكربون من التربة وارتباط ذلك بتدني خصوبة التربة وإنتاجيتها، وكفاءة التربة على احتجاز الكربون Carbon sequestration، وانعكاس نوعية التربة على إنتاجية المحصول المزروع. وقد أشارت العديد من الدراسات الطويلة الأمد على كربون التربة إلى دور الفلاحة المكثفة، وإدارة بقايا المحصول في تحديد مقدار الفقد الحاصل في كربون التربة (Lal, 1997, Paul *et al.*, 1997). وقدَّر Paustian *et al.*, (1998) بأنَّ الإدارة الجيدة للأراضي الزراعية يمكن أنْ تمنع تدهور الأراضي، وتحسن حالة الأراضي المتدهورة Degraded soils، حيث يمكن أنْ يساعد ذلك في احتجاز كمية من الكربون في التربة تُقدّر بنحو 400 – 900 MMTCE (مليون طن متري من الكربون المكافئ) سنوياً. وبيَّن Lal (1997) أنَّه إذا ما تحول 15 % من الكربون الموجود في البقايا النباتية إلى كربون عضوي في التربة Soil organic (SOC) carbon، فيمكن أنْ يصل معدل احتجاز الكربون في التربة إلى قرابة 200 MMTCE سنوياً شرط الابتعاد عن نظام الفلاحة المكثفة واستبدال الفلاحة التقليدية بنظام الفلاحة الحافظة. وإذا ما استمرت عمليات تحسين إدارة بقايا المحاصيل والتحول من نظام الفلاحة التقليدي إلى الزراعة الحافظة Conservation tillage في الترب الطينية Mineral soils كما هو عليه الأمر خلال العقد المنصرم، فيمكن

أنْ تصل كمية الكربون المتراكم في التربة إلى قرابة 1500 –4900 مليون طن متري من مكافئ الكربون في سنة 2020 (Lal, 1997).
ويساعد تطبيق نظام الزراعة الحافظة بالإضافة إلى تحسين محتوى التربة من المادة العضوية، في تحقيق الكثير من الفوائد الاقتصادية والبيئية، مثل الحد من انجراف الترب Soil erosion، وتقليل تكاليف استهلاك الطاقة، وتحسين قدرة التربة على الاحتفاظ بالماء، وتحسين نوعية المياه، وتنظيم درجة حرارة التربة Soil Temperature regulation، وتحسين قوام التربة وبنائها. وتؤدي كل هذه العوامل إلى تحسين إنتاجية الأرض والمحصول.

يُعزى الانخفاض الكبير في محتوى التربة من الكربون العضوي إلى فقد الكربون من التربة بسبب الفلاحة، حيث استخدم المحراث القلاَّب Mouldboard plough لفلاحة التربة، والمحاريث القرصية Disk harrow، وزراعة الأنواع المحصولية الحولية (Wagner, 1989). ويؤدي استخدام المحاريث القلاَّبة في الفلاحة إلى فقد الكربون من التربة خلال دقائق بعد عملية الفلاحة. وقدرت كمية الكربون المفقود من التربة بعد مرور 90 يوماً على فلاحة التربة باستخدام Mouldboard plough بنحو 134 % من الكربون الموجود في بقايا محصول القمح السابق. ومن أهم العواقب الوخيمة لعمليات فلاحة التربة أنها تعمل على قلب التربة وخلخلتها، مما يساعد في تسريع معدل فقد الكربون وازدياد معدل دخول الأوكسجين (O_2) إلى التربة وأكسدة المادة العضوية Organic matter. وتعمل أيضاً على طمر بقايا المحصول في التربة وقلبه، ما يزيد من تعرضها إلى هجوم الكائنات الحية الدقيقة.

تخل عمليات الفلاحة عموماً بنظام التربة وتوازن الغازات فيها، من خلال تسريع معدل انطلاق غاز الفحم، ودخول الأوكسجين، مما يساعد في زيادة معدل أكسدة المادة العضوية ، وفقدها من التربة، ويساعد تبعاً لذلك نظام الفلاحة المخففة، أو البذر المباشر (بدون فلاحة No-tillage) في الحد من فقد الكربون بسبب الفلاحة، ومن ثمَّ المحافظة على محتوى التربة من الكربون العضوي (Lal, 1997; Paustian *et al.*, 1997b). ويحتاج الإنتاج الزراعي المستدام تقانات جديدة لاستعمال الكربون بشكلٍ فعَّال Efficient biomass carbon utilization. وتعد بقايا المحصول Crop stover مصدراً متجدداً مهماً يمكن إدارته ليخدم كمصدر رئيس للكربون في التربة. وبيَّن Lal (1997) بأنَّ مساحة الأراضي الزراعية عالمياً تقدَّر بنحو 1.4×10^9 ha، تنتج سنوياً 3.44×10^9 Mg من بقايا المحصول. وإذا كان متوسط محتوى الكربون قرابة 45 غ. كغ $^{-1}$ من بقايا المحصول، فتقدر كمية تمثيل الكربون

الكلية بنحو 1500 مليون طن متري مكافئ كربون سنوياً، في حين تحول نسبة كبيرة جداً من الكربون العضوي إلى CO_2 عندما تفلح التربة وتخلط بقايا المحصول فيها بفضل الأحياء الدقيقة، ويبقى جزء بسيط على شكل دبال Humus.

على مستوى المراعي الطبيعية: من المعروف بأنَّ الجذور تنقل الماء والعناصر المعدنية المغذية إلى الأجزاء الهوائية النامية. وعندما تُرعى النباتات بشكلٍ جائر Overgrazed، سوف يتوقف نمو الجذور، الذي يتسبب بدورهِ في توقف نمو الأوراق. لذلك تعد عملية الإدارة السليمة للمرعى من أهم سبل المحافظة على استدامة إنتاجيته، وتتضمن الإدارة الحكيمة ما يلي:

1. تعاقب الرعي مع إعطاء فترة استراحة كافية لتتمكن النباتات من استعادة نموها.
2. ترك من (10 – 15 سم) من النبات فوق سطح الأرض عند نهاية كل فترة رعي.
3. تطبيق تقانات حصاد المياه، لزيادة كمية المياه المتاحة للنباتات الرعوية، بما يضمن استعادة نموها بوتيرةٍ سريعة.

ويعتمد إنتاج العلف في المراعي الطبيعية بشكلٍ رئيس على مياه الأمطار. ويسبب الرعي الجائر خلال فترات الجفاف ضرراً أكبر للأنواع النباتية المعمرة بالمقارنة مع فترة توافر المياه. حيث يقلل الرعي الجائر من قوة النمو في النبات Plant vigour، ويوقف نمو الجذور والأوراق ويقلل التغطية النباتية، ويسرّع من عملية الانجراف. ويؤدي ذلك إلى تدهور المرعى، وقد تصل إلى مرحلة يصبح من العسير جداً إعادة تأهيل المراعي. وللمحافظة على إنتاجية المراعي الطبيعية، ولاسيما خلال فترات الجفاف، يجب مراعاة النقاط الآتية:

1. تقليل أعداد الثروة الحيوانية بما يتناسب وإنتاجية المرعى.
2. قم ببيع العجول الصغيرة Calves والحملان Lambs بوقتٍ مبكر.
3. حدد الاحتياجات العلفية، وقمْ بشراء الكمية المطلوبة من الأعلاف الداعمة بوقتٍ مبكر.
4. قمْ بزراعة محاصيل الحبوب الشتوية العلفية ذات المتطلبات المائية الأقل (الشعير والذرة البيضاء) لتأمين مصدر إضافي من الأعلاف المركزة (الحبوب)، والجافة (الدريس).
5. تقليل أعداد الحيوانات في القطعان الزائدة عن العدد الطبيعي، من خلال بيع الحيوانات الأضعف أو ذبحها.
6. ألتأخير في زراعة النوع النباتي (الرعوي، العلفي) إلى حين يكون معدل الهطول المطري عالياً نسبياً، وكافياً لتأمين احتياجات النباتات المائية، لضمان إنبات واسترساء جيدين، وكتلة حيوية عالية.

سبل مواجهة التبدلات المناخية:

1. التكيف Adaptation: يعرّف بأنه مجموعة الأفعال التكيفية Adaptive actions التي يجب أنْ تعتمد/ تُطبق لتقليل التأثيرات السلبية الناتجة عن التبدلات المناخية في الزراعة. وأهم الإجراءات على مستوى المزرعة هي:

1. زراعة الأصناف المتأخرة بالنضج Late-maturing crop varieties.
2. تغيير الدورات الزراعية.
3. الزراعة المبكرة.
4. ضبط مواعيد العمليات الزراعية.
5. المحافظة على محتوى التربة المائي، وتحسين إنتاجية المياه Water productivity من خلال اتباع نظم الفلاحة المناسبة (الفلاحة المخففة، أو بدون فلاحة No-till).
6. تحسين كفاءة الري.

وتتمثل أحد أهم الاستجابات التكيفية وأرخصها، باستنباط الأصناف عالية التحمل للجفاف والحرارة المرتفعة من خلال استثمار المصادر الوراثية Genetic resources الأكثر تكيفاً مع الظروف المناخية الجديدة كآباءٍ في برامج التربية والتحسين الوراثي. ويتم ذلك من خلال غربلة المادة الوراثية Germplasm الموجودة في بنوك الأصول الوراثية، وانتخاب الطرز الوراثية التي تحتوي على المورثات المسؤولة عن مقاومة الأمراض، والحشرات، والآليات المرتبطة بتحمل الجفاف والحرارة المرتفعة، وتتمتع باستجابة/توافق عاليين Better compatibility مع حزمة التقانات الزراعية الجديدة المعتمدة. عموماً، تحتاج عملية استخدام الموارد الطبيعية المتجددة (التربة، والمياه) بشكلٍ فعَّال ومستدام في ظل التبدلات المناخية المستقبلية كمٍّ كبير من الاستثمارات المالية، والإمكانيات البحثية.

2. التقويم على المستوى الإقليمي والعالمي: يُمكن استعمال بعض النماذج الرياضية، مثل Global Circulation Models (GCM´s) التي تحسب التغيرات الزمانية والمكانية في درجات الحرارة والرطوبة على سطح الأرض، وفي الغلاف الجوي. وتستخدم هذه النماذج الرياضية للتنبؤ بالتبدلات الحاصلة في درجات الحرارة، ومعدل الهطول المطري، وشدة الإشعاع الشمسي، والمتغيرات المناخية الأخرى نتيجة ازدياد تركيز غازات الدفيئة في الغلاف الجوي. ونحن بحاجة إلى مثل هذه البحوث الشاملة، التي تضم مختلف العلوم التخصصية لتحسين فهمنا للتأثيرات البيوفيزيائية والاجتماعية،

والاقتصادية المتبادلة التي يمكن أنْ تتمخض عن التبدلات المناخية. وتتوقع النماذج الرياضية المستندة على تقييمات الهيئة العالمية للتبدل المناخي أنْ يكون مقدار التغير في درجة حرارة سطح الأرض بنحو 1.5- 4.5ْم مع حلول عام 2050 نتيجة ازدياد تركيز غازات الصوب الزجاجية. واقترحت دراسات النماذج الرياضية الخاصة بحساسية الزراعة العالمية للتبدلات المناخية المحتملة أنَّ التأثير العام Overall effect للتبدل المناخي المعتدل (المتوسط الشدة) سيكون صغيراً في إنتاج الغذاء العالمي، لأنَّ انخفاض الإنتاج في بعض المناطق عادةً ما يوازن/يُعّدل نتيجة ازدياد الإنتاج في مناطق أخرى. وبينت الدراسات نفسها بأنَّ الحساسية للتبدلات المناخية ستكون أكبر في الدول النامية، التي يقع معظمها عند خطوط العرض السفلى الأكثر سخونة. ويتوقع في تلك المناطق أن تنخفض غلَّة محاصيل الحبوب بشكلٍ كبير، وسيربح بالمقابل المصدرون للمنتجات الزراعية عند خطوط العرض الوسطى والعليا (الولايات المتحدة الأمريكية، وكندا، واستراليا)، بسبب ازدياد إنتاج محاصيل الحبوب لديهم نتيجة ازدياد معدل الهطول المطري إثر التبدلات المناخية في تلك الدول، ولاسيما إذا ما تزامن ذلك مع ارتفاع أسعار محاصيل الحبوب، وهذا ما حصل فعلاً في الوقت الراهن. لذلك ستواجه الدول ذات الدخول المتدنية صفعة قوية. ويمكن أنْ تعاني المناطق البعيدة عن مصادر الهطول المطري من القحط المتزايد Increased aridity، في حين تستفيد المناطق الواقعة ضمن خطوط الهطول المطري من ازدياد معدل الهطول المطري فيها. عموماً، تتوقف كفاءة دولة ما على الاستفادة من المنافع الناتجة عن التبدلات المناخية، أو تجنب الأضرار على مدى إتاحة المصادر الكافية، ومستوى البنى التحتية، وغنى المجتمعات، بالإضافة إلى مستوى المؤسسات البحثية، وكفاءتها في التهيؤ لدرء المخاطر التي يمكن أنْ تنتج عن التبدلات المناخية.

الإجراءات الاحترازية حيال التبدلات المناخية: تتمثل المشكلة في الدول النامية في أنها تحذو حذو الدول المتقدمة في تحسين مستوى المعيشة للسكان من خلال حرق كميات كبيرة من الوقود الاحفوري (الفحم الحجري Coal، والنفط Oil)، ويعد كلٍ من الفحم الحجري والبترول المصدرين الرئيسيين لغاز ثاني أوكسيد الكربون (CO_2). وللأسف لم يتم حتى الآن إلى التوصل إلى مصدر وافر من الطاقة البديلة ذات التكلفة المنخفضة. ومما يزيد الطين بلّةً في مثل هذه الدول، هو ازدياد التعداد السكاني بشكلٍ مريع.

وتوجد ثلاثة خيارات رئيسة للتعامل مع التبدلات المناخية، هي:

1. **آليات خفض انبعاث غازات الصوب الزجاجية Abatement:** تهدف هذه الآلية إلى تقليل انبعاثات غازات الدفيئة، التي تسبب التبدلات المناخية، وتتضمن آليات تحسين كفاءة الطاقة Improving energy efficiency، وبذلك نتمكن من حرق كميةٍ أقل من الوقود، ونستطيع أنْ نستخدم مصادر أخرى من الطاقة النظيفة، مثل الطاقة الشمسية، والطاقة النووية. وتتضمن هذه الاستراتيجيات:
   - تحسين كفاءة الطاقة Improved energy efficiency.
   - استخدام مصدر أنظف للطاقة Use of cleaner energy.
   - إحداث تغيرات في النظم الزراعية والغابوية.
2. **التكيف Adaptation:** وتتمثل بإيجاد السبل المناسبة للتعايش بنجاح مع الظروف الجديدة. مثل تغيير استعمالات الأراضي، وحفر الآبار، وإنشاء السدود التخزينية لإيصال المياه إلى المناطق الجافة. ويمكن حماية سكان المناطق الساحلية من ارتفاع منسوب مياه البحر، من خلال بناء الجدر البحرية، ومن خلال حماية مصادر المياه العذبة من طغيان مياه البحر المالحة.
3. **هندسة الغلاف الحيوي الأرضي Geo-engineering:** مثال ذلك، فإنَّ كمية الإشعاع الشمسي التي تصل إلى سطح الأرض يمكن تقليلها من خلال نثر جزيئات صغيرة جداً في الغلاف الجوي العلوي، التي تساعد في عكس جزء كبير من الأشعة الشمسية إلى الفضاء الخارجي. ولكن يعارض الكثير من الناس فكرة إعادة هندسة الغلاف الحيوي الأرضي، خشية من العواقب الضارة، غير المحسوبة له، ولكن عندما تحدث التبدلات المناخية بشكلٍ سريع وحاد، فستكون هناك حاجة ملحة لذلك ولاسيما أنها وسيلة رخيصة نسبياً.

تحسين كفاءة الطاقة Improving energy efficiency: يساعد تحسين كفاءة الطاقة في تقليل انبعاثات غاز الفحم CO_2، الذي يعد من أكثر غازات الدفيئة أهمية. ومن أهم الإستراتيجيات التي يمكن أنْ تساعد في ذلك ما يأتي:

1. تقليل استعمال الطاقة في الأبنية: فعلى سبيل المثال، ففي الولايات المتحدة الأمريكية فإنَّ $^1/_3$ الطاقة الكهربائية الإجمالية تستعمل في الأبنية، لأغراض التدفئة Heating والتبريد Coding، والإنارة Lighting. وقدَّر الباحثون بأنَّ تحسين عملية العزل Insulation واستخدام الزجاج بدلاً من الجدران الإسمنتية في جزء كبير من البناء Glazing، وتحسين كفاءة الأفران، والمكيفات، واستخدام مصابيح توفير الطاقة في المنازل والمراكز التجارية يمكن أنْ يقلل انبعاثات غاز الفحم بنحو 360 مليون طناً في السنة أي ما يقارب 5% من إجمالي انبعاثات CO_2 في الولايات المتحدة الأمريكية.
2. تحسين كفاءة الوقود في السيارات الجديدة من خلال زيادة المسافة التي تقطعها السيارة باستهلاك كمية أقل من الوقود.

3. تحسين كفاءة/ فعَّالية الأدوات المنزلية: تسمح التقانات المتطورة في زيادة كفاءة أداء البرَّدات والأدوات المنزلية الأخرى بشكلٍ فعَّال. حيث يساعد ذلك في استخدام كمية أقل من الطاقة، والحد من انبعاث غاز الفحم. عموماً، إذا تمكنا من زيادة كفاءة أداء السيارات، والأدوات المنزلية باستخدام كمية أقل من الطاقة، فسوف لن نحتاج إلى حرق كميات كبيرة من الفحم الحجري، والبترول المسؤولة بشكلٍ رئيس عن ارتفاع تركيز CO_2 في الغلاف الجوي. وتعد عملية زيادة كفاءة الطاقة في النقل Transportation والمنازل Homes، والمكاتب، والمصانع بمنزلة الوسيلة الأفضل لخفض انبعاثات CO_2 بدون خفض مستوى الرفاهية.

الأشياء التي يمكن أنْ يقوم بها الفرد لتقليل فرصة حدوث التبدلات المناخية

1. عندما تشتري سيارة، اختر السيارة الأكثر كفاءة في استعمال الوقود Good mileage.
2. قم بعزل منزلك أو شقتك بشكلٍ جيد، لتقليل استخدام الوقود/الكهرباء في الدفيئة والتكييف.
3. لا تعتمد في جميع حركاتك على السيارة.
4. استبدال الأدوات المنزلية القديمة، والتالفة (مثل، البرَّاد، والغسالة، وأجهزة التسخين...الخ) بأخرى حديثة وذات كفاءة عالية في استخدام الطاقة.

إجراءات أخرى مساعدة، ولكنها أقل فعَّالية

1. أطفئ الأنوار، والأدوات الكهربائية في حال عدم الحاجة.
2. ازرع الأشجار لتوسيع رقعة المساحات الخضراء التي تعد مصاباً طبيعياً Natural sinks لغاز الفحم، بفضل عملية التمثيل الضوئي.
3. أعد تدوير المخلفات.

المنافع الناجمة عن التبدلات المناخية: يمكن أنْ يؤدي أيضاً ارتفاع تركيز CO_2 إلى زيادة معدل نمو النبات بشكلٍ مباشر، ومن ثمَّ الإنتاجية. ويُسمى هذا اصطلاحاً CO_2 Fertilization Effect وهذا ما قاد بعض العلماء إلى القول بأنَّ تأثير غازات الدفيئة يمكن أنْ يكون نعمة مخفية. وبينت التجارب في غرف النمو أنْ زيادة تركيز غاز الفحم (CO_2) قد شجعت نمو النباتات وإنتاجية النظام البيئي من خلال زيادة معدل التمثيل الضوئي Photosynthesis، وتقليل معدل التنفس الضوئي Photorespiration، ولاسيما في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون C_3 plants وتحسين امتصاص العناصر

المعدنية المغذية Nutrient uptake. واستعمالها، ويؤدي إلى زيادة كفاءة استعمال الماء WUE (OTA, 1993). وقد تشجع الباحثون بهذه المنافع بافتراض أنَّ زيادة إنتاجية النظام البيئي سوف تساعد في استهلاك كمية أكبر من CO_2 من الغلاف الجوي، مما يحد من ارتفاع درجة الحرارة، ولكن إنتاجية النظام البيئي الزراعي يمكن أن تزداد استجابةً لارتفاع CO_2 فقط في البيئات التي تكون فيها مصادر الطاقة الضوئية، والمياه، والعناصر المعدنية المغذية متاحة بكمياتٍ كافية (OTA, 1993).

حساسية النظم البيئية الزراعية للتبدلات المناخية:

نظراً إلى أهمية محصول القمح عالمياً، وعربياً، وباعتباره محور دراسة برنامج الحبوب في إدارة الموارد النباتية في المركز العربي (أكساد)، فسنحاول تسليط الضوء على تأثير التبدلات المناخية المستقبلية في الصفات المورفو فيسيولوجية، والكمية، والنوعية لمحصول القمح Wheat.

يُعد محصول القمح أهم محصول حبي على مستوى العالم من حيث الغلة الحبية الإجمالية المحصودة، وكمية المادة النباتية (حبوب، كتلة حيوية) المستخدمة في تغذية الإنسان والحيوان (Evans, 1998). تقدَّر كمية إنتاج القمح السنوية عالمياً بنحو 600 مليون طن من الحبوب، ويؤمن القمح قرابة 20 % من الطاقة Energy، و 25 % من احتياجات البروتين العالمية للسكان البالغ تعدادهم نحو 6.6 بليون نسمة. بالإضافة إلى ذلك، يسهم القمح في تغذية الحيوانات التي تضيف اللحم والحليب إلى غذاء الإنسان. عموماً، فإنَّ العوامل التي تؤثر سلباً في إنتاج القمح، أو تزيد من تكاليف إنتاجه، ستؤثر سلباً في جميع المجتمعات البشرية، لأنَّ القمح السلعة التجارية الأكثر تداولاً في العالم (Gooding and Davies, 1997). يزرع القمح ضمن مدىً واسع من البيئات، تمتد من القطب الشمالي وحتى خط الاستواء، ومن مستوى سطح البحر وحتى ارتفاع 3000 م فوق سطح البحر. عموماً، فإنَّ أنسب مناطق لزراعة القمح هي ضمن خطوط العرض 30 – 50° شمالاً، و 25 – 40° جنوباً (Gooding and Davies, 1997). ويُعد القمح المصدر الرئيس لغذاء التعداد السكاني المتزايد، والذي قدِّر بنحو 1.5 بليون نسمة عام 1900، ووصل إلى 5.5 بليون عام 1993، ويمكن أنْ يصل حتى 11 بليون خلال منتصف القرن الحادي والعشرين. ويستورد القمح من عدد من الدول، مثل مصر والاتحاد السوفيتي السابق، والصين، واليابان، واندونيسيا، ما يشير إلى أنَّ مثل هذه الدول ذات النمو الاقتصادي الضعيف والنمو السكاني المريع يمكن أنْ تواجه مشاكل جمة إذا ما تراجع إنتاج محصول القمح جرَّاء التبدلات المناخية. ويحتاج العالم بأسره، أنْ يحقق زيادةً في إنتاج محاصيل

الحبوب عامةً مقدارها 35 – 40 %، ويجب أنْ يشكل القمح النسبة الأكبر منها، حتى يتمكن من تأمين كامل الاحتياجات الغذائية (Ansart, 1997). كانت إنتاجية القمح قرابة 1 طن. هكتار$^{-1}$ كقيمة متوسطة للإنتاجية العالمية خلال النصف الأول من القرن العشرين، ولكنها ازدادت لتصل 2.5 طن. هكتار$^{-1}$ حالياً (Slafer *et al*., 1996). وفي المناطق المناسبة جداً لإنتاج القمح، مثل أوروبا الغربية التي تتسم بمناخٍ باردٍ ورطب، وموسم نمو طويل، ونهار طويل، وتربة خصبة، فإنَّ إنتاجية أصناف القمح شبه القزمة الحديثة، وضمن نظم الإدارة المكثفة للمحصول (التسميد ومكافحة الأمراض والحشرات) قد وصلت إلى 10 طن. هكتار$^{-1}$، وأحياناً حتى 12 طن. هكتار$^{-1}$، وكان متوسط الإنتاجية قرابة 7 طن. هكتار$^{-1}$. ولكن تباطأ خلال العقد الماضي معدل الزيادة في إنتاجية القمح، وتراجعت المساحة المزروعة بنحو 8 %. ويمكن إذا ما استمر مثل هذا التراجع أنْ يؤدي إلى حدوث عجز/ نقص كبير في مثل هذه المادة الغذائية المهمة. كان احتياطي القمح العالمي يقدَّر بنحو 35 % من الإنتاج الكلي في أوائل الثمانينات بسبب التأثير التراكمي لزيادة الإنتاجية نتيجة دعم الحكومات للبحوث العلمية والمزارعين، في حين لا يتجاوز الاحتياطي الحالي أكثر من 18% من الاستهلاك، وهذا أعلى بقليل من الاحتياطي الموصى به (15 %) من قبل منظمة الزراعة والأغذية (FAO) (Ansart, 1997). تشير هذه الأرقام إلى وجود حاجة ملحة جداً Urgent need لزيادة حجم الاستثمارات اللازمة لتحسين إنتاج القمح الكلي ليلبي الاحتياجات البشرية المتزايدة، والتأثيرات السلبية المتوقعة نتيجة التبدل المناخي العالمي Global Environmental Change (GEC). عموماً، تشير العديد من الدراسات إلى إمكانية ارتفاع تركيز غاز الفحم الجوي (CO_2) إلى 555 ميكرومول CO_2/ مول، الذي يؤدي بدوره إلى ارتفاع درجة الحرارة بمقدار 4°م، الأمر الذي سيؤثر سلباً في إنتاجية الأنواع المحصولية عامةً، والقمح خاصةً. ويمكن أنْ تزداد نسبة السكان الذين يتعرضون إلى خطر الجوع من 6 – 50 %.

تأثير ارتفاع غاز الفحم والحرارة في عملية التمثيل الضوئي في محصول القمح: يؤدي ارتفاع تركيز غاز الفحم إلى زيادة معدل صافي التمثيل الضوئي(Pn) Net Assimilation rate، ويقلل بالمقابل من معدل التنفس الضوئي Photorespiration (Pr) في جميع الأنواع النباتية ثلاثية الكربون، مثل القمح Wheat. وتؤدي مضاعفة تركيز غاز الفحم إلى زيادة معدل التمثيل الضوئي بنحو 30 – 40 % (في حال وجود شدة ضوئية مناسبة، وعند درجة حرارة 25 – 30°م)، ومن ثمّ كمية المادة الجافة المصنّعة، والمتاحة لنمو أجزاء النبات المختلفة وتطورها (Long, 1991). ورغم أنّ ارتفاع تركيز غاز الفحم الجوي يؤدي إلى تراجع الناقلية المسامية (gs) Stomatal conductance، التي يساعد بدورها، في تقليل معدَّل فقد الماء بالتبخر – نتح

Transpiration إلاَّ أنَّ التدرج الكبير في تركيز غاز الفحم سيكون كافياً للمحافظة على معدل انتشار غاز الفحم الداخلي Intercellular CO_2 concentration (Ci)، مما يساعد في استمرار ازدياد معدل صافي التمثيل الضوئي (Farquhar and Caemmerer, 19982). عموماً، فإنَّ الزيادة الأولية في معدل صافي التمثيل الضوئي لدى الأنواع النباتية ثلاثية الكربون (C_3 Plants) عادةً ما تبدأ بالتراجع إذا ما تعرضت النباتات لارتفاع غاز الفحم Elevated CO_2 لفترةٍ زمنية طويلة (Drake *et al.*, 1997). ويعزى ذلك إلى فقد المكونات التمثيلية Loss of photosynthetic components، وتراجع فعَّلية الأنزيمات المهمة في عملية التمثيل الضوئي، وخاصةً الأنزيم RuBisCo الذي يتوسط تفاعل ضم CO_2 إلى المستقبل الأولي المركب خماسي الكربون (RuBp). ولوحظ بشكلٍ عام تراجع كفاءة نباتات القمح التمثيلية Photosynthetic capacity المزروعة في أوساط تحتوي على تراكيز مرتفعة من غاز الفحم، بسبب تراجع كلٍ من كمية وفعَّالية الأنزيم RuBisCo (Mckee and Woodward, 1994b). وبيّنت دراساتٍ أخرى حدوث ازدياد ملموس في معدل صافي التمثيل الضوئي (31 %) في نباتات القمح المروية والمسمدة بكمياتٍ كافية من الآزوت، وذلك عندما زرعت في غرف نمو تحتوي على تركيزٍ مرتفع من غاز الفحم (550 ميكرومول CO_2/ مول) بالمقارنة مع الشاهد (380 ميكرومول CO_2. مول$^{-1}$) (Nie *et al.*, 1995a). ولكن لوحظ بشكلٍ عام، أنَّ ارتفاع تركيز غاز الفحم لا يؤثر سلباً في كفاءة الأوراق الفتية التمثيلية، ولا حتى في كمية البروتينات الذوَّابة فيها، ولكن لوحظ تأثير واضح في كفاءة الأوراق العلمية Flag leaf التمثيلية خلال فترة امتلاء الحبوب Grain filing period، حيث لوحظ انخفاض محتوى الأنزيم RuBisCo بنحو 45 % في النباتات غير المعاملة، في حين وصلت نسبة الانخفاض إلى 60 % في النباتات المعرّضة إلى مستويات مرتفعة من غاز الفحم (Nie *et al.*, 1995a,b). عموماً، عادةً ما يلاحظ ارتفاع تركيز غاز الفحم في أوراق نباتات القمح التمثيلية خلال المراحل المتقدمة من حياة النبات، ولاسيما مرحلة امتلاء الحبوب، وفي حالة عدم كفاية التسميد الآزوتي N- deficiency. ونظراً لأهمية الورقة العلمية في مدِّ الحبوب (<50 %) بنواتج التمثيل الضوئي خلال مرحلة امتلاء الحبوب، ولا سيما أنّها الورقة الوحيدة التي تبقى خضراء وفعَّالة في عملية التمثيل الضوئي، فإنَّ أي تراجع في كفاءتها التمثيلية سيؤثر سلباً في درجة امتلاء الحبوب، ومتوسط وزن الألف حبة، ومن ثمّ غلة المحصول الحبية. ولكن يمكن تحسين استجابة نباتات الأنواع النباتية ثلاثية الكربون (مثل، القمح) لارتفاع تركيز CO_2 من خلال تأمين مصدر كافٍ من الآزوت للمحافظة على محتوى الأوراق من الأنزيمات الفعّالة في تثبيت الكربون (RuBisCo)، وهذا ما يسمى

اصطلاحاً بالأقلمة الموجبة Positive acclimation (Habash *et al*., 1995)، حيث تشجع مثل هذه الظروف النمو الزائد للمجموعة الجذرية، وتزيد من امتصاص الآزوت. ويمكن أنْ يُعزى أيضاً التراجع في كفاءة أوراق نباتات القمح التمثيلية عند ارتفاع تركيز غاز الفحم إلى اختلال التوازن بين المصدر والمصب Sink- source balance، حيث تؤدي زيادة معدل التمثيل الضوئي الأولية إلى تراكم نواتج التمثيل الضوئي، وفي حال عدم وجود تصريف/ استهلاك للمادة الجافة المصنعة فسوف يتراجع معدل التمثيل الضوئي، وهذا ما يسمى اصطلاحاً بتأثير المنتج النهائي (Morison and Lawlor, 1999). فعلى سبيل المثال، إذا كانت كمية السماد الآزوتية محددة Fixed، وأدى ارتفاع تركيز غاز الفحم إلى زيادة معدل نمو النبات، والمساحة الورقية، فسوف يتراجع محتوى الأوراق من المركبات الآزوتية (البروتينات) (RuBisCo)، مما يؤدي إلى تراجع كفاءة النباتات التمثيلية. وإذا أدى ارتفاع CO_2 إلى تحريض تشكل عدد أكبر من السنابل والحبوب، فسيؤدي ذلك إلى زيادة حجم المصب، وكفاءته في استجرار كميةٍ أكبر من الآزوت من الأنسجة التمثيلية (الأوراق) خلال فترة امتلاء الحبوب، مما يؤدي إلى اصفرار الأوراق، وشيخوختها بشكلٍ مبكر Premature senescence، فيتراجع حجم المسطح الورقي الأخضر الفعَّال في عملية التمثيل الضوئي، وكفاءة النبات التمثيلية. ويؤدي أيضاً ارتفاع تركيز غاز الفحم إلى تقليل الناقلية المسامية (gs) بشكلٍ كبير، أو حتى أحياناً الانغلاق التام للمسامات، مما يؤدي إلى تعطيل التأثير المبرّد Cooling effect لعملية فقد الماء بالنتح، فترتفع درجة حرارة الأوراق ويمكن أن تحترق أو تصاب باليباس بشكلٍ مبكر. وعندما يضاف الآزوت إلى التربة سوف يزداد معدل نمو الجذور Root growth، وتزداد كفاءة الجذور في امتصاص الآزوت، بالإضافة إلى أنَّ نمو الجذور يستهلك جزءً من نواتج التمثيل الضوئي (زيادة نقاط التصريف).

تأثير ارتفاع غاز الفحم في الناقلية المسامية: لوحظ في محصول القمح، انخفاض الناقلية المسامية بمقدار 30 – 40 % عند ارتفاع تركيز غاز الفحم بمقدار الضعف بالمقارنة مع التركيز الحالي (Samarakoon *et al*., 1995)، ويعزى ذلك إلى تغيير درجة انفتاح المسامات Aperture لأنَّ الكثافة المسامية Stomatal density (عدد المسامات في وحدة المساحة الورقية) والتكرار المسامي Stomatal index (نسبة المسامات إلى عدد خلايا البشرة في الورقة) لا تتأثر بارتفاع تركيز غاز الفحم في الوسط المحيط خلال الموسم الواحد (Estiarte *et al*., 1994).

تأثير الحرارة المرتفعة في عملية التمثيل الضوئي: عادةً ما يكون معدل التمثيل الضوئي الصافي منخفضاً ولا يتجاوز 25 % من معدل التمثيل الضوئي الأعظمي عند درجة

حرارة 5ْم، ويزداد بازدياد درجة الحرارة، ثم يبدأ بالانخفاض تدريجياً عندما ترتفع الحرارة إلى ما فوق 25ْم، وتتوقف عملية التمثيل الضوئي عند حرارة 40ْم. ويسبب ارتفاع درجات الحرارة نتيجة ارتفاع تركيز الملوثات الجوية تراجعاً في معدل صافي التمثيل الضوئي، بسبب تراجع الناقلية المسامية نتيجة ازدياد معدل فقد الماء بالتبخر–نتح، مما يؤثر سلباً في معدل انتشار غاز الفحم عبر المسامات، وتقل كمية CO_2 الواصلة إلى مراكز التثبيت في الصانعات الخضراء (Stroma). ويؤدي ارتفاع الحرارة إلى زيادة معدل التنفس الضوئي نتيجة انخفاض نسبة CO_2/O_2 في مراكز التثبيت ضمن الصانعات الخضراء. ويؤدي ارتفاع الحرارة إلى تخريب الأنزيم المؤكسد ضوئياً للماء مما يؤثر سلباً في معدل تحرير الإلكترونات والبروتونات، ومن ثمَّ معدل تصنيع المركبات الغنية بالطاقة (ATP, NADPH)، فيتراجع معدل تمثيل الكربون في حلقة إرجاع الكربون الثلاثية.

تأثير ارتفاع غاز الفحم والحرارة في التنفس: يُعد التنفس الظلامي من المكونات الرئيسة المحدددة للإنتاجية. ويستهلك تقريباً 50 % من إجمالي عملية التمثيل الضوئي المصنّعة بالتمثيل الضوئي بوساطة التنفس (Amthor, 1997)، لذلك فإنّ معدل صافي التمثيل الضوئي (Pn) يتحدد بشكلٍ رئيس بمعدل التمثيل الضوئي، ومعدل أكسدة المادة الجافة بالتنفس.

تأثير الحرارة وارتفاع غاز الفحم في تطور المحصول: بيّنت الدراسات في محصول القمح أنَّ ارتفاع الحرارة بمعدَّل درجة مئوية واحدة أعلى من المعدَّل الأمثل (30ْم) يمكن أنْ يقلل من فترة نمو المحصول بنحو 21 يوماً (8 %) وطول فترة النمو الثمري Reproduction period بنحو 8 أيام (6 %). وتقصّر الفترة من الإزهار Anthesis إلى النضج Maturity بنحو 3 أيام، في حين تقصّر فترة امتلاء الحبوب Grain-fill بنحو يومين (5 %) لكل ارتفاع مقداره درجة مئوية واحدة (Mitchell *et al.*, 1995). ولوحظ وجود اختلافات واضحة في الاستجابة بين الأصناف (Batts *et al.*, 1998a). ويؤدي بشكلٍ عام انخفاض درجات الحرارة أو ارتفاعها بشكلٍ متطرف إلى تردي إنتاجية محصول القمح، حيث يسبب الصقيع المتأخر عقماً في الزهيرات المتشكلة Sterility (Russell and Wilson, 1994). وتسبب درجات الحرارة المنخفضة جداً (أقل من 5ْم)، والمرتفعة (أعلى من 30ْم) خلال فترة الإزهار تراجعاً في حيوية حبوب الطلع Pollen viability، مما يؤثر سلباً في نسبة الإخصاب Fertilization، والعقد Setting، ومن ثمَّ عدد الحبوب المتشكلة في وحدة المساحة، فتراجع غلة المحصول الحبية (Dawson and wardlaw, 1989).

تأثير غاز الفحم والحرارة في الكتلة الحية والغلة الحبية: تُعبّر الزيادة الحاصلة في معدل صافي التمثيل الضوئي عن كمية المادة الجافة المتراكمة. ويتراوح مقدار الزيارة في الكتلة الحية لمحصول القمح عند زيادة تركيز غاز الفحم بمقدار الضعف بين 0–40%. وبينت دراسة أولية Lawlor and Mitchell (1991) أنَّ استجابة نباتات القمح لارتفاع تركيز غاز الفحم تراوحت من 30 % زيادةً في الكتلة الحية عند مضاعفة تركيز غاز الفحم في وسط النمو إلى فقط 20 % عند زيادة تركيز غاز الفحم بنحو أربعة أضعاف. وعادةً ما يؤدي ارتفاع تركيز غاز الفحم إلى زيادة معدل نمو كل أجزاء النبات تقريباً، وتعد السوق الرئيسة الأقل تأثراً بارتفاع تركيز غاز الفحم، ولكن عادةً ما يزداد حجم الورقة Leaf size، وعدد الحبوب في السنبلة، وحجم الحبوب Grain size. وتختلف الزيادة حسب الظروف المناخية السائدة في موقع الدراسة، والصنف المزروع. وعادةً ما تكون الزيادة في غلة محصول القمح الحبية نتيجة ارتفاع تركيز غاز الفحم مماثلة للزيادة الحاصلة في الكتلة الحية، ولكن ليس دائماً (Mitchell *et al*., 1995; Batts *et al*., 1997). وتعد الغلة الحبية أكثر حساسية لإنتاج الكتلة الحية خلال مرحلة الطلب على نواتج التمثيل الضوئي (20 – 30 يوماً قبل الإزهار) بالمقارنة مع مرحلة النمو الخضري. ولوحظ بشكلٍ عام، أنَّ متوسط الزيادة في الغلة الحبية كان قرابة 11 % عند زيادة تركيز غاز الفحم بنحو 100 ميكرومول CO_2/ مول (Bender *et al*., 1999).

تأثير ارتفاع تركيز غاز الفحم في البيئات المجهدة مائياً: يأتي معظم إنتاج القمح من نظم الزراعة البعلية، ذات المصادر المائية المحدودة، لذلك تعد دراسة تأثير التبدلات المناخية في إتاحة المياه من القضايا الجوهرية. يؤدي ارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط المصاحب لارتفاع تركيز الملوثات الجوية، ولاسيما غاز الفحم إلى زيادة حدة فرق التدرج في ضغط بخار الماء بين الأوراق والوسط المحيط (VPD) (القوة المحركة لفقد الماء بالنتح)، ما يؤدي إلى زيادة معدل فقد الماء بالنتح، ولكن يؤدي تعرض النباتات إلى مستوياتٍ مرتفعة من CO_2 لفترة زمنية قصيرة إلى تراجع معدل فقد الماء بالنتح، بسبب تراجع الناقلية المسامية. وبينت التجارب المنفذة في البيوت الزجاجية أنَّ مضاعفة تركيز غاز الفحم قد أدت إلى تراجع استخدام الماء بنحو 20 % تحت الظروف الرطبة، في حين ازداد معدل استهلاك المياه بشكلٍ طفيف تحت ظروف الزراعة الجافة. ولوحظ أيضاً في البيئات المتحكم بظروفها Controlled environments، فقد تراجع معدل فقد الماء بالنتح بنحو 8 % فقط عند مضاعفة Doubling تركيز غاز الفحم خلال مرحلة النمو الخضري (Andre and du Cloux, 1993). ويؤدي على المدى البعيد، ارتفاع تركيز غاز الفحم إلى زيادة المساحة الورقية، وحجم المجموعة الجذرية، وعند ارتفاع الحرارة

فيمكن أنَّ ينخفض استهلاك المياه بشكلٍ أقل بكثير مما هو مقترح على المدى القصير (Chaudhuri *et al.*, 1990a). ولوحظ أنَّ زيادة تركيز غاز الفحم بمقدار 200 ميكرومول / مول قد أدى إلى خفض معدل فقد الماء بالتبخر– نتح في القمح بنحو 5 % في القطع التجريبية المروية، في حين ازداد معدل فقد الماء بالتبخر- نتح بنحو 3 % تحت ظروف الجفاف (Hunsaker *et al.*, 1997). ويمكن أنْ يكون ذلك بسبب تشكيل مجموع جذري أكبر، قادراً على استخلاص كمية أكبر من الماء، بالإضافة إلى تشكيل مسطح ورقي أكبر، ومن ثمَّ تصبح مساحة السطح المعرَّض بشكلٍ مباشر لأشعة الشمس أكبر وترتفع درجة حرارة الأجزاء الهوائية بشكلٍ أكبر، مما يؤدي إلى ازدياد VPD، ومن ثمّ معدل فقد الماء أثناء عملية التبادل الغازي عبر المسامات Stomata (Senock *et al.*, 1996). ولكن بالرغم من التأثير المحدود لارتفاع تركيز غاز الفحم في معدل التبخر – نتح (ET)، إلاَّ أنَّ ارتفاع تركيز غاز الفحم قد أدى إلى زيادة الكتلة الحية بشكلٍ كبير، ومن ثمَّ زيادة كفاءة استخدام الماء Water Us efficiency (WUE) بنحو 145 % في نظم الزراعة الجافة بالمقارنة مع نظم الزراعة الرطبة (21 % فقط). وازدادت كفاءة استخدام الماء بنحو 64 % نتيجة مضاعفة تركيز غاز الفحم تحت ظروف الجفاف في تجارب البيوت البلاستيكية في استراليا (Samarakoon *et al.*, 1995). وكانت الزيادة النسبية في الكتلة الحية Biomass أكبر تحت ظروف الزراعة الجافة، بالمقارنة مع الزراعة الرطبة، وأدى ذلك بالنتيجة إلى زيادة غلة محصول القمح الحبية بنحو 20 % في الزراعة الجافة، و 10 % فقط في القطع التجريبية المروية بكمياتٍ كافية من المياه (سبب الجفاف انخفاض الغلة الحبية بنحو 28 %).

تأثير ارتفاع تركيز غاز الفحم والحرارة في نوعية القمح: رغم الاهتمام الكبير الذي أولي لنوعية القمح من أجل الاستعمالات الغذائية والصناعية (Heyne, 1987)، إلاَّ أنه لا يزال هناك فهم قليل لتفاعل العوامل البيئية والوراثية المحددة لتراكيب حبوب القمح تحت الظروف البيئية السائدة حالياً.

يعمل ارتفاع تركيز غاز الفحم الجوي على تخفيض نسبة الآزوت في الحبوب، بسبب ازدياد كمية السكريات المصنعة بعملية التمثيل الضوئي والواصلة إلى الحبوب خلال فترة امتلاء الحبوب، أو من أجزاء المصدر المختلفة (Tester *et al.*, 1995; Batts *et al.*, 1997; Rogers *et al.*, 1998). ولا يؤدي ارتفاع تركيز غاز الفحم إلى تغيير تركيب السكريات، أي نسبة السكروز إلى النشاء (Rogers *et al.*, 1998). ولا يؤثر أيضاً في تركيب البروتين (Shewry *et al.*, 1994).

وبينت نتائج تحليل حبوب القمح الربيعي للصنف Hereward أنَّ ارتفاع درجات الحرارة قد سبب تراجعاً في وزن الحبوب، ومحتواها من النشاء، بسبب تشكل حبيبات نشاء من الطراز A أصغر، وتراجع الحبوب الخازنة للنشاء Amyloplasts في السويداء أو الأندوسبرم، وازدادت قابلية تجلتن النشاء Starch gelatinization (Tester *et al.*, 1995). عموماً، يؤدي ارتفاع درجات الحرارة، ولاسيما خلال مرحلة امتلاء الحبوب إلى تسريع معدل نقل المركبات الآزوتية من الأوراق إلى الحبوب، فتزداد نسبة البروتينات إلى النشاء في الحبة، وتنخفض نسبة الآزوت إلى الكربون في الأوراق، والتي عادةً ما تصفر وتتراجع كفاءتها التمثيلية.

تصميم أصناف القمح الملائمة للتبدلات البيئية العالمية: تتباين أصناف القمح بشكلٍ كبير في استجابتها لكلٍ من الحرارة المرتفعة (Batts *et al.*, 1998a,b)، وإلى حدٍ ما لارتفاع تركيز غاز الفحم (Batts *et al.*, 1998b). ويمكن أنْ يكون التباين في تأثير ارتفاع غاز الفحم غير مباشر، نتيجة الاختلافات في المراحل التطورية Phenology، وحجم المصب Sink size. ويُعد مثل هذا التباين الوراثي مهماً جداً للتربية لظروف التبدلات المناخية العالمية. وبما أنَّ ارتفاع الحرارة عادةً ما يسرّع من وتيرة النمو ويقصّر الأطوار الفينولوجية لنباتات المحصول، فيمكن تجاوز هذه المشكلة من خلال:

- تطوير أصناف ذات معدلات نمو بطيئة Slower-developing varieties بشرط ألاَّ تكون كمية المياه المتاحة محدودة وغير كافية. وتُعد الأصناف البطيئة النمو أكثر قدرة على التكيف مع ظروف الحرارة المرتفعة من الأصناف ذات معدلات النمو السريعة Fast-developing varieties وتستطيع أن تتجنب خطر الصقيع الربيعي المتأخر، وبداية المواسم الجافة (Miglietta and porter, 1992). ولكن لا تنجح مثل هذه الأصناف في البيئات التي يحدث فيها الجفاف الناجم عن التبدلات المناخية بشكلٍ مبكر، حيث يفضل زراعة الأصناف السريعة في النمو، والمبكرة في النضج لكي تتمكن من الهروب Escape من الجفاف المتزامن مع الحرارة المرتفعة خلال مرحلتي الإزهار، وامتلاء الحبوب، كما يحدث عادةً في بيئات حوض البحر الأبيض المتوسط (Evans, 1993).
- تطوير طرز وراثية من القمح، التي تسخّر كمية أكبر من نواتج التمثيل الضوئي باتجاه الأجزاء الأرضية Root systems، حيث يساعد ذلك في الحد من نمو الأجزاء الهوائية وتطورها Source size، مما يقلل من مساحة المسطح الأخضر المعرض بشكلٍ مباشر لأشعة الشمس، ويحد من فقد الماء بالتبخر النتح.

ويؤدي بالمقابل ارتفاع الحرارة إلى زيادة معدّل فقد الماء بالتبخر Evaporation، مما يؤثر سلباً في محتوى التربة المائي ولاسيما من طبقات التربة السطحية، لذلك يساعد تشكيل مجموع جذري متعمق ومتشعب Well-branched deep root system في استخلاص كمية أكبر من الماء من طبقات التربة العميقة الرطبة، كافية لتعويض الماء المفقود بالنتح، مما يسمح في المحافظة على جهد الامتلاء Turgor potential داخل الخلايا النباتية.

- تطوير طرز وراثية تتسم بكفاءة عالية في استخدام الطاقة الضوئية الممتصة وتحويلها إلى طاقة كيميائية مخزونة في روابط المركبات العضوية المصنعة (السكريات)، أو تمتلك أنظمة وقاية Protective systems (الأصبغة البرتقالية)، وإعادة توزيع الطاقة الضوئية بين الأنظمة الضوئية، حيث تحول مثل هذه الآليات دون حدوث عملية التثبيط الضوئي Photoinhibition عند تراجع معدل النمو، وكفاءة النبات التمثيلية تحت ظروف الإجهاد المائي، والحرارة المرتفعة الناتجة عن التبدلات المناخية المستقبلية.
- التركيز على تطوير الطرز الوراثية ذات الكفاءة العالية في استخدام الماء (WUE) وذات الكفاءة الإنتاجية العالية Capacity types، حيث يساعد ذلك في تقليل معدل استهلاك المياه المتاحة بكمياتٍ محدودة في التربة، بما يضمن إتاحة المياه خلال المراحل المتقدمة الحرجة من حياة النبات، ولاسيما مرحلة امتلاء الحبوب Grain fill، لأنَّ الماء هو الناقل الوحيد لنواتج التمثيل الضوئي Photo-assimilates من المصدر إلى المصب.
- تطوير طرز وراثية تمتلك حجم مصب كبير نسبياً لمنع تراجع نواتج عملية التمثيل الضوئي، التي تؤدي إلى تثبيط عملية التمثيل الضوئي End- product effect، ومن ثمَّ تقليل الاستفادة من ارتفاع تركيز غاز الفحم CO_2-enrichment، الذي يحدّ من حدوث عملية التنفس الضوئي، ويزيد من معدل التمثيل الضوئي، ولاسيما في الأنواع النباتية ثلاثية الكربون (القمح).
- تطوير طرز وراثية عالية التحمل للجفاف والحرارة المرتفعة، ومقاومة للأمراض والحشرات، التي عادةً ما تستفحل بشكلٍ كبير في ظل ارتفاع الحرارة.

قائمة بالمصطلحات الواردة في الكتاب باللغتين العربية والإنكليزية

قائمة الاختصارات والمصطلحات العلمية		
الاختصار	المقابل الإنكليزي	المقابل العربي
ΔEm	Electric potential gradient	التدرج في الجهد الكهربائي
ΔpH	Power of hydrogen gradient	التدرج في الجهد الكيميائي
PSI	Photosystem I	النظام الضوئي الأول
PSII	Photosystem II	النظام الضوئي الثاني
PC	Plastocyanin	البلاستوسيانين
ETC	Electron transport chain	سلسلة نقل الإلكترونات
$O^{\bullet}$	Singlet oxygen	الأوكسجين المفرد
LHCII	Light Harvesting Complex II	معقد حصد الطاقة الضوئية الثاني
PQ	Plastoquinon	البلاستوكينون
WOE	Water Oxidizing Enzyme	الأنزيم المؤكسد للماء
C_3PCR	C_3 Carbon Reduction Cycle	حلقة إرجاع الكربون في النباتات ثلاثية الكربون
PCA	Photosynthetic Carbon Assimilation Cycle	حلقة تمثيل الكربون في النباتات رباعية الكربون
PCO	Photosynthetic Carbon Oxidation Cycle	حلقة أكسدة الكربون (خلال التنفس الضوئي)
RuBP	Ribulose 1,5 biphosphate	المركب خماسي الكربون (المستقبل الأولي لغاز الفحم خلال تثبيت الكربون)

الأنزيم روبيسكو المثبت للكربون في حلقة إرجاع الكربون الثلاثية	Ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase	RuBiSCO
النباتات العصارية المتكيفة مع البيئات الصحراوية	Crassulacean Acid Metabolism	CAM
المركب ثلاثي الكربون (المستقبل الأولي للبيكربونات HCO_3 خلال تمثيل الكربون)	Phosphoenole Pyruvate	PEP
الأنزيم المثبت للبيكربونات في الأنواع النباتية رباعية الكربون	Phosphoenole Pyruvate carboxylase	PEPase
النتح	Transpiration	T
التبخر	Evaporation	E
التبخر-نتح	Evapo-transpiration	T_E
كفاءة استعمال الماء	Water Use Efficiency	WUE
معدل التمثيل الضوئي	Assimilation rate	Ά`
الأشعة الضوئية الفعّالة في عملية التمثيل الضوئي	Photosynthetically Active Radiation	PAR
الناقلية المسامية	Stomatal conductance	gs
المقاومة المسامية	Stomatal resistance	rs
كفاءة خلايا النسيج المتوسط التمثيلية	Mesophyll cell efficiency	g_m
تركيز غاز الفحم الداخلي	Intercellular CO_2 concentration	Ci
تركيز غاز الفحم الخارجي	Ambient CO_2 concentration	Ca

غلة الضوء	**Quantum yield**	**ϕ**
العتبة الحرجة من جهد الامتلاء لتمدد جدران الخلية النباتية	**Yield threshold**	**Y**
التدرج في الجهد المائي من التربة فالنبات، فالوسط المحيط	**Soil-plant-atmosphere water potential gradient**	**SPAC**
حمض الأبسيسيك	**Abscecic acid**	**ABA**
الجهد المائي	**Water potential**	**Ψw**
دليل الحصاد	**Harvest index**	**HI**
التمييز ضد الكربون النظير (C_{13}/C_{12})	**Carbon isotope discrimination**	**Δ**
الجهد المائي في الوسط الخارجي	**Outside water potential**	**Ψw°**
الجهد المائي ضمن خلايا الأوراق	**Inside water potential**	**Ψw^{i}**
الناقلية الكهربائية لمحلول عجينة التربة المشبعة	**Electrical conductivity of soil past solution**	**ECe**
سكر البولي ايثيلين الكحولي	**Polyethylene glycol**	**PEG**
محتوى الماء النسبي	**Relative water content**	**RWC**
جهد الأوراق المائي	**Leaf water potential**	**Ψ_{leaf}**
جذر الأكسيجين الحر	**Super oxide free radical**	**$O^{\bullet -}$**
الماء الأكسيجيني	**Hydrogen peroxide**	**H_2O_2**
جذر الماءات الحر	**Hydroxyl free radical**	**$OH^{\bullet -}$**
بروتينات الصدمة الحرارية	**Heat shock proteins**	**HSP,s**
عدد الحبوب	**Number of grains**	**NG**

متوسط وزن الحبة الواحدة	Individual grain weight	IGWt.
الغلة الحبية	Grain yield	GY
الغلة الحيوية (البيولوجية)	Biological yield	BY
الطاقة الضوئية الممتصة	Intercepted light energy	I
كفاءة استخدام الضوء	Radiation use efficiency	RUE
عوامل الطقس	Weather factors	
النظم المحصولية	Cropping patterns	
المناخ الزراعي	Agro-climate	
محيط النباتات	The surroundings of plants	
الغلاف الجوي	Atmosphere	
الغلاف الأرضي	Lithosphere	
أراضٍ غير منقولة	Residual soils	
أراضٍ منقولة	Transported soils	
الدبال	Humus	
قدرة التربة على الاحتفاظ بالماء	Water Holding Capacity	
عوامل المناخ	Climate factors	
الإشعاع الشمسي	Solar radiation	
الحرارة	Temperature	
الضغط الجوي	Atmospheric pressure	
الرياح	Wind	
الرطوبة الجوية	Humidity	

Damascus University

الهطولات المطرية	**precipitation**
الرطوبة المطلقة	**Absolute humidity**
الرطوبة النسبية	**Relative humidity**
دورة المياه	**Water cycle**
علم البيئة	**Ecology**
عوامل التربة	**Soil factors**
عوامل حيوية	**Biological factors**
الضوء	**Light**
اليخضور	**Chlorophyll**
طبقة بشرة سميكة	**Thick epiderm**
نوعية الضوء	**Light quality**
شدة الإضاءة	**Light intensity**
فترة الإضاءة	**Light duration**
نقطة التشبع الضوئي	**Light Saturation point**
التأقت الضوئي	**Photoperiodism**
نباتات النهار الطويل	**Long day plants**
نباتات النهار القصير	**Short day plants**
نباتات محايدة	**Neutral Plants**
نباتات النهار المحدود	**Determinate day plants**
عملية التمثيل الضوئي	**Photosynthesis**
عملية التنفس	**Respiration**

التنفس الضوئي	**Photo respiration**
التنفس الظلامي	**Dark respiration**
درجات الحرارة الحدية	**Cardinal temperature**
الوحدات الحرارية التراكمية	**Accumulative heat units**
صفر النمو	**Zero growth**
الإجهادات الحرارية	**Heat stresses**
أضرار ارتفاع الحرارة	**High temperature injuries**
تأثير التجفيف	**Desiccating effect**
أضرار انخفاض الحرارة	**Low temperature injuries**
أضرار التجمد	**Freezing injuries**
التقسية للبرودة	**Cold Hardiness**
عملية الارتباع	**Vernilization**
عملية النتح	**Transpiration**
تأثيرات الرياح	**Wind effects**
الخصائص الفيزيائية للتربة	**Soil physical properties**
قوام التربة	**Soil texture**
بناء التربة	**Soil structure**
لون التربة	**Soil colour**
رطوبة التربة	**Soil moisture**
ماء الجاذبية الأرضية	**Gravitational water**
ماء السعة الحقلية	**Field capacity**

الماء الشعري	Capillary water
الماء المقيد	Hygroscopic water
الماء المتاح	Available water
الاحتياجات المائية للنباتات	Water requirements of plants
الجفاف	Drought
حرارة التربة	Soil temperature
الخصائص الكيميائية للتربة	Soil chemical properties
الناقلية الكهربائية	Electric conductivity
السعة التبادلية الكاتيونية	Cation Exchange Capacity
المادة العضوية في التربة	Soil organic matter
الخصائص الحيوية للتربة	Soil biological properties
التنافس	Competition
التضاد	Antagonism
مواد كيميائية مضادة	Allelopathic substances
الكائنات الحية في التربة	Soil organisms
العناصر الأساسية	Basic nutrients
العناصر الكبرى	Macronutrient
العناصر الصغرى	Micronutrients
امتصاص العناصر المعدنية	Absorption of nutrients
الامتصاص الفعال	Active absorption
الامتصاص غير الفعال	Passive absorption

الأوعية الخشبية	**Xylem vessels**
الأوعية اللحائية	**Phloem vessels**
تمثيل العناصر المغذية	**Nutrient assimilation**
خلايا الحزم الوعائية	**Bundle sheath cells**
خلايا النسيج المتوسط	**Mesophyll cells**
أعراض النقص	**Deficiency symptoms**
أعراض السمية	**Toxicity symptoms**
دورة الآزوت	**Nitrogen cycle**
التأزت	**Nitrification**
تطاير الآزوت	**Denitrification**
دورة الفوسفور	**Phosphorus cycle**
دورة البوتاسيوم	**Potassium cycle**
دورة الكبريت	**Sulphur cycle**

Damascus University

Units and Conversion الوحدات الدولية وتحويلاتها

Energy:

1 J= 1 N.m =1 $Kg.m^{-2}.S^{-2}$=1 W.S = 0.239 cal = 10^7 erg

1 W.h = 3.6 kW.S = 3.6 KJ = 0.86 kcal

1 MJ = 0.278 kWh

1 cal = 4.1868 J

1 kcal= 1.163 W.h

Pressure:

1 MPa = 10^6 Pa = 10 bar

1 bar = 10^5 N. m^{-2}= 10^5 Pa = 100 J.Kg = 10^6 $erg.cm^{-3}$

1 bar = 750 Torr = 0.9869 atm

I atm = 1.0132 bar 760 Torr

Water relations:

Ψ [MPa] = 0.462 . T_{abs} ln a_w = -1.06 T_{abs} . $\log_{10}$ (100/RH)

π_{20} = 310.7 $\log_{10}$ a_w [MPa]

Relative activity of water a_w = P_w/P_s =10^{-2} RH [%]

P_w = water vapor pressure [Pa]

P_s = saturation water vapor pressure [Pa]

RH = relative air humidity

1 $osmol.kg^{-1}$ = 0.00832 . T_{abs} [MPa]

Specific mass of water (P)

absolute density at 4 °C = 0.9999 $g.cm^{-3}$

absolute density at 20 °C = 0.9982 $g.cm^{-3}$

Water transport:

Sap flow = $mol.S^{-1}$; $Kg.h^{-1}$; m^3 . S^{-1}

Flux = $mol.m^{-2}.S^{-1}$; $m^3.m^{-2}.S^{-1}$; $m.S^{-1}$

Velocity of sap flow = m. h^{-1}

Electrolyte conductivity:

1 S = 1 Ω^{-1}

1 $S.m^{-1}$ = 10 $ms.cm^{-1}$

1 $mmhos.cm^{-1}$ = 1 $ms.cm^{-1}$

Amount, concentration:

Molarity – $mol.kg^{-1}$ solution

Molarity – $mol.kg^{-1}$ solvent

1 ppm = 10^{-6} $mol.mol^{-1}$; 1 $\mu g.g^{-1}$

1 ppb = 10^{-9} $mol.mol^{-1}$; 1 $ng.g^{-1}$

Gas exchange:

1 g CO_2-gas exchange = 0.73 g O_2-gas exchange (RQ[CO_2/O_2]=1)

1 g O_2-gas exchange = 1.38 g CO_2-gas exchange

Diffusion coefficient D_{co2} = 0.64 D_{H2O}

Diffusion coefficient D_{H2O}= 1.56 D_{co2}

0.03%$_{vol}$ CO_2 = 300 $\mu l.l^{-1}$= 282 µbar = 28 Pa CO_2 partial pressure

1 $\mu l.l^{-1}$= 1.963 µg CO_2 $.l^{-1}$ (at 1013 mbar air pressure and 0 °C)

1 ppm CO_2 = 1.83 $mg.m^{-3}$ = 41.6 $\mu mol.m^{-3}$ = 0.101 Pa (at 20 °C and 101.3 kPa air pressure)

1 mg CO_2 . g-1 (dry matter) . h^{-1} = 6.3 µmol $CO_2.kg^{-2}$. S^{-1}

1 mg CO_2 $.dm^{-2}$. h^{-1} = 0.028 mg $CO_2.m^{-2}$. S^{-1} = 0.63 µmol CO_2 . m^{-2}. S^{-1}

1 mg CO_2 . m^{-2}. S^{-1} = 36 mg $CO_2.dm^{-2}.h^{-1}$= 22.7 µmol CO_2 . m^{-2}. S^{-1}

1 mg CO_2 . m^{-2}. S^{-1} = 0.044 mg CO_2 . m^{-2}. S^{-1} = 1.58 mg CO_2 $.dm^{-2}$. h^{-1}

1 mg H_2O. dm^{-2}. h^{-1} = 1.54 µmol H_2O. m^{-2}. S^{-1}

Conductances:

1 mol. m^{-2}. S^{-1} = 0.024 mm. S^{-1} (at 20 °C and 101.3 kPa)

1 mol H_2O. m^{-2}. S^{-1} = 0.446 T_0/T_{abs} , P/P_0 cm. S^{-1}

T_0 = 273 K; T_{abs} = absolute temperature [K]

P_0 = 1010.3 kPa; P = ambient air pressure [kPa]

Phytomass:

1 g DM.m^{-2} = 10^{-2} t.ha^{-1}

1 g org.DM = 0.42 - 0.51 g C = 1.5 - 1.7 g CO_2

1 g C = 2 – 2.2 g org.DM = 3.1 – 3.4 g CO_2

1 g CO_2 = 0.59 – 0.66 g org . DM = 0.27 – 0.30 g C

Radiation:

1 J. m^{-2} . S^{-1} = 1 W. m^{-2} = 1.43 . 10^{-3} cal. Cm^{-2}. min^{-1}

1 cal. cm^{-2}. min^{-1} = 698 J. m^{-2}.S^{-1}

1 cal. cm^{-2} = 0.04186 MJ . m^{-2}

1 mol photons 1.8 .105 J (at λ 650 nm) to 2,7 . 105 J (at λ 450 nm)

Conversions (multiply by)	**W.m-2 (PhAR) in µmol photons.m^{-2}.S^{-1}**	**Klux (400-700 nm) in µmol photons.m^{-2}.S^{-1}**
Daylight (sunny)	4.6	18
Daylight (diffuse)	4.2	19
Metal halide lamp	4.6	14
Fluorescent tube (white)	4.6	12
Incandescent lamp	5.0	20

After McCree (1981)

Temperature:

Absolute temperature T_{abs}; Kelvin [K]

Relative temperature (level); Celsius [°C]

Mean temperature of daylight hours:

TD = 0.5 (T_{max} + T_{min}) + (T_{max} – T_{min})/3π (Milthorpe and Moorby, 1979)

TD = 0.29 T_{min} + 0.71 T_{max} (Goudriaan and Laar,1994)

Mean temperature of nighttime hours: TN = 0.25 (T_{max} + 3T_{min})

References المراجع

AFEAS (2001). Product Data. Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study. http:/www.afeas.org/prodsales_download.html [Geo-2-008].

Andre, M. and du Coux, H. (1993). Interaction of CO_2 enrichment and water limitations on photosynthesis and water use efficiency in wheat. Plant Physiology and Biochemistry 31, 103-112.

Chaudhuri, U.N.; Kirkham, M.B. and Kanemasu, E.T. (1990). Carbon dioxide and water level effects on yield and water use of winter wheat. Agronomy Journal, 82, 637-641.

Cole, C.V.; Cerri, C.; Minami, K.; Moiser, A.; Rosenberg, N.; Sauerbeck, D. (1996). Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 745-771.

Colegate, S. M. and P. R. Dorling. 1994. Plant associated toxins: Agricultural, phytochemical and ecological aspects. New York: CAB International.

Cousens, R., and M. Mortimer. 1995. Dynamics of weed populations. New York: Cambridge University Press.

Crawley, M. J. 1997. Plant ecology, 2d ed. Malden, MA: Blackwell Scientific Publications.

Dai, A.; Fung, I.Y. and Del,Genio, A.D. (1997). Surface observed global land precíritation variations during 1900-88. Journal of Climate 10, 2943-2962.

Dai, A.; Trenberth, K.E. and Karl, T.R. (1998). Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995. Geophysical Research Letters 25, 3367-3370

Dawson, I.A. and Wardlaw, I.F. (1989). The tolerance of wheat to high temperatures during reproductive growth. III. Booting to anthesis. Australian Journal of Agricultural Research 40, 965-980.

EEA (2001). Environmental signals 2001. Environmental Assessment Report No. 8.

Houghton, J.T.; Jenkins, G.J. and Ephraums, J.J. (1990). Climate Change: The IPCC Scientific Assessment Report prepared for IPCC by Working Group I. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 364 pp.

IPCC (2001a). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group to the third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge United Kingdom, and New York, United States, Cambridge University Press.

Koch, G. W., and H. A. Mooney (Eds.). 1995. Carbon dioxide and terrestrial ecosystems. San Diego, CA: Academic Press.

Lerner, H. R. 1999. Plant responses to environmental stress: From phytohormones to genome reorganization. NewYork: Dekker Marcel.

Narwal, S. S. and P. Tauro. 1999. Allelopathy in agriculture and forestry, 2 vols. Bridgehampton, NY: State Mutual Book & Periodical Service.

Pugnaire, F. I. and F. Valladares. 1999. Handbook of functional plant ecology. New York: Dekker Marcel.

Shukla, R, S. and Chandel, P, S, 2005, Textbook of plant ecology including ethnobotany and soil science, S. Chand and Company ltd publication, Ram Nagar, New Delhi, India.

Silvertown, J. 1993. Introduction to plant population ecology, 3d ed. New York: Halsted Press.

UNEP (1999). GEO 2000. United Nations Environment Programme.

UNEP (2000a). Action on Ozone. Nairobi, United Nations Environment Programme.

UNEP (2000b). Report of the Twelfth Meeting of the Parties to the Montreal Protocol. UMEP Ozone Secretariat.

USEPA (2000). Latest Findings on National Air Quality: 1999 status and trends. Washington DC, Unites State Environmental Protection Agency.

Wheeler, T.R.; Hong, T.D.; Ellis, R.H.; Batts, G.R.; Morrison, J.I.L. and Hadley, P. (1996a). The duration and rate of grain growth, and harvest index, of wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to temperature and CO_2. Journal of Experimental Botany 47, 623-630.

WHO (1999). Guidelines for Air Quality. Geneva, World Health Organization.

Wilkinson, R. E. 1994. Plant environment interactions. New York: Dekker Marcel.

WMO (2000). Antarctic Ozone Bulletin # 5/2000. Geneva, World Meteorological Organization.

Wooward, F. I. and D. J. Beerling. 2001. Vegetation and the terrestrial carbon cycle: Modeling the first 400 million years. New York: Cambridge University Press.

Wuebbles, D.J. and Rosenberg, N.J. (1998). The natural science of global climate change. Battelle Press, Columbia, Ohio, pp. 1-78.

Yellamanda Reddy, T. And Sankara Reddi, G. H. 2002. Principles of Agronomy. Text Book. Kalyani Publication, NewDelhi, India.

المقوّمون العلميون

الأستاذ الدكتور حسن عزام — كلية الزراعة – جامعة دمشق

الأستاذ الدكتور محمود صبوح — كلية الزراعة – جامعة دمشق

الأستاذ الدكتور مأمون خيتي — كلية الزراعة – جامعة دمشق

المدقق اللغوي

الدكتور علي كردي

كلية الآداب والعلوم الإنسانية – جامعة دمشق

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات الجامعية