



السنة الأولى
قسم الفيزياء



منشورات جامعة دمشق

كلية العلوم

الفيزياء الحيوية

الدكتور

محمود الغوري

أستاذ مساعد في قسم الفيزياء

الدكتور

محمد سعيد محاسنة

أستاذ في قسم الفيزياء

الدكتورة

عنayas الزين

المدرسة في قسم الفيزياء

١٤٣١ - ١٤٣٠ هـ

٢٠١٠ - ٢٠٠٩ م

جامعة دمشق



الفهرس

15	الفصل الأول خواص الموائع
15	(1-1) مقدمة
15	(1-2) الضغط
17	(1-3) الضغط في الموائع
21	(1-4) الضغط الجوي
23	(1-5) ضغط الدم
24	(1-6) وحدات قياس الضغط
25	(1-7) الضغط القياسي
27	(1-8) الضغط السالب
28	(1-9) أجهزة قياس الضغط
30	(1-10) اللزوجة
33	(1-11) قياس معامل اللزوجة
36	(1-12) الشد والتوتر السطحي
38	(1-13) النظرية الجزيئية للتوتر السطحي
40	(1-14) تعريف ظاهرة التوتر السطحي
40	(1-15) الخاصة الشعرية وزاوية التلامس السطحي
44	(1-16) فرق الضغط بين وجهي سطح منحني (قانون لا بلاس)
47	مسائل الفصل الأول
49	الفصل الثاني الموائع في حالة الحركة
49	(2-1) تعريف المائع
49	(2-2) انتساب الموائع

50	(2-3) الجريان الانسيابي والجريان الدوامي
50	(2-4) خط الجريان
51	(2-5) أنبوبة الجريان
51	(2-6) الجريان الثابت والجريان الغير ثابت
51	(2-7) معادلة الاستمرارية للجريان
54	(2-8) معادلة برنولي
57	(2-9) تطبيقات معادلة برنولي
63	(2-10) الانسياب في الأنابيب الشعرية قانون بوازوي
67	(2-11) انسياب الدم في جسم الإنسان
73	مسائل الفصل الثاني
77	الفصل الثالث المقاييس الحرارية
77	(3-1) مفهوم درجة الحرارة
77	(3-2) الطاقة الداخلية النوعية (u) للجسم
77	(3-3) الطاقة الداخلية للجسم
77	(3-4) كمية الحرارة (الحرارة)
78	(3-5) مقياس الحرارة
78	(3-6) النقطة الثابتة
78	(3-7) مقاييس درجات الحرارة (الترمومترات)
81	(3-8) العلاقة بين مقاييس درجات الحرارة
83	(3-9) ترمومتر الأزدواج الحراري
84	(3-10) التعبير الرياضي للمقياس الترمومترى
90	(3-11) الترمومتر البلاتيني
92	(3-12) الترمومترات الغازية

93	(3-13) الترمومتر الغازي ذو الحجم الثابت
95	(3-14) البیرومتر الضوئي
97	مسائل الفصل الثالث
99	الفصل الرابع انتقال الحرارة
99	(4-1) طرق انتقال الحرارة
100	(4-2) انتقال الحرارة بالتوسيط
102	(4-3) تطبيقات على الحالة العامة لانتقال الحرارة
110	(4-4) الحمل الحراري
112	(4-5) قانون نيوتن للتبريد
113	(4-6) تصحيح التبريد
115	(4-6) الإشعاع الحراري
116	(4-7) قوة امتصاص السطح للحرارة
117	(4-8) قوة إشعاع السطح للحرارة
117	(4-9) قانون ستيفان
118	(4-10) الجسم الأسود المثالي
119	(4-11) درجة حرارة سطح الشمس
121	(4-12) تأثيرات الحرارة في الأحياء
122	(4-13) العلاج الحراري
125	(4-14) التصوير الحراري
127	مسائل الفصل الرابع
131	الفصل الخامس الحركة الموجية والصوت
131	(5-1) مقدمة
132	(5-2) الجانب الذاتي للصوت

133	(5-3) استجابة الأذن البشرية للصوت
135	(5-4) العلو
137	(5-5) درجة الصوت
138	(5-6) نوعية النغمة أو الصوت
140	(5-7) الأصوات الصامتة (أو غير المسموعة)
140	(5-8) مقياس الديسيبل
144	(5-9) الضوضاء أو الضجيج
145	(5-10) ظاهرة التشتت
146	(5-11) السرع في الحركة الموجية
147	(5-12) سرعة الجسم
151	(5-13) سرعة الموجة (أو سرعة الطور)
153	(5-14) سرعة المجموعة
161	(5-15) سرعة الموجات الصوتية في الأوساط المختلفة
164	(5-16) العوامل المؤثرة على سرعة الموجة الصوتية في الهواء
169	(5-17) طرق إيجاد سرعة الصوت في الأوساط المختلفة
178	(5-18) الخواص الموجية للصوت
182	(5-19) ظاهرة دوببلر
193	مسائل الفصل الخامس
199	الفصل السادس العين والضوء
199	(6-1) معلومات موجزة عن طبيعة الضوء
201	(6-2) سرعة انتشار الأمواج الضوئية ، قرينة الانكسار المطلقة
204	(6-3) سطح الموجة - الشعاع الضوئي - الحزم الضوئية
208	(6-4) علم الضوء

208	(6-5) مبدأ الانتشار المسقّي
210	(6-6) مبدأ استقلال الأشعة الضوئية
210	(6-7) قوانين ديكارت
212	(6-8) ملاحظات حول قوانين ديكارت
215	(6-9) دراسة تفصيلية للانكسار . - الانعكاس الكلي
218	(6-10) معلومات إضافية عن الانعكاس
220	(6-11) الإنشاء الهندسي للشعاع المنكسر
222	(6-12) تطبيقات على الانعكاس الكلي
225	(6-13) دراسة موجزة عن العين
228	(6-14) دور وبنية الشبكة
229	(6-15) المطابقة
231	(6-16) شذوذ البصر وإصلاحه
236	(6-17) منحني الفعالية الضوئية
237	(6-18) تصنيف الآلات الضوئية ومميزاتها
253	مسائل الفصل السادس
255	الفصل السابع الإشعاعات المؤينة وغير المؤينة وتأثيراتها البيولوجية
255	7-1 الإشعاع غير المؤين
256	7-1-1 التأثير البيولوجي للموجات الميكروية وموارد الراديو
256	7-1-2 الوقاية والأمان من الموجات الميكروية والراديوية
257	7-1-3 الأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي
257	أ - الأشعة تحت الحمراء ذات المجال A
257	ب - الأشعة تحت الحمراء ذات المجال B

258	ج- الأشعة تحت الحمراء ذات المجال C
258	7-1-4 الأشعة فوق البنفسجية - مجالاتها - مصادرها
260	7-1-5 أشعة الليزر : توليدها - استخداماتها - أنواعها
262	7-2 الإشعاع المؤين
262	7-2-1 الإشعاع الكهرومغناطيسي - الأشعة السينية
264	7-2-2 الجسيمات المشحونة ، جسيمات ، جسيمات
266	7-2-3 إشعاعات
266	7-2-4 النيترونات
266	7-2-5 الآثار البيولوجية للإشعاعات المؤينة
267	7-2-6 التأثيرات الحتمية والعشوائية للإشعاع
271	الفصل الثامن الكمون السكוני للخلايا والأنسجة
271	تمهيد
273	8-1 الهد الساكن
273	8-2 مبادئ نشكل الكمون الحيوي
274	8-3 توزع الشوارد على الغشاء نصف النفوذى للخلية
274	8-4 دراسة ترموديناميكية للكمون الغشاء السكوني
278	8-5 كمون الشوارد المتراكمة على الغشاء
280	8-6 كمون التوازن
282	8-7 الخواص الكهربائية للخلايا والأنسجة الحية
284	8-8 مقاومة الخلية
287	8-9 دراسة مرور التيار المستمر خلال الخلايا والألياف العصبية
290	8-10 الممانعة الكهربائية للأنسجة والخلايا
295	الفصل التاسع الكمون الكهربائي الفعال للأنسجة

295	تمهيد
295	9-1 الإثارة الميكانيكية
295	9-2 الإثارة الصوئية
296	9-3 الإثارة الكيميائية
296	9-4 الإثارة الكهربائية
299	9-5 الكمون النشط
299	9-5-1 التسجيل من على السطح الخارجي للخلية
301	9-5-2 التسجيل من داخل الخلية أو من النسيج الحي
302	9-5-3 خواص الكمون النشط المسجل من داخل الخلية
304	9-5-4 النظرية الشاردية وأسباب تكون الكمون النشط
308	9-6 سريان النبضات الكهربائية داخل الشعيرة العصبية
310	9-7 النشاط الكهربائي وأهميته الطبيعية
311	9-7-1 نشاط العضلات الكهربائي
315	9-7-2 العضلة وإنتاج الحرارة
315	9-7-3 النشاط الكهربائي للعضلات



المقدمة

تهدف الفيزياء الحيوية إلى دراسة الظواهر وخصائص الحيوية للأجسام ومكوناتها وذلك باستخدام العلوم الأساسية وعلى رأسها الفيزياء كيمياء وعلم الأحياء والرياضيات وقد تطورت الفيزياء الحيوية ولا سيما في مجال البيولوجيا الجزيئية والوراثة وكذلك في مجال النشاط الكهربائي للخلايا الحية وتحكم الخلايا العصبية في الدماغ في جميع أجزاء الجسم وكذلك تبادل التأثير بين الإشعاعات بمختلف أنواعها والحرارة والضغط من جهة والنسج الحية من جهة أخرى .

يشمل كتاب الفيزياء الحيوية تسعة فصول . كتبت الفصول الستة الأولى من قبل الدكتور عزيز الزين والتي تناولت فيها :

خواص المواقع وحركتها والمقياس الحرارية وأنواعها ، وطرائق انتقال الحرارة وتأثيرها على الخلايا الحية والحركات الموجية والصوت ثم الضوء وطبيعته والقوانين الناظمة لانتشاره ، ودراسة العين كمجموعة ضوئية ، ومكوناتها والعيوب التي يمكن أن تتعرض لها .

بينما كتبت الفصول الثلاثة الأخيرة من قبل الدكتور محمد سعيد محاسنة والدكتور محمود الغوري والتي شملت :

الإشعاعات المؤينة وتأثيرها على الخلايا الحية وكذلك الكمون الكهربائي السكوني للخلايا والأنسجة ، وأخيراً الكمون الكهربائي الفعال للأنسجة .

يسرنا أن نضع بين أيدي طلابنا الأعزاء هذا الكتاب ليكون عوناً لهم على فهم بعض الظواهر التي تربط بين علم الفيزياء بشكل خاص والعلوم الحيوية .

نرجو أن تكون قد وفقنا في مسعانا هذا وحققنا الهدف والفائدة والله ولـي التوفيق

المؤلفون



الفصل الأول

خواص المواقع

١-١ مقدمة :

كل الكائنات الحية تعيش في قاع بحر ضخم من الهواء ، وتوجد أجسامنا بشكل دائم تحت الضغط الناتج من وزن ارتفاع هائل من الهواء الموجود فوقها ، ولكننا بالرغم من ذلك ، لا نشعر في أكثر الحالات بوجود هذا الضغط . لماذا ؟

إذا شبها جسم الإنسان بعلبة مصنوعة من الورق المقوى ، مملوءة بالهواء فقط ، عند إغلاق فوهة العلبة ، فإنها لا تتحني من أي جهة تحت تأثير ضغط الهواء عليها ، لأن الهواء الموجود داخل العلبة ، يؤثر بقوة متوجهة إلى الخارج تساوي القوة التي يؤثر بها الهواء الخارجي عليها إلى الداخل ، والتي تحاول أن تسبب انحصارها ، وبما أن هاتين القوتين متوازنتان ، فإن العلبة تبدو كما لو لم يوجد أي ضغط للهواء عليها ، وهذا صحيح أيضاً بالنسبة لأجسامنا إلى حد ما .

وإذا فرغنا الهواء من العلبة ، بالطبع فإن العلبة ستتهاجر تحت تأثير القوى غير المتزنة ، والنتيجة من الضغط الجوي الخارجي .

١-٢ الضغط :

يعرف الضغط على أنه القوة المؤثرة عمودياً على وحدة المساحات ، فإذا رمزنا للضغط بالرمز (P) ، والقوة المؤثرة عمودياً بالرمز (F) ، وللمساحة بالرمز (A) ، فإن :

$$P = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

يقدر الضغط بالجملة الدولية N/m^2

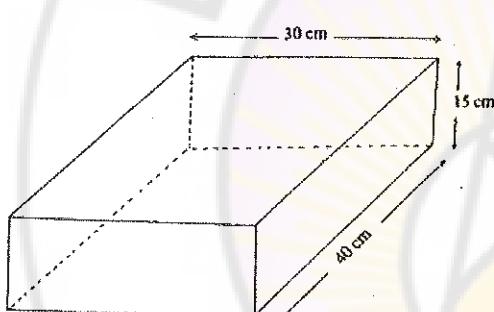
وفي الجملة السعفية dyn/cm^2

إن كلمة ضغط ليست مرتبطة بحالة المادة ، وإنما بوجود قوة مؤثرة على مساحة ، فالمواد الصلبة والسائلة والغازية ، يمكن أن تؤثر وتنتأثر بالضغط .

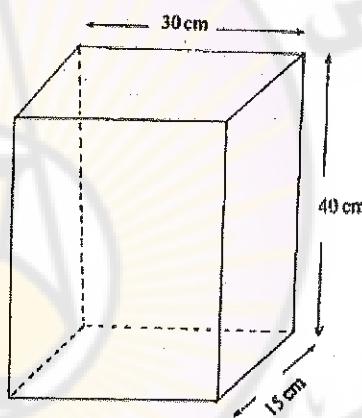
مثال (1)

صندوق معدني على شكل متوازي المستويات كتلته (26 Kg) ، فإذا كان طوله (40 cm) ، وعرضه (30 cm) ، وارتفاعه (15 cm) ، أوجد ضغط الصندوق على سطح الأرض في الوضعين اللذين في الشكلين (1,A) و (1,B)

١٧



شكل (1,A)



شكل (1,B)

مساحة السطح الذي يؤثر عليه وزن الصندوق في الشكل (1,A) هو:

$$A = (30 \cdot 10^{-2} \text{ m}) (40 \cdot 10^{-2} \text{ m}) = (12) \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

وحيث أن القوة العمودية المؤثرة على هذا السطح هي وزن الصندوق:

$$F = mg$$

$$= (26 \text{ Kg}) (9.8 \text{ m/s}^2) = 254.8 \text{ N}$$

$$F = mg \quad , \quad 26 \times 9.8$$

وباستخدام المعادلة (1-1) نجد

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{254.8 \text{ N}}{12.10^{-2} \text{ m}^2} = 2.12 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$$

وفي الشكل (1,B) تكون مساحة السطح الذي يؤثر عليه وزن الصندوق هي :

$$A = (15 \cdot 10^{-2} \text{ m}) (30 \cdot 10^{-2} \text{ m}) = 4.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

والقوة المؤثرة على هذه المساحة هي وزن الصندوق ، أي أن :

$$F = mg$$

$$= (26 \text{ Kg}) (9.8 \text{ m/s}^2) = 254.8 \text{ N}$$

أي نفس مقدار القوة في الحالة الأولى ، باستخدام المعادلة (1-1) :

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{254.8 \text{ N}}{(4.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2)} = 8.49 \times 10^3 (\text{N/m}^2)$$

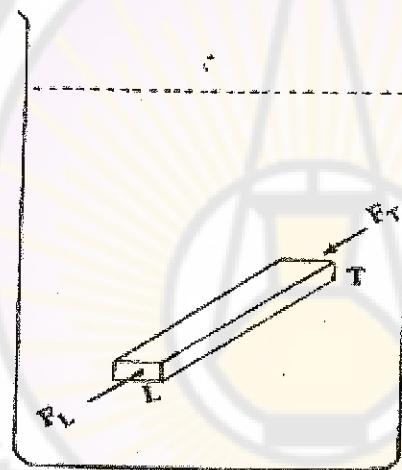
لاحظ أن الضغط في الحالة الثانية أكبر من الضغط في الحالة الأولى ، وذلك لأن نفس القوة تؤثر على مساحة أصغر .

1-3 الضغط في المواقع

نلاحظ من خلال تجربتنا أننا نستطيع أن نؤثر بقوة على سطح الجسم الصاب في أي اتجاه ، ولكن في حالة المواقع ، فإن القوة لابد أن تؤثر عمودياً على السطح في حالة التوازن ، فلو افترضنا أن هناك قوة تؤثر بشكل موازٍ لسطح السائل ، فإن

السائل سيتحرك في اتجاه القوة ، وهذا يعود لخاصية ميوعة السائل ، والخاصية الأخرى للسائل هي أن الضغط متساوٍ عند جميع نقاطه ، عندما نهمل وزن السائل (غياب الجاذبية الأرضية) ، ولتوسيع هذه الخاصية ، تخيل أننا اقتطعنا حجماً على شكل متوازي المستطيلات ، من السائل الساكن كما في الشكل (2) .

وبما أن متوازي المستطيلات في حالة سكون ، فهذا يعني أن جميع القوى المؤثرة عليه في حالة توازن ، وأن القوة لا تؤثر إلا عمودياً على السطح ، فإن القوة المؤثرة على السطح (A) ، تساوي القوة المؤثرة على السطح المقابل له (B)



الشكل (2)

وبالتالي نستطيع أن نكتب :

$$F_A = F_B$$

وإذا رمزاً للضغط على السطح A بـ P_A والضغط على السطح B بـ P_B فإن :

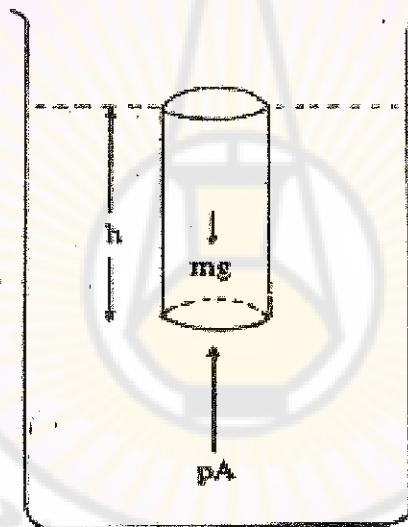
$$P_A = \frac{F_A}{A} , \quad P_B = \frac{F_B}{B}$$

وبما أن مساحة السطحين A و B متساوية فإن :

$$P_A = P_B$$

أي أن الضغط عند السطح A يساوي الضغط عند السطح B ، وهذا ينطبق على أي نقطتين في السائل الساكن .

الآن لو أخذنا بعين الاعتبار ، وزن السائل أي وجود الجاذبية الأرضية . فإذا تخيلنا اسطوانة من السائل طولها (L) ، ومساحة مقطعها (A) كما في الشكل (3) وسطحها العلوي على مستوى سطح السائل .



الشكل (3)

هذه الأسطوانة في حالة توازن ، نتيجة تأثير قوتين متساويتين ومتعاكستين في الاتجاه الشاقولي ، هما وزن الأسطوانة (mg) إلى الأسفل ، وقوة رد الفعل العمودية على القاعدة A ومقدارها P_A

$$P_A = mg$$

أو

$$P_A - mg = 0$$

ولكن من علاقة الكثافة $\rho = \frac{m}{V}$ نجد :

$$m = \rho V$$

حيث m كتلة الاسطوانة و ρ كثافة السائل ، و V حجم اسطوانة السائل .

$$P = \rho g \frac{V}{A}$$

ولكن $\frac{V}{A}$ يساوي ارتفاع الاسطوانة (L) ، و بالتعويض نجد :

$$P = \rho g L \quad (1-2)$$

أي أن ضغط السائل عند أي نقطة يساوي كثافة السائل مضروباً بتسارع الجاذبية الأرضية مضروباً ببعد النقطة عن سطح السائل .

ولإيجاد الفرق في الضغط بين نقطتين في سائل ، نفترض وجود نقطتين A و B على ارتفاع L_B و L_A على التوالي ، كما في الشكل (4) ومن المعادلة (1-1) يكون الضغط عند النقطة A :

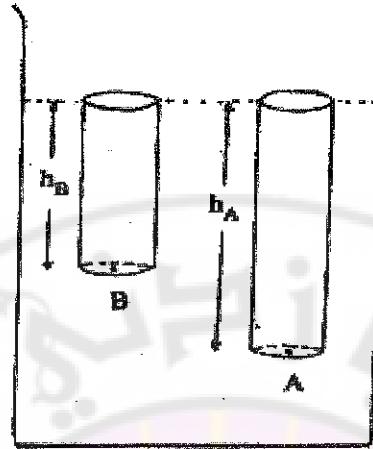
$$P_A = \rho g L_A$$

والضغط عند النقطة B :

$$P_B = \rho g L_B$$

وبأخذ فرق الضغط بين النقطتين

$$P_A - P_B = \rho g (L_A - L_B) \quad (1-3)$$



الشكل (4)

مثال (2) :

أوجد ضغط الماء عند نقطة على عمق 20 m تحت سطح البحر ، بفرض أن كثافة ماء البحر تساوي $\text{Kg/m}^3 (1.03 \cdot 10^3)$

الحل : $P = \rho gh$

باستخدام المعادلة (1-2) نجد :

$$P = \rho gh$$

$$P = (1.03 \cdot 10^3)(9.8)(20) = 2.02 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

1-4 الضغط الجوي :

الكرة الأرضية هي الكوكب الذي نسكنه ، سواء منه اليابس أو الماء ، وما يحيط به من هواء ، وهناك ضغط لا يمكن أن نتجاهله ، وهو ضغط الهواء الجوي ، ويمكن تعريف الضغط الجوي ، بأنه وزن عمود من الهواء مساحة مقطعيه وحدة المساحات ، و يمتد طوله من الأرض - عند مستوى سطح البحر - إلى طبقة الأوزون .

ولقد استطاع العالم الفيزيائي الإيطالي تورشيللي ، من أن يجد وزن عمود الهواء ، وذلك بملء أنبوبة ارتفاعها أكثر من 10 أمتار بالماء ، ثم وضع الطرف المفتوح في حوض كبير به ماء ، فوجد أن الماء في الأنبوبة يهبط إلى ارتفاع 10 m فوق سطح الماء الذي في الحوض كما في الشكل (5) .

أي أن عمود الماء أصبح متوازناً تحت تأثير قوتين ، هما قوة وزنه وضغط الهواء الجوي عليه ، وبالتالي فإن ضغط الهواء الجوي يعادل وزن عمود الماء الذي يؤثر على وحدة المساحة ، وباستخدام المعادلة:

$$P = \rho gh$$

نجد أن:

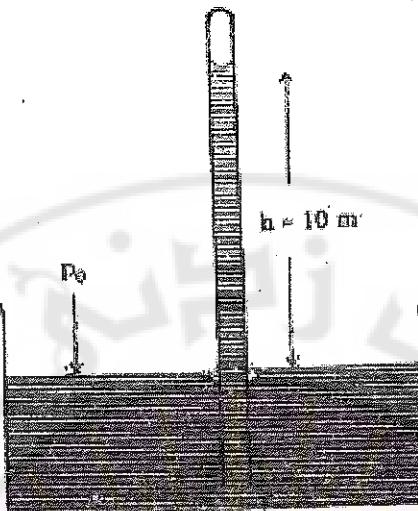
$$P_0 = \rho gh$$

حيث (P_0) ضغط الهواء الجوي ، و (ρ) كثافة الماء ، و (g) تسارع الجاذبية الأرضية ، و (h) ارتفاع الماء في الأنبوبة . ولأن كثافة الزئبق أكبر بكثير من كثافة الماء ، فإنه من الملائم استخدام الزئبق بدلاً من الماء ، ووجد أن ارتفاع الزئبق عند مستوى سطح البحر ، وعند درجة حرارة (0°C) يساوي (76 cm) ، فإذا عوضنا في المعادلة السابقة عن كثافة الزئبق وعن ارتفاعه في الأنبوبة فإننا نجد أن :

$$P_0 = (13.6 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3)(9.8 \text{ m/s}^2)(76 \cdot 10^{-2} \text{ m}) = 1.013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

وقد أخذ العلماء هذا الضغط ليكون " ضغط جوي واحد " أو باختصار (1 atm) ، أي أن ضغط جوي واحد ، يعادل ضغط عمود من الزئبق طوله (76cm) ، أو

$$(1 \text{ atm}) = 76\text{cm Hg} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$



الشكل (5)

٥-١ ضغط الدم

إن ضربات القلب منتقطة ومستمرة ، عددها في الرجل البالغ المليم 72 ضربة في الدقيقة الواحدة ، وهذا العدد يختلف بحسب العمر والجنس والتعب والحالة الصحية الخ .

إن القلب يعمل نصف الوقت ، ويستريح نصف الوقت في كل ضربة واحدة ، فهو لا يتعب ، فهو يعمل مضخة ماصة تمتص الدم من الأوردة إلى الأذينين ، أثناء الاسترخاء ، وضاغطة تدفع الدم في الشرايين بواسطة البطينين ، وبالتالي يكون الضغط في الشريان عالياً ، وهو في المتوسط حوالي (100 mm Hg) ، ولأن القلب ينقبض وينبسط

(ينبعض) ، فإن الضغط يتراوح بين المستوى الانقباضي ، وهو حوالي (120 mmHg) وهذه أعلى قيمة ، وبين المستوى الانبساطي ، وهو حوالي (80 mmHg) وهذه أدنى قيمة ، وهذا الضغطان يتغيران مع تقدم الإنسان في السن .

ولقياس ضغط الدم ، فإن الطبيب يستخدم المانومتر الطبي ، وهو عبارة عن مانومتر زئبقي مزود بأنبوبة مطاطية بها صمام للتحكم في دخول وخروج الهواء ، ومنفاخ هوائي ، وهذه الأنبوبة متصلة بحزام ضاغط أو كم قابل للنفخ ، يوضع حول العضد على نفس مستوى القلب ، في البداية ينفع الحزام ، ثم يراقب الضغط الذي يؤثر به الحزام على الذراع ، وعند دفع الهواء في الحزام حتى يزيد ضغطه عن ذروة الضغط في شريان الذراع ، يتوقف نتائجه لذلك جريان الدم في الذراع ، ثم يخفض الضغط داخل الحزام تدريجياً ، وذلك بفتح الصمام والسماح للهواء أن يتسرّب منه ، وبواسطة السماحة الطبية يستمع الطبيب إلى رجوع النبضة للشريان ، وأول صوت يسمع للنبضة ، عندما يكون الضغط في الحزام مساوياً للضغط الشرياني ، وعندما يأخذ الطبيب قراءة المانومتر ، ويكون مقدار الضغط في هذه الحالة ، هو مقدار الضغط الانقباضي ، يستمر الطبيب في فتح الصمام ، لتخفيض الضغط في الحزام والاستماع لصوت النبضات ، وأول ما يختفي صوت النبض في الشريان ، يأخذ قراءة المانومتر ، وتكون هذه القراءة هي مقدار ضغط الدم الانبساطي ، ويكتبان على الشكل 120/80 .

6-1 وحدات قياس الضغط

وجدنا سابقاً أن الضغط هو نسبة القوة المؤثرة عمودياً على السطح ، وبالتالي فإن وحدات قياس الضغط هي وحدات قوة على وحدات مساحة ، ففي الجملة السعوية ، تكون وحدة الضغط dyn/cm^2 ، وفي الجملة الدولية N/m^2 وتسمى هذه الوحدة بالبايسكال ويرمز لها بالرمز (Pa) .
أي أن :

$$1 \text{ Pa} = \text{N/m}^2$$

ورأينا أيضاً أن ضغط جوي واحد (1 atm) يساوي $1.013.10^5 \text{ N/m}^2$ () ، أو يعادل (76 cm Hg) . هناك وحدات أخرى للضغط ، تستخدم لأغراض

مختلفة من العلوم ، فعلماء الأرصاد الجوية يستخدمون وحدة البار (bar) ، وهي تعادل مليون دينار سنتيمتر مربع (dyn/cm²) أي أن

$$1 \text{ bar} = 10^6 \text{ dyn/cm}^2$$

أما الأطباء فيستخدمون وحدة ملليمتر زئبقي (mm Hg) ، وهي مقدار الضغط اللازم لرفع عمود من الزئبقي طوله (1 mm) ، ويسمى (1 mm Hg) بالتور (Torr) أي أن :

$$1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm Hg}$$

وهنالك وحدات شائعة ، وهي السنتيمتر المائي (cm H₂O) ، وهي مقدار الضغط اللازم لرفع عمود من الماء طوله سنتيمتر واحد (1 cm) .

7-1 الضغط القياسي

عندما يكون سطح السائل معرضًا للهواء الجوي ، فإن الضغط الكلي ، أو الضغط المطلق عند نقطة على عمق h من سطح السائل يكون مجموع الضغط الجوي وضغط عمود السائل ، أي أن :

$$P = P_0 + \rho gh$$

$$P - P_0 = \rho gh \quad \text{أو}$$

حيث (P) الضغط المطلق .

يعرف الفرق بين الضغط المطلق (P) ، وضغط الهواء الجوي (P₀) بأنه الضغط القياسي ، ويرمز له بالرمز (P_G) ، أي أن :

$$P_G = P - P_0 = \rho gh$$

وكثرأً ما نقيس الضغط القياسي بدلاً من الضغط الكلي في الاستعمالات العلمية والطبية ، وقد صممت معظم أجهزة قياس الضغط لتعطي مقدار الضغط القياسي .

مثال (3) :

أوجد الضغط القياسي والضغط المطلق عند قاع إناء مملوء بزيت الزيتون إلى ارتفاع (24.5 cm) ، إذا كانت كثافة الزيت ($0.87 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$)

الحل :

يؤثر على قاع الإناء ضغطان ، هما الضغط الجوي وضغط وزن الزيت ، وكما ذكرنا ، فإن الضغط القياسي (P_G) هو ضغط وزن الزيت على القاع أي أن :

$$P_G = \rho gh$$

حيث (ρ) كثافة الزيت و (h) ارتفاع الزيت في الإناء

$$P_G = (0.87 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3) (9.8 \text{ m/s}^2) (24.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}) = 2.09 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$$

ولحساب الضغط المطلق ، الذي هو الضغط الكلي الواقع على قاع الإناء ، نجد مجموع ضغط الهواء الجوي والضغط القياسي ، أي أن :

$$P = P_0 + \rho gh$$

$$= (1.013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2) + (2.09 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2) = 1.0339 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

٨-١ الضغط السالب :

فم

لقد عرفنا إلى الآن أن الضغط القياسي يكون كمية موجبة ، ولكن إذا قل الضغط المطلق عن الضغط الجوي ، فإن الضغط القياسي يكون سالباً .

ولتوضيح مفهوم الضغط القياسي السالب نأخذ ثلاثة زجاجات متشابهة ، كما في الشكل (6) ، كل منها مملوئة جزئياً بسائل ، ومغلقة بإحكام بسدادة ، ومثبت بكل سدادة أنبوبة يكون حرفها العلوي مفتوحاً للهواء الجوي .

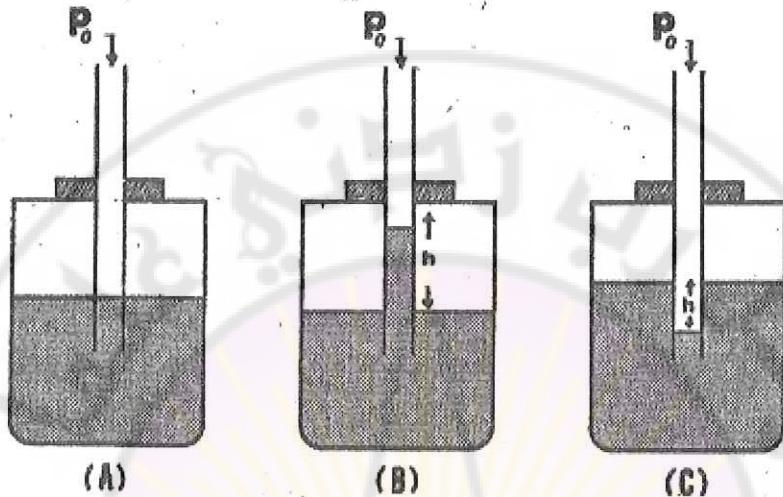
فإذا كان الضغط في الزجاجة يساوي الضغط الجوي ، فإن مستوى سطح السائل في الزجاجة وفي الأنابيب يكون متساوياً كما في الشكل (6-A) . أما إذا كان الضغط في الزجاجة أكبر من الضغط الجوي ، فإن السائل في الأنابيب سيرتفع عن مستوى سطح السائل في الزجاجة كما في الشكل (6-B) .

في الشكل (6-C) نلاحظ أن مستوى سطح السائل في الأنابيب منخفض عن سطح السائل في الزجاجة ، وهو دليل على أن الضغط الكلي داخل الزجاجة أقل من الضغط الجوي .

في الحالة (A) يكون الضغط القياسي يساوي صفرأً ، لأن $(h = 0)$ ، وفي الحالة (B) يكون الضغط القياسي $(+\rho gh)$ ، لأن $(h > 0)$ ، أما في الحالة (C) فإن الضغط القياسي يساوي $(-\rho gh)$ لأن $(h < 0)$ ، ولهذا السبب سمي هذا الضغط بالضغط السالب ، لأنه يقل عن ضغط الهواء الجوي بمقدار (ρgh) .

وبفضل هذا الضغط السالب فإنك تتنفس الآن بسهولة فخلال عملية التنفس تعمل عضلات الجهاز التنفسي على انضغاط وامتداد الرئتين ، وهذا يسبب في زيادة ونقصان الضغط في الحجارات الهوائية فخلال عملية الشهيق يصبح الضغط سالباً (تقربياً -1 mmHg) ، وهذا يسبب في اندفاع الهواء داخل الرئتين ، وخلال

عملية الزفير يرتفع الضغط داخل الحجارات الهوائية إلى ($+1 \text{ mmHg}$) تقريرياً ، وهذا يجعل الهواء يندفع إلى الخارج خلال الجهاز التنفسي .



شكل (6)

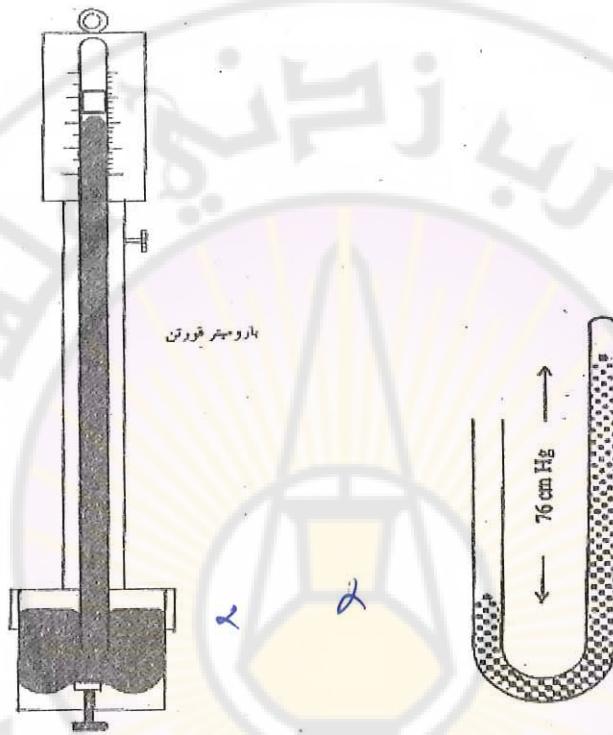
١- أجهزة قياس الضغط:

١- البارومتر (مقياس الضغط)

يعد الهواء المحيط بنا مائعاً هاماً جداً ، إذ إن الضغط في داخله ذا أهمية كبيرة لنا ، ومعرفة مقدار الضغط الجوي بدقة من الأشياء التي تساعدنا على التنبؤ بالطقس الجوي. والبارومتر عبارة عن أنبوبة طولها متر تقريرياً ، مسدودة من أحد طرفيها ، ومملوءة بالزئبق ، وتوضع في إناء فيه زئبق ، وتكون قراءة ارتفاع الزئبق هي مقدار الضغط الجوي مقدراً بالسنتيمتر الزئبي (cm Hg) ..

وقد طور فورتن هذا الجهاز لتكون قراءة سطح الزئبق في الأنابيب أكثر دقة حيث أضاف تدريجاً ملليمتر ياً في الطرف العلوي للأنبوبة ليساعد على القراءة الدقيقة كما في الشكل (7) ، كما يستخدم بارومتر آخر ، وهو أنبوبة على شكل

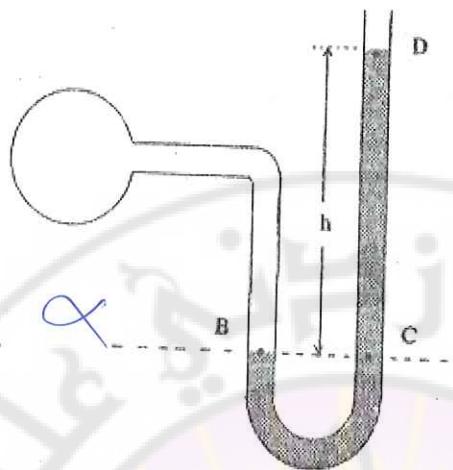
حرف (U) ، مسدود أحد طرفيها ومملوءة بالزئبق ويكون الفرق في ارتفاعي سطحي الزئبق في الأنبوة هو مقدار الضغط الجوي (cm Hg)



الشكل (7)

-2- المانومتر :

المانومتر جهاز يقيس الضغط القياسي (P_G) وهو عبارة عن أنبوبة على شكل حرف (U) مفتوحة الطرفين ، مملوءة جزئياً بسائل عادة ما يكون زئبقاً أو ماءً كما في الشكل (8) ، يوصل أحد طرفيها بالغاز المراد معرفة ضغطه القياسي ، ويترك الطرف الآخر مفتوحاً للهواء الجوي .

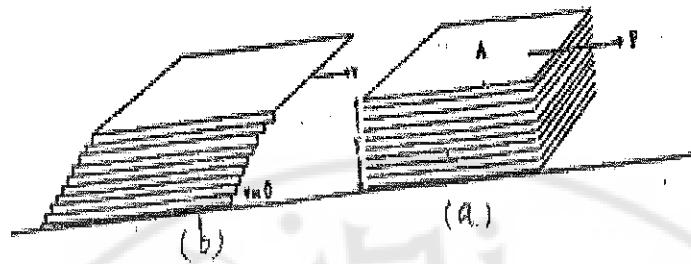


الشكل (8)

1-10 الزوجة

عندما يتحرك جسمان متلامسان بسرعتين مختلفتين ، تنشأ عند السطح الفصل بينهما قوى احتكاك ، تظهر من خلال تحول الطاقة إلى حرارة ، أما فيما يخص المواقع ، فإن ظواهر مشابهة تحدث عندما لا تتحرك جميع الجزيئات المكونة للمائع بالسرعة نفسها ، لكنها تختلف عن الأجسام الصلبة من حيث أن السرعة داخل المائع تتغير من نقطة إلى أخرى ، أي أن الاحتكاك لا يحدث عند السطح الفاصل الذي لا وجود له بل يحدث داخل المائع .

يمكن تعريف الزوجة في حالة سائل يجري بصورة طبقة تختلف سرعة كل طبقة عن مجاورتها ، بأنها الممانعة التي تبديها طبقات السائل للحركة . فلو تخيلنا مائعاً في إناء يتكون من طبقات بعضها فوق بعض ، ومساحة كل طبقة (B) والمسافة العمودية بين الطبقة العليا والسفلى (y) ، وأثروا بقوة (F) على الطبقة العليا كما في الشكل (9-A) فإن هذه الطبقة ستتحرك بسرعة (V) ، بينما تتحرك الطبقة التي تليها بسرعة أقل وهكذا ، حتى تصل السرعة إلى الصفر في الطبقة السفلية (9-B)



الشكل (9)

ويمكن تلخيص اعتماد السرعة (V) على القوة المؤثرة (F) ، وعلى مساحة طبقة المائع (B) ، وعلى المسافة العمودية بين طبقتي المائع العليا والسفلى (y) ، كالتالي :

$$V \propto \frac{F \cdot y}{B}$$

$$\underline{\underline{V = \frac{F \cdot y}{\eta \cdot B}}}$$

أي أن

$$\underline{\underline{\eta = \frac{F/B}{V/y}}} \quad (1-4)$$

أو

$$F/B \quad (\text{Ns/m}^2)$$

حيث η معامل اللزوجة ، وهو يعتمد على نوع المائع ، ودرجة حرارته . تسمى النسبة F/B بإجهاد القص ، وهي القوة المؤثرة على وحدة المساحة ، واحدة اللزوجة في الجملة الدولية $\underline{\underline{N \cdot S/m^2}}$ ، ولكن واحدة اللزوجة الشائعة في الجملة السعوية هي $\underline{\underline{dyn \cdot S/cm^2}}$ وتسمى بواز ، وتساوي

$$1 \text{ poise} = \text{dyne} \cdot \text{Sec/cm}^2$$

وتعتمد لزوجة المائع اعتماداً كبيراً على درجة حرارته ، كما ذكرنا ، ولكن لزوجة السوائل تقل بارتفاع درجة الحرارة بينما لزوجة الغازات تزداد بارتفاع درجة الحرارة ، وذلك يعود إلى الفرق في قوة الترابط بين الحالتين وعدد التصادمات.

يعطي الجدول (1) معامل الزوجة لبعض المواد في درجات حرارة مختلفة .

جدول (1)

الهيدروجين 10^{-6} Pa.s	الهباء 10^{-6} Pa.s	الماء 10^{-3} Pa.s	الماء 10^{-3} Pa.s	$T (\text{ }^{\circ}\text{C})$
8.4	17.1	0.912	1.787	0
8.7	18.1	0.652	1.002	20
9.1	19.0	0.503	0.653	40
9.5	20.0	0.392	0.466	60
9.8	20.9	0.329	0.355	80
10.2	21.8	-	0.282	100

ولعله من المفيد أن نعلم أن الدم يعتبر مائعاً ، ولكنه لا يخضع لما سبق ذكره ، من علاقات خاصة بالموضع وذلك لعدم تجانسه ، ف تكون العلاقة بين القوة الأفقية المؤثرة فيه والسرعة ليست علاقة خطية .

ومما سبق يمكن تعريف معامل الزوجة ، بالقوة المماسية المؤثرة في وحدة المساحات من طبقة في السائل ، لينتج عنها فرق في السرعة مقداره واحدة السرعة، بين طبقتين المسافة العمودية بينهما ووحدة المسافة.

1-11 قياس معامل الزوجة η

1-1-11 قياس معامل الزوجة لسائل بواسطة معادلة بوازوبي POISEUILLE

تستخدم معادلة بوازوبي [poiseuille] لإيجاد معامل الزوجة السائل سهلة الحركة في الأنابيب كالماء والكحول .

يتكون الجهاز كما في الشكل (10) من مستودع للسائل (B) يسبق السائل من صنبور (A) ، وثبتت أنبوبة شاقولية مفتوحة الطرفين ، بحيث تتدفق من فتحة في قاع المستودع ، وتعمل هذه الأنبوبة على حفظ مستوى سطح السائل في المستودع ثابتاً على الدوام أثناء إجراء التجربة .

يثبت في فتحة جانبية في المستودع أنبوبة ضيقة (cd) ، يمر بداخلها السائل ويسكب من طرفيها C ، ويتجمع في مخبار مدرج لفترة معينة ، تجمع كمية من السائل (v) المنسكب من الأنبوبة في زمن معين t ، ويحسب معدل التدفق $Q = \frac{v}{t}$ وبمعرفة نصف القطر الداخلي للأنبوبة ، وكذلك طولها (L).

وباستخدام المعادلة:

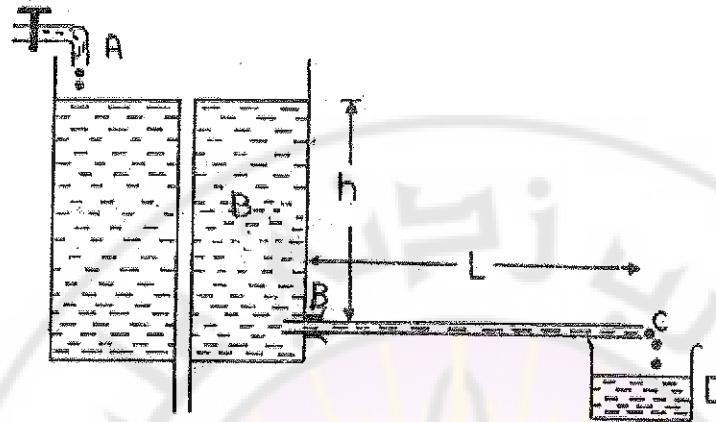
$$Q = \frac{\pi r^4 P}{8\eta l}$$

وبتعويض

$$P = \rho gh$$

حيث h فرق ارتفاع سطح السائل في المستودع (B) عن مستوى محور الأنبوبة (cd) و P فرق الضغط بين طرفي الأنبوبة (cd) و ρ كثافة السائل يمكن إيجاد :

$$\eta = \frac{\pi r^4 \rho gh}{8 Q l} \quad (1-5)$$



الشكل (10)

١١-٢ مقياس معامل اللزوجة لسائل بواسطة الكرة الساقطة (طريقة ستوك)

إذا أسقطنا كرة معدنية صغيرة نصف قطرها (r) ، في سائل معامل لزوجته (η) ،

نلاحظ أن سرعة الكرة الساقطة تتزايد تدريجياً حتى تصل إلى سرعة ثابتة ،
تسمى بالسرعة العظمى (V) ، وتختضع الكرة عند السقوط إلى ثلاثة قوى :

١ - قوة تقللها المتجهة إلى الأسفل (mg) وتساوي :

$$F_1 = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_v g$$

٢ - القوة الناتجة عن دفع السائل للكرة واتجاهها للأعلى

$$F_2 = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g$$

حيث ρ كثافة السائل المراد تعين لزوجته
و r نصف قطر الكرة

- القوة الناتجة عن مقاومة السائل لحركة الكرة F_3 ، واتجاهها عكس اتجاه الحركة ، ودرسها ستوكس واستنتج قيمتها :

$$F_3 = 6\pi\eta rV$$

هذه المعادلة تسمى قانون ستوكس .

وحيث أن الكرة تسير بسرعة عظمى ثابتة ، فإن محصلة القوى المؤثرة عليها تساوي الصفر .

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g + 6\pi \eta V r - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_v g = 0$$

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{r^2}{V} (\rho_v - \rho)g \quad \text{Kg m}^{-1} \text{S}^{-1} \quad (1-6)$$

مثلاً (4):

أوجد السرعة العظمى لكرة من النحاس قطرها (4 cm) في ماء درجة حرارته (20°C).

الحل :

باستخدام قانون نيوتن الثاني :

$$F = ma$$

حيث (F) هي مجموعة القوى المؤثرة على الكرة ، وهي في هذه الحالة

$$F_1 = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_v g$$

$$F_2 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g$$

$$F_3 = 6\pi\eta rV$$

$$F_1 + F_2 + F_3 = ma$$

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_v g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g - 6\pi\eta rV = ma$$

وبما أن مجموع القوى المؤثرة على الكرة يساوي صفرًا ، فإن $a = 0$ وتكون

سرعة الكرة هي السرعة العظمى V

$$6\pi\eta rV = \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho_v - \rho)$$

$$V = \frac{2r^2}{9\eta}(\rho_v - \rho)g$$

حيث ρ_v للنحاس

و ρ للماء

معامل اللزوجة للماء عند الدرجة $20^\circ C$ يساوي $(1.002 \cdot 10^{-3})$

وكثافة النحاس $8.90 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$

وبالتعويض في المعادلة الأخيرة عن هذه القيم نجد أن

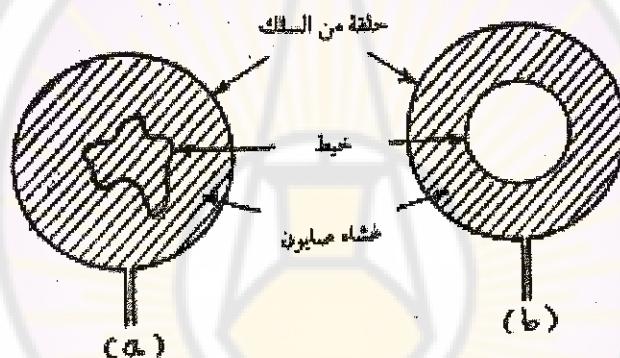
$$V = 789.44 \text{ m/S}$$

1-12 الشد والتوتر السطحي

كثيراً ما نرى في حياتنا اليومية حشرات صغيرة تسير فوق سطح الماء ، دون أن تبتل ، وعند تغطية إبرة بطبقة رقيقة من الدهن ، ثم وضعها على ورقة ترشيح، ووضع الورقة برفق فوق سطح الماء ، نشاهد أن ورقة الترشيح قد

غاصت في الماء ، في حين تظل الإبرة عالقة على السطح على الرغم من أن كثافة مادة الإبرة أكبر من كثافة الماء .

وبملاحظة الطبقة السطحية الرقيقة للماء . نجد أنها تتقوس أي يعمل سطح الماء كغشاء مشدود ، يحمل الإبرة وينعن اخترافها له يشبه هذا ما يحدث لغشاء من الصابون في حلقة من سلك رفيع عندما يوضع على الغشاء خيط، الشكل(11.a) ثم يتقد ما داخل الخيط فيأخذ غشاء الصابون الشكل(11.b) .



الشكل (11)

وللسبب نفسه فإن قطرات الماء تأخذ عند سقوطها شكلاً كروياً تقريباً. مثل آخر نشاهده ، وهو أنه عند غمر أنبوبة شعرية نظيفة في كأس ماء ، يرتفع مستوى الماء في الأنبوة الشعرية ، ويصبح مستوى الماء في الأنبوة الشعرية أعلى منه بالكأس ، وإذا غمرت الأنبوة الشعرية في كأس بداخله زباق ، يرتفع مستوى الزباق ينخفض في الأنبوة مما هو عليه بالكأس . كل هذه المشاهدات خاصية من خواص سطح السائل تعرف بالتوتر السطحي .

١-١ النظرية الجزيئية للتوتر السطحي

جع

افتراض لابلاس أنه يوجد حيز كروي نصف قطره (r) ، داخل سائل وفي مركزه يقع الجزيء المراد دراسة قوى التجاذب المطبقة عليه، ويسمى نصف قطر هذا الحيز بمدى التجاذب الجزيئي . وهو يعتمد على نوع السائل ، وافتراض لابلاس أن الجزيئات داخل هذا الحيز ، هي التي تؤثر بشكل ملموس في الجزيء ، وأهم لتأثير الجزيئات الواقعة خارج الحيز .

إذا كانت الجزيئات الواقعة داخل الحيز ، من نوع الجزيء نفسه المراد دراسته ، سميت قوى التجاذب بقوى التماسك .

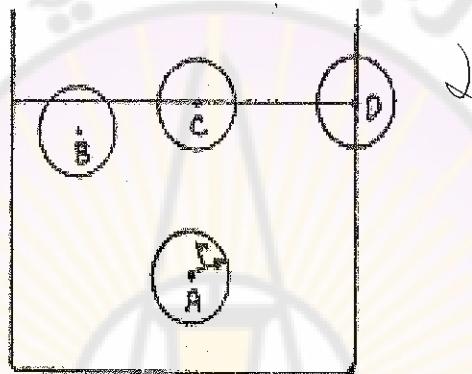
أما إذا كانت هذه الجزيئات من نوع آخر ، غير نوع الجزيء المدروس ، سميت قوى التجاذب بقوى التلاصق .

نفترض وجود جزيء (A) داخل السائل ، وأخر (B) عند سطح السائل ، بحيث أن جزءاً من الحيز يقع داخل السائل ، والجزء الآخر خارج السائل .
الشكل 12 .

ونظراً لقوى التجاذب بين جزيئات السائل ، الجزيء A المحاط من جميع الاتجاهات بجزئيات السائل الأخرى، ستكون محصلة قوى التماسك التي تؤثر بها في هذه الجزيئات تساوي صفرأ . أما الجزيء (B) الواقع عند سطح السائل ، فإنه يخضع لقوى تمسك ناتجة من تأثير جزيئات السائل الموجودة داخل السائل ، وقوى تلاصق ناتجة من تأثير جزيئات الهواء الموجودة خارج السائل . وبما أن قوى التلاصق هذه صغيرة بالنسبة لقوى التماسك ، تتجه محصلة القوى المؤثرة في الجزيء (B) إلى أسفل السائل ، وهذه المحصلة تزداد قيمتها كلما اقترب الجزيء من سطح السائل ، وتصل إلى نهايتها العظمى عندما يقع الجزيء على سطح السائل ، مثل الجزيء (C) ، أما الجزيئات القريبة من سطح السائل ، وفي نفس الوقت قريبة من جدار الإناء ، مثل الجزيء (c) ، يأخذ بالإضافة إلى قوى

التماسك ، وقوى التلاصق السابقة ، فإن الجزيء يتأثر بقوى تلاصق ناتجة من جزيئات مادة جدار الإناء الواقعه داخله ، وتكون قيمة محصلة قوى التلاصق هذه أكبر بكثير من قوى التلاصق الناتجة من جزيئات الهواء ، والتي يمكن إهمالها كما ذكرنا . ونتيجة لذلك يكون الجزيء واقعاً تحت تأثير محصلتين للقوى كما في

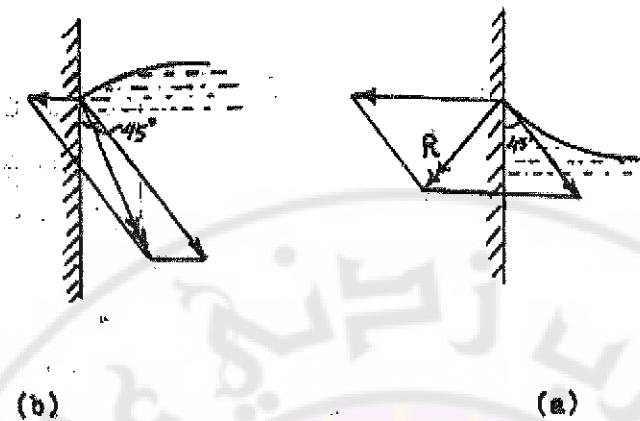
الشكل (12)



الشكل (12)

١١

فإذا كانت محصلة قوى التلاصق أكبر من محصلة قوى التماسك ، فإن سطح السائل يأخذ شكلًا م-curva ، وذلك لأن سطح السائل يجب أن يكون عمودياً على محصلة القوى ، لأنه لو كان غير ذلك ، فإن مركبة المحصلة في اتجاه السطح ستتسبّب في وجود حركة في اتجاه سطح السائل ، ولا يمكن أن يحدث هذا لأن السائل في حالة سكون ، ويقال للسائل في هذه الحالة أنه سائل مبلل ، كما في حالة الماء مع الزجاج. الشكل (13,a) . أما إذا كانت محصلة قوى التماسك أكبر من محصلة قوى التلاصق ، فإن سطح السائل سيأخذ شكلًا محدباً ويحدث هذا في حالة الزئق مع الزجاج ، (سائل لا يبلل الجدار) انظر الشكل (13,b)



الشكل (13)

وعندما تكون قوى التماسك وقوى التلاصق متساوية لا يرتفع سطح السائل ولا ينخفض عند ملامسته لجدار الإناء الحاوي له كما في حالة الماء في إناء من الفضة

1-14 تعريف ظاهرة التوتر السطحي :

ما سبق يمكن تعريف ظاهرة التوتر السطحي ، بأنها ظاهرة تنشأ عن قوى التماسك المؤثرة في جزيئات سطح السائل ، مما يجعل سطح السائل يعمل كغشاء رقيق مرن مشدود ، وتعرف قوى الشد السطحي لهذا الغشاء بقوى التوتر السطحي. تعريف التوتر السطحي: يمكن تعريف التوتر السطحي على أنه قوة مطبقة على واحدة الطول أو طاقة مخزنة في واحدة السطوح.

1-15 الخامة الشعرية وزاوية التلامس :

إذا غمرت أنبوبة شعرية في سائل ، نلاحظ ارتفاع السائل داخل الأنبوبة وهذه الظاهرة تسمى بالخامة الشعرية ، وتعود لوجود توتر سطحي للسائل ، ونلاحظ أن ارتفاع السائل في الأنبوبة ، يتاسب عكسياً مع قطر الأنبوبة ، كما

نلاحظ أيضاً ، أن سطح الماء في الأنبوة ليس مسطحاً بل منحنياً إلى أسفل على شكل هلال .

أما إذا وضعنا الأنبوة في الزئبق ، فإننا سنلاحظ العكس تماماً ، وهي أن الزئبق قد انخفض في الأنبوة ، وأن سطح الزئبق ينحني إلى أعلى .

يمكن شرح الخاصة الشعرية ، أي ارتفاع السائل وانخفاضه في الأنبوة الشعرية على أساس وجود قوتين قوة التماسك ، وقوة التلاصق . فإذا كانت قوة التلاصق بين جدار الأنبوة وجزئيات السائل أكبر من قوة التماسك - كما في حالة الماء - فإن محصلة هاتين القوتين تكون اتجاهها إلى أعلى ويرتفع سطح الماء في الأنبوة . وإذا كانت قوة التلاصق بين جدار الأنبوة وجزئيات السائل أصغر من قوة التماسك (كما في حالة الزئبق) فإن المحصلة ستؤثر إلى أسفل ، مما ينتج عنه انخفاض الزئبق في الأنبوة .

ولإيجاد العلاقة بين ارتفاع السائل في الأنبوة والتوتر السطحي ، نعرف أولأ ما يسمى بزاوية التماس ، ويرمز لها بالرمز (θ) ، وتعرف على أنها الزاوية المحصورة بين اتجاه المماس لسطح السائل عند النقطة التي يمس فيها السائل سطح الأنبوة، كما في الشكل (14) وتكون مركبة قوة التوتر السطحي المؤثرة في اتجاه جدار الأنبوة :

$$F = 2\pi r\gamma \cos\theta$$

حيث r نصف قطر الأنبوة الشعرية .

(γ) التوتر السطحي للسائل .

وهذه القوة تؤثر إلى أعلى ، أما القوة المؤثرة إلى أسفل فهي وزن عمود السائل في الأنبوة (W) :

$$W = \rho\pi r^2 gh$$

حيث (ρ) كثافة السائل
h ارتفاع السائل في الأنبوة

وبما أن عمود السائل في حالة اتزان ، فإن هاتين القوتين ، لابد أن تكون هاتان القوتان متساوين أي أن :

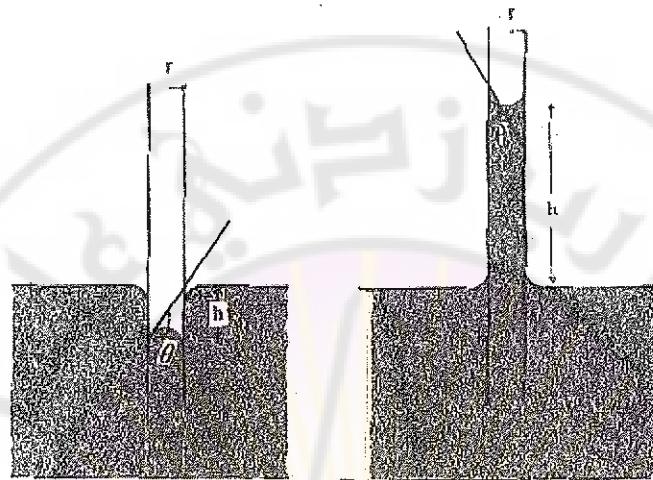
$$2\pi r\gamma \cos\theta = \rho\pi r^2 gh$$

ومنها يمكن حساب قيمة ارتفاع السائل في الأنبوة

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho gr} \quad (1-7)$$

ويمكن حساب قيمة التوتر السطحي

$$\gamma = \frac{\rho g h r}{2 \cos\theta} \quad (1-8)$$



الشكل (14)

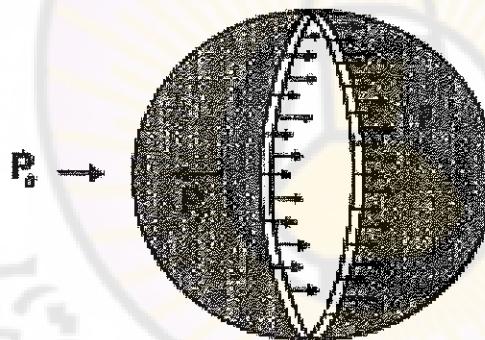
جدول (2)

السائل	زاوية الانسلاس (θ)	التجددان
ماء	٠°	زجاج
ماء	٩٠°	طضة
ماء	١٠٧°	بارافين
كثير و سبع	٢٦°	زجاج
زئبق	١٤٠°	زجاج

1-16 فرق الضغط بين وجهي سطح منحنٍ (قانون لابلاس)

لدرس هنا العلاقة بين التوتر السطحي ، والفرق في الضغط داخل وخارج فقاعة ، سواء كانت هذه الفقاعة في الهواء ، كففاعة الصابون أو فقاعة هوائية في سائل .

ت تكون الفقاعة الصابونية في الهواء ، من غشائين دقيقين بينهما سائل ، وحيث أن الفقاعة في حالة توازن ، فإنها لابد أن تكون واقعة تحت تأثير قوتين هما قوة التوتر السطحي (F) ، والتي تعمل على تقليل مساحة السطح ، والقوة الناتجة عن الفرق في الضغط ، داخل الفقاعة (P_i) والضغط خارج الفقاعة (P_0) ، كما في الشكل (15))



الشكل (15)

هاتان القوتان متساويان في المقدار ومتعاكسان في الاتجاه ، فإذا كان نصف قطر الفقاعة (r) ، والتوتر السطحي للصابون (γ) ، فإن قوة التوتر السطحي (F) (، لسطح واحد من الغشاء هي :

$$F = \gamma(2\pi r)$$

حيث $(2\pi r)$ محيط الفقاعة ، وتكون قوة التوتر السطحي للعشائين :

$$F = 2\gamma(2\pi r) = 4\gamma \pi r$$

أما الفرق في الضغط بين داخل وخارج الفقاعة ، فإنه يؤثر عمودياً في مساحة المقطع (πr^2) ، وتكون القوة الناتجة هي

$$(P_i - P_0)\pi r^2$$

وبما أن هاتين القوتين متساويتان

فنجد

$$4\gamma \pi r = (P_i - P_0)\pi r^2$$

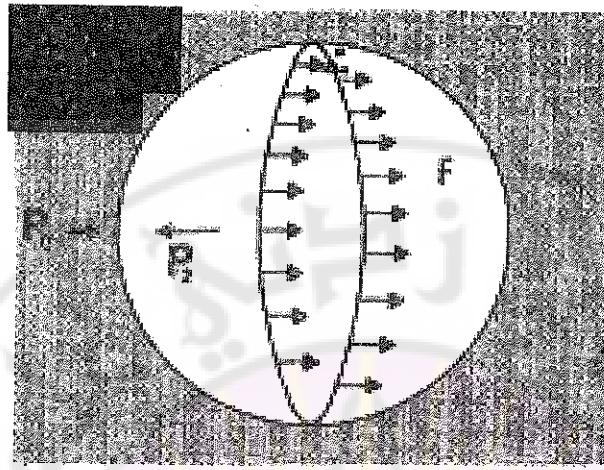
$$(P_i - P_0) = \frac{4\gamma}{r} \quad (1-9)$$

أما في حالة وجود فقاعة هوائية داخل السائل ، فإنها تتكون من غشاء واحد فقط كما في الشكل (16) .

ومن ثم فإن قوة التوتر السطحي (F) ، هي $(2\pi r)\gamma$ وتصبح العلاقة (1-9) كالتالي

$$(P_i - P_0) = \frac{2\gamma}{r} \quad (1-10)$$

نلاحظ من المعادتين السابقتين ، أن الفرق في الضغط بين داخل وخارج الفقاعة ، يتاسب طرداً مع التوتر السطحي (γ) ، وعكساً مع نصف القطر (r) ، فإذا قل الفرق في الضغط ، فإن التوتر السطحي يجب أن يقل حتى تحافظ الفقاعة على حجمها ، وهذا ما يحدث أثناء عملية التنفس .



الشكل (16)

أسئلة وسائل الفصل الأول

- ما هو تأثير درجة الحرارة على لزوجة السوائل .
- ما هو الفرق في ضغط الدم بين القدمين والقلب لشخص واقف ، إذا كان مستوى القدمين على بعد (140 cm) من مستوى القلب .
- عندما أجريت تجربة تورشيلي فوق قمة جبل وجد أن ارتفاع الزئبق يساوي (73.70 cm) أوجد مقدار الضغط الجوي .
- احسب ما يقابل ضغط (16 cm) من الزئبق بالوحدات التالية :
 - 1) pa
 - 2) CmH₂O)
 - 3) Torr
 - 4) bar
- صب غليسرين في وعاء حتى كان ارتفاعه (12 cm) ، ثم أضيف إليه ببطء بنزن حتى كان الضغط الكلي على قاع الإناء ($1.035 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$) فإذا علمت أن الغليسرين والبنزن لا يختلطان ، أوجد ارتفاع البنزن .
- يضخ القلب الدم في الأوردة بضغط انقباضي قدره (110 mm Hg) ، فإذا كانت مساحة مقطع الأوردة (2.6 cm²) احسب مقدار القوة التي يطبقها القلب لإدخال الدم للأوردة .
- ما معنى أن معامل التوتر السطحي لسائل يساوي (74.10^{-3} N/m) .
- اشرح خطوات تجربة عملية لإثبات أن سطح السائل يعمل كغشاء مرن مشدود .
- وضح ما يحدث عندما تتساوى قوى التماسك وقوى التلاصق لسائل ما داخل الإناء مع ذكر مثال يوضح ذلك .

- 10- أثبت بالتجربة أن السوائل التي تبلل السطوح الصلبة تكون زاوية التماس لها أقل من 90° بينما تكون أكبر من 90° في السوائل التي لا تبلل السطوح
- 11- عرف معامل اللزوجة وذكر وحدات قياسه .
- 12- احسب التوتر السطحي للماء إذا كان فرق ارتفاع الماء في أنبوبة شعرية عن خارج الأنبوبة 3 cm علمًا بأن قطرها الداخلي 4 mm
- 13- احسب ارتفاع الماء في أنبوبة شعرية قطرها الداخلي 5 mm عندما غمر طرفها السفلي في إناء معامل توتره السطحي N/m 0.0736 علمًا بأن تسارع الجاذبية الأرضية S^2 / m 9.8 وكثافة الماء Kg/m^3 10^3 .
- 14- غمست أنبوبة شاقولية في حوض به زئبق فانخفض سطح الزئبق داخلها بمقدار 1.08 cm . أوجد قيمة زاوية التماس إذا علمت أن كثافة الزئبق $(13.6 \cdot 10^3\text{ Kg/m}^3)$ والتوتر السطحي له 0.466 N/m وقطر الأنبوبة 1 mm .

الفصل الثاني

الموائع في حالة الحركة

يدرس علم الميكانيك حركة الأجسام المادية بشكل عام ، وتعنى دراسة حركة الموائع من أصعب فروع علم الميكانيك ، لأن كثافة المائع تتغير من نقطة لأخرى ، كما أن سرعته تتغير من لحظة لأخرى ، عند نفس النقطة ، بالإضافة إلى لزوجة المائع ، وهي عبارة عن قوى احتكاك تعيق حركة المائع ، ففي البداية ستنتجاه هذة الحقائق ، ونعد المائع مثالياً .

1-2 تعريف الموائع

هي مواد قابلة للانسياب ، ولا تأخذ شكلاً محدداً مثل السوائل ، وإنما تأخذ شكل الأواني الحاوية لها ، أما الغازات فتأخذ شكل الأواني الحاوية لها وحجمها ، وتتميز بقدرتها على الانسياب ، وتقسم الموائع إلى قسمين :

1- موائع قابلة للإنضغاط : وهي الموائع التي تتغير كثافتها بتغير الضغط الواقع عليها مثل الغازات .

2- موائع غير قابلة للإنضغاط : وهي موائع لا تتغير كثافتها بتغير الضغط الواقع عليها مثل السوائل .

2-2 انسياب الموائع :

من الصعب وصف حركة مائع ينساب عند كل نقطة ، لأنه يتالف من عدد كبير من الجزيئات ، ولذلك سنصف حركة المائع بدلاًلة بعض المقادير الفيزيائية الظاهرة أو العيانية، مثل الضغط ، والكثافة ، والسرعة بدلاً من متابعة حركة جزيئاته ، بالإضافة إلى ذلك ، توجد بعض الصعوبات في دراسة حركة المائع ،

حيث أن المائع في أثناء حركته يقوم بحركة دورانية ، إذا اعترض مسیره جسم، بالإضافة إلى حركته الانسحابية ، ولتسهيل دراسة حركة المائع ، نفترض أن المائع غير قابل للانضغاط ، ولا يقوم بحركة دورانية ، وأخيراً نفترض أن المائع ليس لزجاً .

نسمي المائع الذي يتمتع بهذه الصفات بالمائع المثالي .

- يوجد طريقتان لوصف انسياب المائع

أ- الطريقة الأولى : نتبع ما يسمى مجال السرعة

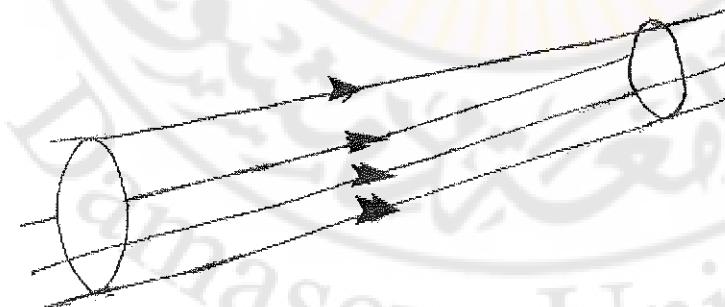
ب- الطريقة الثانية : نستخدم مفهوم خطوط الانسياب (الجريان)

3-2 الجريان الانسيابي والجريان الدوّامي :

في الجريان الانسيابي يكون لكل جزيء من المائع مسار محدد ، ولا تتقاطع المسارات المختلفة ، أما في الجريان الدوّامي فتتقاطع المسارات .

4-2 خط الجريان :

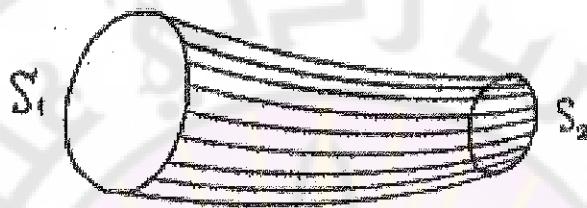
خط الجريان هو خط وهمي داخل المائع ، بحيث يعطي المماس له عند أية نقطة اتجاه الجريان . كما في الشكل (1)



الشكل (1)

5-2 أنبوبة الجريان :

هي أنبوبة وهمية ، جدرانها خطوط الجريان . ومن خواص أنبوبة الجريان ، أن المائع لا يخترق جدرانها ، لأن اتجاه الجدار عند أي نقطة هو اتجاه الجريان عند هذه النقطة ، كما في الشكل (2) .



الشكل (2)

6-2 الجريان الثابت والجريان غير الثابت :

يوجد نوعان من الجريان :

أ - الجريان الثابت :

تكون سرعة المائع عند نقطة معينة ثابتة ، لا تتغير مع مرور الزمن ، ويمكن أن تتغير السرعة من نقطة لأخرى ، حسب مقطع الأنبوبة .

ب - الجريان غير الثابت :

تتغير سرعة المائع عند النقطة نفسها ، من لحظة لأخرى

7-2 معادلة الاستمرارية للجريان :

لأخذ أنبوبة جريان غير منتظمة المقطع كما في الشكل (3) ولتكن كثافة المائع (ρ) ، وأن سرعته خلال المقطع A_1 هي V_1 ، وسرعته خلال المقطع $.V_2$ هي A_2

وإذا كان المائع غير قابل للانضغاط ، فإن التدفق الحجمي D_V (حجم المائع الذي يجتاز أحد مقاطع الأنبوية في وحدة الزمن) الذي يجتاز أي مقطع من الأنبوية ثابت ، أي أن :

$$\rho A_1 V_1 \Delta t = \rho A_2 V_2 \Delta t$$

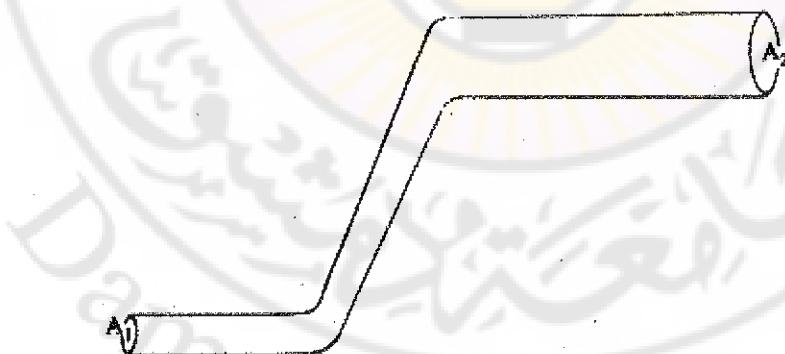
وبما أن كثافة المائع نفسها عند أي مقطع ، يكون :

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2-1)$$

تدعى العلاقة (2-1) بمعادلة الاستمرارية للجريان .
أي أن حاصل ضرب المساحة A في السرعة يكون دائماً ثابتاً لأي أنبوبة جريان ، ونسميه بمعدل الانسياب ، ويرمز له بالرمز (Q)

$$Q = AV \quad (2-2)$$

ووحداتها في الجملة الدولية m^3/s ، كما توجد واحده شائعة الاستخدام وهي $1 \text{ Liter} = 1000 \text{ cm}^3$ (Liter/s)



الشكل (3)

مثال (1)

ينساب ماء في أنبوبة ذات اختناق ، مساحة مقطعها (14 cm^2) بسرعة (2 m/s)

فإذا كانت مساحة مقطع الاختناق (3 cm^2) ، أوجد سرعة الماء أثناء مروره في الاختناق .

الحل :

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad \text{لدينا معادلة الاستمرارية}$$

إذا فرضنا أن (A_1) مساحة مقطع الأنبوبة ، (V_1) سرعة الماء خلال هذه المساحة وهي (2 m/s) و (A_2) مساحة الاختناق وهي 3 cm^2 هي سرعة الماء عند مروره في الاختناق .
ويمكن حساب (V_2) كالتالي :

$$(14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2)(2 \text{ m/s}) = (3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2)V_2$$

$$V_2 = 9.33 \text{ m/s}$$

مثال (2) :

أوجد معدل الانسياب في شريان قطره 18mm إذا كان متوسط سرعة الدم فيه 0.28m/s

الحل :

$$Q = AV \quad \text{من المعادلة}$$

حيث A مساحة مقطع الشريان وتساوي :

$$\pi r^2 = 3.14 \times (9 \times 10^{-3})^2$$

$$Q = 81 \times 0.28 \times 3.14 \times 10^{-6} = 71.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$$

٢-٨ معادلة برنولي :

نفترض أن هناك مائعاً مثلاً غير لزج ، ينساب خلال أنبوبة غير منتظمة المقطع ، شكل (٤) واقع تحت تأثير قوة ثابتة ، (قوة الجاذبية الأرضية) ولتكن القوى السطحية الوحيدة التي يمكن أن تؤثر في هذا المائع ، هي قوى الضغط الناظمية . لتطبيق على جريان المائع قانون إنفاذ الطاقة ، وذلك بإهمال التبادل الحراري الذي يمكن أن يحصل بين جسيمات المائع والوسط الخارجي .

لتكن كثافة المائع (ρ) ، ويناسب انسياضاً منتظماً ، ضمن الأنبوبة ، فإنه عند النقطة (a) ، حيث مساحة المقطع A_1 تكون سرعة المائع (V_1) ، والضغط (P_1) ، والارتفاع (y_1) ، أما عند النقطة (b) ، حيث مساحة مقطع الأنبوبة (A_2)

وتكون السرعة (V_2) ، والضغط (P_2) ، والارتفاع (y_2) ، مع العلم أن كثافة المائع لا تتغير من نقطة لأخرى ، لعدم قابلية المائع للإنضغاط عند النقطة

$$F_1 = P_1 \cdot A_1 \quad (2-3)$$

وهي في اتجاه انسياپ المائع ، فيكون العمل المبذول بواسطة هذه القوة موجباً

$$W_1 = (P_1 \cdot A_1) dx_1 \quad (2-3)$$

$$dx_1 = v_1 dt$$

أما عند النقطة (b) ، فيكون مقدار القوة المؤثرة على المائع $F_2 = P_2 \cdot A_2$ ولكن اتجاه تأثيرها في عكس انسياپ المائع ، ومن ثم فإن العمل الذي تبذله سالب ، وقيمتها تعطى بالعلاقة :

$$W_2 = (P_2 \cdot A_2) dx_2 \quad (2-4)$$

$$dx_2 = v_2 dt$$

حيث

إن قوة الجاذبية تتجزء عملاً لنقل الكتلة dm من المائع من y_1 إلى y_2 ، يعطى
بالعلاقة (2-1)

$$W_3 = gdm(y_1 - y_2) \quad (2-5)$$

$$W = -\Delta U$$

وحيث أن

$$U = mgy$$

$$dm = \rho A_1 V_1 dt = \rho A_2 V_2 dt \quad (2-6)$$

بتعويض (6-2) في (5-2) نحصل على العمل الذي تتجزءه قوة الجاذبية
الأرضية ، وتصبح العلاقة (6-2) على الشكل التالي :

$$W_3 = g\rho A_1 V_1 dt(y_1 - y_2) \quad (2-6)$$

أما العمل الكلي الذي تتجزء هذه القوى فهو

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (2-7)$$

بتعويض قيم W_1 , W_2 , W_3 من العلاقات (3-2) و (4-2) و (2-6) في
العلاقة (7-2) نجد:

$$W = P_1 A_1 V_1 dt - P_2 A_2 V_2 dt + g\rho A_1 V_1 dt(y_1 - y_2) \quad (2-8)$$

بتعويض معادلة الاستمرارية في العلاقة (8-2) نجد:

$$W = V_1 A_1 dt [P_1 - P_2 + \rho g(y_1 - y_2)] \quad (2-9)$$

إن العمل المنجز والمعطى في العلاقة (9-2) يسبب تغير في الطاقة الحركية للمائع ويعطى التغير كما يلي :

$$\Delta E_K = E_K^2 - E_K^1 = \frac{1}{2} dm(V_2^2 - V_1^2) \quad (2-10)$$

ولكن $dm=PA_1V_1$ نعرض في العلاقة (2-10) نجد

$$\Delta E_K = A_1 V_1 dt \left[\frac{1}{2} \rho (V_2^2 - V_1^2) \right] \quad (2-11)$$

وبما أن العمل يساوي التغير في الطاقة الحركية نجد :

$$P_1 - P_2 + \rho g(y_1 - y_2) = \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - V_1^2) \quad (2-12)$$

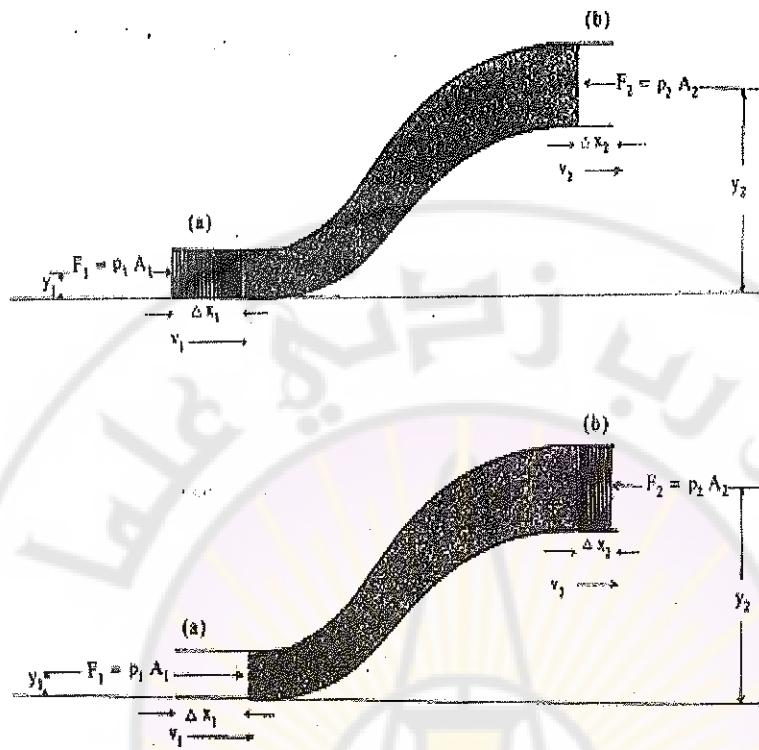
$$P_1 + \rho gy_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \rho gy_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (2-13)$$

$$P + \rho gy + \frac{1}{2} \rho V^2 = cte \quad (2-14)$$

تدعى هذه المعادلة معادلة برنولي .

ومن أجل مائع ساكن ($V=0$) ، أو مائع ينساب بسرعة ثابتة نحصل على

$$P + \rho gy = cte \quad (2-15)$$



الشكل (4)

9-1 تطبيقات معادلة برنولي

9-1-1 الأنبوية ذات الاختناق :

إذا انساب مائع في أنبوبة أفقية AB مختلفة المقاطع شكل (5) فإن معادلة

برنولي

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g y_2$$

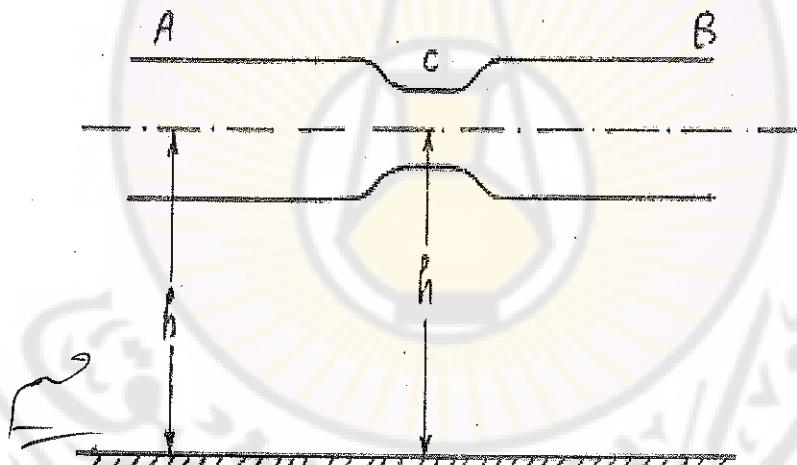
تصبح كما يلي :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (2-16)$$

حيث P_1 الضغط في المقطع الواسع (A) ، و P_2 الضغط عند الاختناق (B) ، من العلاقة (2-16) نجد أن سرعة المائع عند (C) تكون أكبر من سرعته عند (A) ، أو (B) ، أي أن ضغط المائع عند المقطع الواسع ، يكون أكبر من ضغطه عند الاختناق ، حيث (V_1, P_1, y_1) ارتفاع المائع عند A ، وضغطه وسرعته على الترتيب و (V_2, P_2, y_2) ارتفاع المائع عند C ، وضغطه وسرعته على الترتيب.

وبما أن الأنبوة أفقية $y_1 = y_2$ فإن :

$$\frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) = \frac{P_1 - P_2}{\rho} \quad (2-17)$$



الشكل (5)

9-1-2 جهاز فانتوري لتقدير سرعة وكمية جريان المائع :

الجهاز عبارة عن أنبوبة مختلفة المقاطع ذات اختناق عند (C) ، يقاس فرق الضغط بين (A,C) ، بواسطة مانومتر وبما أن :

٦

$$\frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) = \frac{P_1 - P_2}{\rho}$$

$$\begin{aligned}
 s_1 V_1 &= s_2 V_2 \\
 V_2 &= \frac{s_1 V_1}{s_2} \\
 \frac{1}{2} V_1^2 \left(\frac{s_1^2}{s_2^2} - 1 \right) &= \frac{P_1 - P_2}{\rho} \\
 V_1^2 &= \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(s_1^2 - s_2^2)} s_2^2 \\
 V_1 &= s_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(s_1^2 - s_2^2)}} \quad (2-18)
 \end{aligned}$$

وحجم المائع المار في الثانية $Q = s_1 \cdot V_1$

$$Q = s_1 s_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(s_1^2 - s_2^2)}} \quad (2-19)$$

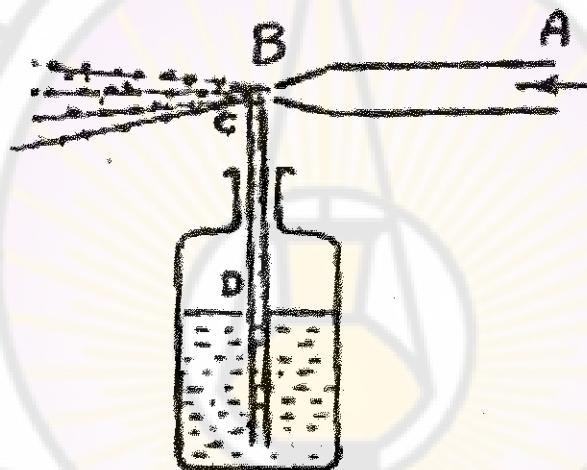
تعطي المعادلة (2-18) ، سرعة جريان المائع كما تعطي المعادلة (2-19) ، حجم المائع المار في الثانية الواحدة ، خلال أي مقطع من مقاطع الأنابيب . يمكن حساب $P_1 - P_2$ من قراءة المانومتر .

$$P_1 - P_2 = y(\rho' - \rho)g \quad (2-20)$$

حيث ρ' كثافة السائل في المانومتر .

3-1-9 البخاخة :

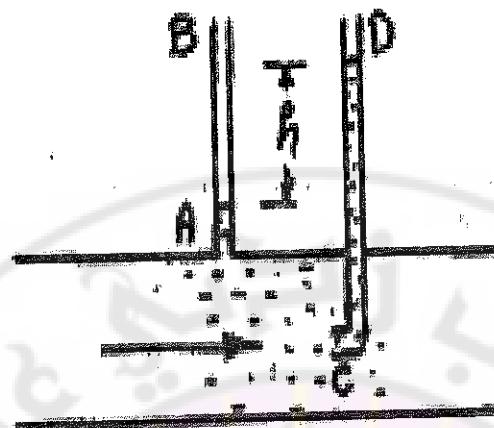
إذا نفخ هواء في الأنبوبة (AB) ، كما في الشكل (6) والتي مقطعها عند B صغيراً ، فإن سرعة الهواء عند (B) ، تكون كبيرة ، ويكون الضغط منخفضاً، ومن ثم يرتفع السائل في الأنبوبة (DC) ، وينتشر عند المنطقة (B) ، على شكل قطرات صغيرة .



الشكل (6)

4-1-9 أنبوبة بيتون لقياس سرعة وكمية جريان السائل :

يتركب الجهاز من أنبوبة (AB) ، ذات فتحة ضيقة موازية لاتجاه جريان السائل ، وأنبوبة أخرى (CD) ، ذات فتحة عمودية على اتجاه الجريان ، شكل (7)



الشكل (7)

عند (C) ، يقف جريان السائل ، وتكون سرعته معدومة ، أي تساوي صفر ، لأن الفتحة رأسية ، وتعد عائقاً .
باستخدام معادلة برنولي على الفتحتين (A,C) .

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 + 0 = \frac{P_2}{\rho} + 0 + 0 \quad (2-21)$$

حيث V_1 سرعة السائل عند (A) ، و (P_1) ضغطه عندها ، (P_2) ضغط السائل عند (C) ، و (ρ) كثافته :

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} = \frac{1}{2} V_1^2 \quad (2-22)$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} \quad (2-23)$$

ويسمى $P_2 - P_1$ ضغط السرعة ، أو الضغط الديناميكي وهو متساوٍ لـ

$$V_1 = \sqrt{2gh} \quad (2-24)$$

وإذا كانت (S) هي مساحة مقطع الأنبوية الثانية. يكون حجم السائل المار فيها

$$Q = s_i V_i = s \sqrt{2gh} \quad (2-25)$$

يحدث في حالات كثيرة اضطراب في الجريان ، مما يحدث تغيراً في مقدار ، واتجاه و سرع جسيمات السائل ، وينتج عن ذلك ، أن قراءة الجهاز تكون أكبر من اللازم ، وعلى ذلك يجب تعديل المعادلة السابقة كالتالي :

$$V_i = C \sqrt{2gh} \quad (2-26)$$

حيث (C) ثابت ، يسمى معامل أنبوبة بيتون ، وهو أقل من الواحد وتتراوح قيمته بين (1) و (0.97) .

5-1-9 انسياپ سائل من مستودع في أسفله فتحة جانبية:

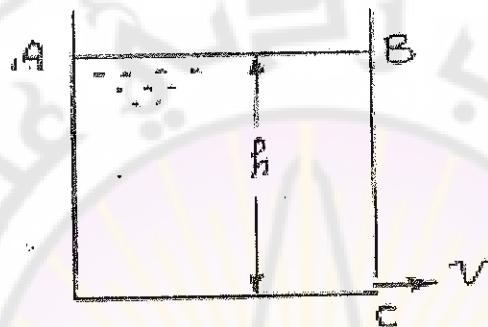
نفرض أن لدينا مستودعاً بالسائل ، وله فتحة جانبية عند (C)، كما في الشكل (8) ، بفرض أن سرعة السائل عند (C) هي (V) . إذا كان المستودع واسعاً تكون سرعة جريان السائل عند السطح (AB) ، منعدمة تقريباً لأن مساحة السطح كبيرة ، والضغط عند (AB) = الضغط عند الفتحة (C) = الضغط الجوي وبالتعويض في معادلة برنولي ، على السطح (AB) وعند الفتحة (C).

$$\frac{P}{\rho} + 0 + hg = \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} V^2 + 0 \quad (2-27)$$

$$\frac{1}{2} V^2 = gh \quad (2-28)$$

$$V = \sqrt{2gh}$$

تسمى هذه المعادلة بمعادلة تورشيللي ولكن لا يتأتى لأي سائل أن يكتسب هذه السرعة ، لأننا أهملنا لزوجة السائل ، كما أن خطوط مجرى الجريان تضيق عند الفتحة ، ولا تكون متوازية مما يجعل السرعة أكبر من هذا .

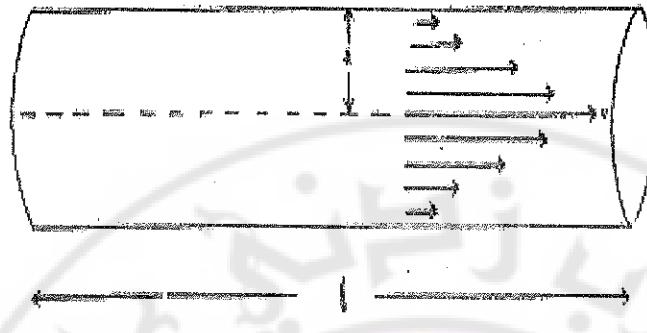


الشكل (8)

1-10 الانسياب في الأنابيب الشعرية (قانون بوازو) :

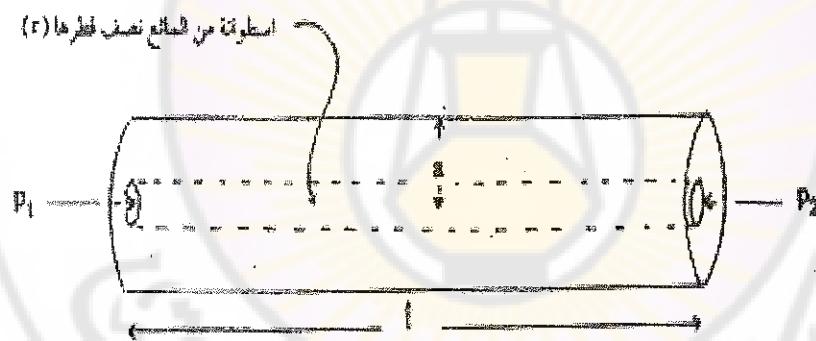
لحساب التدفق الحجمي في أنبوبة ، وضع بوازو الفرضيات التالية :

- 1- أن يكون انسياب المائع ثابتًا
 - 2- أن يكون الضغط على مساحة مقطع الأنبوبة ثابتًا ، وهذا لا يحدث إلا في الأنابيب الشعرية
 - 3- طبقة المائع الملائمة لجدار الأنبوبة تكون ساكنة ، وذلك لاتصالها بالجدار بفعل التوتر السطحي .
- لدرس انسياب مائع لزج غير قابل للانضغاط في أنبوبة نصف قطرها (a) ، وطولها (l) ، فإن سرعة المائع المماس لجدار الأنبوبة تساوي صفرًا ، وتزداد السرعة تدريجياً كلما ابتعدنا عن الجدار ، حتى تصل إلى أعلى سرعة (V) ، عند مركز الأنبوبة ، كما في الشكل (9) .



الشكل (9)

لنتخيل اسطوانة من المائع نصف قطرها (r) ، داخل الأنبوة كما في الشكل (10)



الشكل (10)

فإذا كان لدينا اسطوانة من المائع نصف قطرها (r) ، و طولها (l) ، تتحرك داخل الأنبوة الشعرية ، التي نصف قطرها (a) ، نتيجة لفرق في الضغط ($P_1 - P_2$) ، بين طرفيها، تتعادل قوة الضغط المحركة لاسطوانة الانسياب ، مع قوة اللزوجة المقاومة لحركة الأنبوة ، لأن الجريان ثابت ومنتظم .

$$\pi r^2 (P_1 - P_2) = -\eta (2\pi r l) \frac{dV}{dr} \quad (2-29)$$

وتدل الإشارة السالبة ، أن السرعة تقل كلما ابتعدنا عن المحور . و بتكميل المعادلة (29-2) وبفرض أن $V=0$ عندما تكون $a = r$ و $v = 0$ عندما $r=0$ فإننا نحصل

$$\int_0^V V dv = - \frac{(P_1 - P_2)}{2\eta l} \int_a^r r dr \quad (2-30)$$

$$[V]_0^V = - \frac{(P_1 - P_2)}{2\eta l} \left[\frac{r^2}{2} \right]_a^0$$

ومنها نجد أن

$$V = \frac{(P_1 - P_2)}{2\eta l} a^2 \quad (2-31)$$

نلاحظ من العلاقة السابقة ، أن سرعة المائع تكون أعظم ما يمكن ، عند مركز الأنبوة .

وحيث أن مقدار هذه السرعة ، يقل تدريجياً حتى ينعدم عند جدار الأنبوة ، فإننا نستطيع أن نعتبر أن المائع ينساب بسرعة وسطية ، قيمتها :

$$\bar{V} = \frac{V+0}{2} = \frac{1}{2} V$$

حيث \bar{V} السرعة الوسطية للمائع ، و V أعلى قيمة للسرعة وبالتعويض عن (V) من المعادلة (2-31) ، وحيث أن $(A = \pi a^2)$ فإنه يمكن حساب معدل الانسياب Q بالشكل التالي :

$$Q = \frac{(P_1 - P_2) \pi a^4}{8\eta l} \quad (2-32)$$

وتمثل هذه العلاقة قانون بوازولي ، ويمكن كتابتها بالشكل :

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)}{R} \quad (2-33)$$

$$R = \frac{8\eta l}{\pi a^4}$$

حيث تمثل R الممانعة لجريان المائع على غرار المقاومة الكهربائية .

مثال (3) :

أُوجد الفرق في ضغط الدم عند مروره خلال شعيرة دموية طولها (2 mm) وقطرها (4 μm) ، إذا علمت أن سرعة الدم عند محورها (0.57 mm/s) وعامل اللزوجة للدم

$$\eta = 4.10^{-3} N.s/m^2$$

الحل :

$$V = \frac{(P_1 - P_2)a^2}{4\eta l} \quad \text{باستخدام المعادلة :}$$

أو

$$\begin{aligned} (P_1 - P_2) &= \frac{1}{a^2} 4\eta l V \\ &= \frac{1}{(2.10^{-6} m)^2} \cdot 4 \cdot (4.10^{-3} N.s/m^2) \\ &= (2.10^{-3} m)(0.57.10^{-3} m/s) \\ &= 4.56.10^3 N/m^2 \\ &= 34.2 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

مثال (4) :

استخدم معطيات المثال السابق ، وأوجد معدل انسياب الدم في الشعيرات الدموية.

الحل :

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)}{R} \quad \text{باستخدام المعادلة}$$

$$R = \frac{8\eta l}{\pi a^4}$$

$$R = \frac{8(4.10^{-3} \text{ N.s/m}^2)(2.10^{-3} \text{ m})}{\pi (2.10^{-6} \text{ m})^4} = 1.274 \cdot 10^{18} \text{ N.s/m}^5$$

و

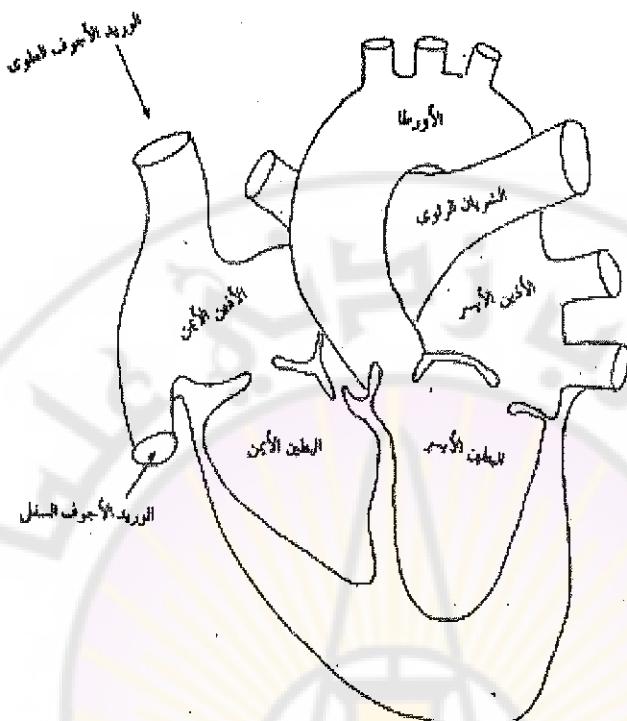
و منها

$$Q = \frac{(4.56 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2)}{(1.274 \cdot 10^{18} \text{ N.s/m}^5)} = 3.58 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3 / \text{s}$$

وإذا شبنا جريان السائل في الأنابيب بسريان التيار الكهربائي بالأسلام فإن ΔP يمثل فرق الكمون ، و Q التيار ، ف تكون R مقاومة للمقاومة الكهربائية وتمثل مقاومة الجريان

11-1 انسياب الدم في جسم الإنسان :

قلب الإنسان عضلة حمراء مخططة غير إرادية ، شكله مخروطي قاعده إلى الأعلى ، وذروته إلى الأسفل واليسار قليلاً ، يسكن جوف الصدر ، بين الرئتين للقلب أربعة أجوف ، أذينان في الأعلى و بطينان في الأسفل ، كما في الشكل (11)



(11) الشكل

يخرج الدم القائم من البطين الأيمن إلى الشريان الرئوي فالرئتين ، ويتوزع داخلهما بشبكة من الأوعية الشعرية ، فيفقد قسماً كبيراً من CO_2 ويأخذ من هواء الرئتين الأكسجين ، فيتحول لونه إلى دم أحمر قاني ، يعود بوساطة الأوردة الرئوية الأربع إلى الأذينة اليمنى .

يندفع الدم الأحمر القاني من البطين الأيسر ، إلى الشريان الأبهري حيث يتفرع إلى فروع كثيرة ، ثم إلى أوعية شعرية دموية دقيقة تنتشر بين خلايا الجسم ، حيث يعطي الدم الخلايا الأكسجين ، والمواد الغذائية ويأخذ منها غاز CO_2 ، والفضلات فيتحول لونه إلى دم قائم ، يعود إلى الأذينة اليمنى بوساطة الوريدين الأجوافين العلوي والسفلوي .

إن متوسط ضغط الدم في الأوردة والشرايين ، حوالي 100 mmHg وينخفض إلى حوالي 30 mmHg في الشعيرات الدموية ، ويستمر ضغط الدم في الانخفاض ، حتى يتلاشى عند وصوله إلى الأذينة اليمنى .

كيف نفس تغير ضغط الدم من جزء لآخر في الدورة الدموية ؟

$$Q = \frac{\Delta P \pi a^4}{8\eta l} = \frac{\Delta P}{R}$$

إذا رجعنا إلى قانون بوازوي حيث

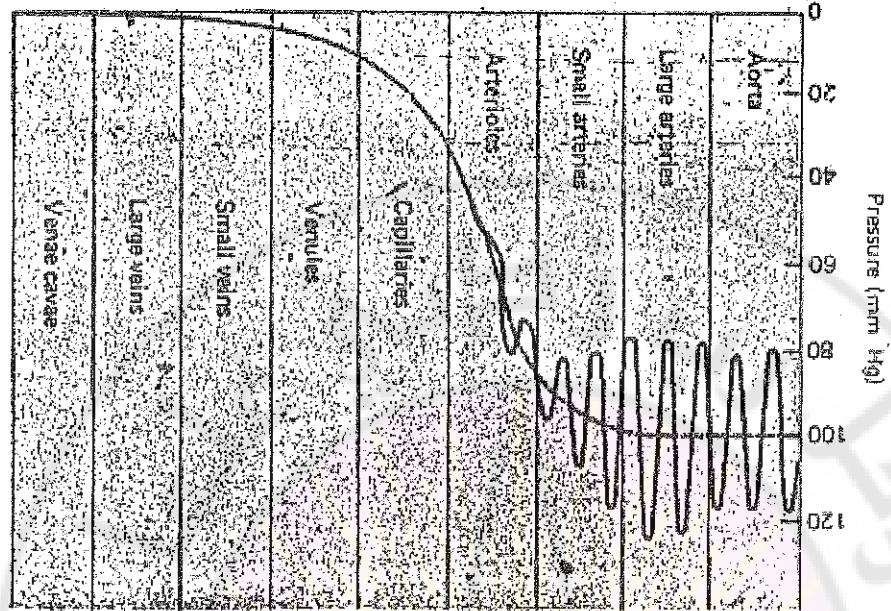
$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$\Delta P \propto \frac{l}{a^4}$ نلاحظ أن

$$\Delta P \propto R$$

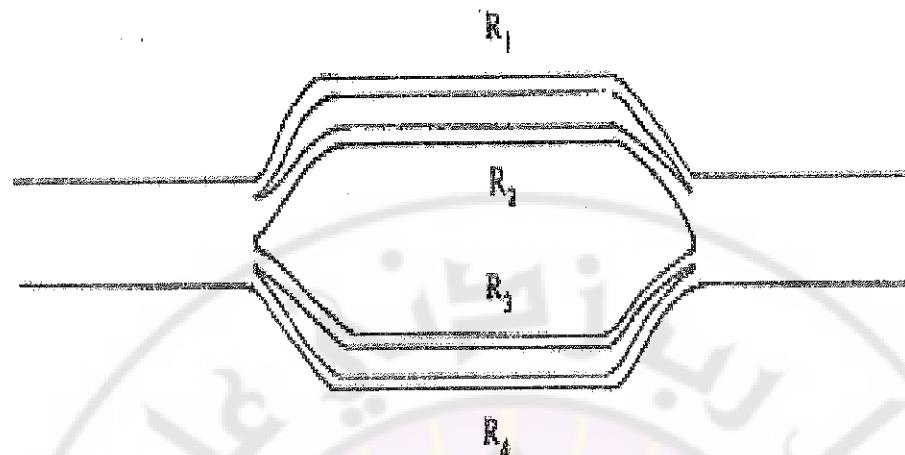
وهذا يعني أن الفرق في الضغط يتاسب عكسياً ، مع نصف القطر مرفوعاً إلى الأس (4) ، كما أنه يتاسب طردياً مع المقاومة ، ولذلك فإن الانخفاض في الضغط في كل جزء من أجزاء الدورة الدموية ، يتاسب تناوباً طردياً مع مقاومة الأوعية الدموية في ذلك الجزء .

فالانخفاض في ضغط الدم في الأوردة ، حيث نصف القطر يساوي (9 mm) يكون صغيراً جداً ، لدرجة أن هذا الانخفاض لا يكاد يلاحظ ، ولذلك فإن الفرق في الضغط في نهايتها يكون تقريباً كالضغط في بدايتها ، أي (100 mmHg) ، وكذلك الحال في الشرايين الرئيسية ، ثم تبدأ المقاومة في الزيادة عند الشرايين الفرعية ، فينقص فرق ضغط الدم في نهايتها إلى حوالي (85 mmHg) . تعد مقاومة الشرايين الدقيقة هي الأكبر مقاومة في الجهاز الدوري ، ولذلك فإن ضغط الدم سينخفض عند مروره فيها بمقدار (55 mmHg) ، أي أن الدم يدخل الشعيرات الدموية بضغط قدره (30 mmHg) فقط . انظر الشكل (12)



الشكل (12)

عند مرور الدم في الشعيرات الدموية ، فإن ضغطه ينخفض - فقط - بمقدار (20 mmHg) ، بالرغم من أن نصف قطر الشعيرات الدموية أصغر بكثير من الشريانين الدقيقين ، ويعزى ذلك إلى أن عدد الشعيرات الدموية كبير جداً ، علاوة على أن هذه الشعيرات متصلة على التوازي كما في الشكل (13) ، وهذه الطريقة في التوصيل كما نعلم عند دراستنا لتوسيع المقاومات في الدوائر الكهربائية تكون فيها المقاومة أصغر من أي مقاومة على حده ، فعند دخول الدم إلى العروق يكون ضغطه حوالي (10 mmHg) ، ثم يبدأ في الانخفاض حتى يصل إلى الصفر عند رجوعه للأذين الأيمن .



الشكل (13)

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$$



مسائل الفصل الثاني

1- أنبوبة شعرية أفقية طولها 3000 m وقطرها 0.70 m يجري خلالها الماء بمعدل 20 لتر في الثانية فإذا علمت أن لزوجة الماء (0.001 pa.s) فاحسب فرق الضغط اللازم لهذا الجريان .

2- استنتاج معادلة بوازوبي لجريان السوائل في الأنابيب الشعرية .

3- ينساب ماء في أنبوبة أفقية غير منتظمة المقطع ، فإذا كانت سرعة الماء 7 m/s عند نقطة ما حيث الضغط $(1.6 \cdot 10^5\text{ pa})$ ، أوجد سرعة الماء عند نقطة أخرى حيث الضغط $(1.8 \cdot 10^5\text{ pa})$.

4- ينساب سائل كثافته النوعية (0.8) في أنبوبة غير منتظمة المقطع ، فإذا كانت مساحة مقطع الأنبوبة عند طرفها (a) هي (11 cm^2) ، ومساحة المقطع عند الطرف الآخر (b) الذي ارتفاعه (3 m) عن المقطع (a) هي (45 cm^2) ، وكان معدل الانسياب $(0.09\text{ m}^3/\text{s})$ ، أوجد الفرق في الضغط بين المقطعين ، أهمل لزوجة السائل .

5- إذا كانت سرعة انسياب الماء في أنبوبة أفقية عند المقطع (a) هي (1.6 m/s) ، وسرعته عند المقطع (b) هي (3.4 m/s) أوجد الفرق في الضغط بين المقطعين ، أهمل لزوجة الماء .

6- اشرح معادلة برنولي .

7- سائل ينساب بسرعة V_0 خلال أنبوبة أسطوانية نصف قطرها (r) ما هي سرعة هذا السائل عند نقطة تضيق فيها الأنبوبة ويصبح نصف قطرها $r/4$ علماً بأن الأنبوبة تكون مفتوحة عند هذه النقطة .

8- يناسب الماء بانتظام خلال أنبوبة مغلقة ، فإذا كانت سرعة الماء عند نقطة معينة هي 3 m/s ، وكانت سرعة السائل عند نقطة أخرى ، أعلى من الأولى بمقدار (1 m) ، هي (4 m/s) وإذا كان الضغط عند النقطة السفلية (20 Kpa) فما هو الضغط عند النقطة العليا ؟ وكيف ستصبح قيمة الضغط عند النقطة العليا إذا أوقف سريان السائل وكانت قيمة الضغط عند النقطة السفلية (18 Kpa) ؟

9- يناسب الماء خارجاً من أنبوبة بمعدل $(3 \text{ cm}^3/\text{s})$ أوجد سرعة الماء عند نقطة بالأنبوبة قطرها مساوياً :

$$b - 0.80\text{cm} \quad a - 0.5\text{cm}$$

10- إذا كان مقياس فانتوري يصنع اختناقاً مساحة مقطعه a_2 في أنبوبة مساحة مقطعها a_1 ، وإذا كان المقياس يسجل فرق الضغط ، $P_1 - P_2$ بين الضغط الطبيعي للسائل P_1 والضغط عند الاختناق P_2 اشتق تعبيراً لسرعة السائل داخل الأنبوة ، بعيداً عن الاختناق بدلالة البيانات السابقة .

11- باستخدام المسألة السابقة أوجد حجم السائل لوحدة الزمن المار عبر مقطع الأنبوة .

12- برميل مملوء بالماء موضوع على منضدة ارتفاعها h فإذا كان هنالك ثقب في جانب البرميل بالقرب من قاعه ووجد أن الماء المندفع من الثقب يصطدم بالأرض على بعد (أفقي) مقداره R من البرميل فما هو عمق الماء بالبرميل ؟

13- ثقب مساحته 1mm^2 موجود في نهاية أنبوبة رفيعة بالقرب من قاع إناء كبير به ماء ، فإذا كان الماء يندفع من ذلك الثقب وكان ارتفاع مستوى السطح

العلوي للماء بالإلقاء هو $20m$ أعلى نقطة خروج الماء من الثقب ، ما هي كمية الماء المندفع بالثانية ؟ .

14 - أنبوبة أفقية تصل بين أنبوبتين أخربيتين مساحة مقطعيهما A_1 و A_2 على التوالي ، والنهاية الأخرى للأنبوبة الأخيرة مفتوحة على الهواء ، فإذا كان الضغط الجوي هو P_0 وبإهمال أثر اللزوجة فما هي قيمة الضغط داخل الأنبوبة الأولى واللازمة لجعل الماء يخرج بسرعة قدرها V_2 من النهاية المفتوحة ؟ ما هي سرعة الماء في الأنبوبة الأولى ؟ ما هو حجم الماء المناسب خارج الأنبوبة خلال الفترة Δt ، عبر عن إجابتك بدلاله A_1, V_2, P_0

15- ما هي معادلة الاستمرارية .

16- يتدفق الماء بهدوء من مجموعة أنابيب مغلقة ، سرعة الماء عند إحدى النقاط $3m/s$ وسرعته عند نقطة أخرى تعلو الأولى بمتر واحد هي $4m/s$ ، إذا كان الضغط عند النقطة السفلی $20Kpa$ كم يكون الضغط عند النقطة العليا ؟ ما الذي يؤول إليه الضغط عند النقطة العليا إذا توقف الماء عن الجريان وكان الضغط عند النقطة السفلی $18Kpa$ ؟



الفصل الثالث

المقاييس الحرارية

1- 3 مفهوم درجة الحرارة :

درجة الحرارة هي العدد الذي يدل على مقدار سخونة الجسم أو برودته مقاساً على أي مقياس اختياري لدرجات الحرارة ، ومن ثم فإن درجة الحرارة لأي جسم ما هي إلا مقياساً للطاقة الداخلية النوعية لهذا الجسم ، بمعنى أن الجسم الذي جزيئاته طاقة داخلية نوعية كبيرة تكون درجة حرارته مرتفعة.

2- 3 الطاقة الداخلية النوعية (U) للجسم :

هي متوسط الطاقة الداخلية لجزيئات التي تتضمنها وحدة الكتل .

3- 3 الطاقة الداخلية للجسم :

ت تكون المادة مهما كان شكلها ، صلبة أو سائلة أو غازية من ذرات ، وهذه الذرات دائمة الحركة في جميع الاتجاهات ، ومجموع الطاقة الحركية والطاقة الكامنة يسمى بالطاقة الداخلية للجسم .

4- 3 كمية الحرارة (الحرارة) :

الحرارة شكل من أشكال الطاقة ، ويمكن اعتبارها الطاقة الداخلية في الحالة الانتقالية للجسم ، فعند تماست جسمين أحدهما ساخن والأخر بارد ، فإن الجسم البارد ترتفع درجة حرارته ، والجسم الساخن تتحفظ درجة حرارته ، فهذا يدل على أنه حصل تبادل بالطاقة الداخلية بين الجسيمين ، ويتوقف هذا التبادل الحراري عندما تتساوى درجة حرارة الجسيمين ، بمعنى أنه عندما يتلامس جسيمان ، فإن الطاقة الداخلية تنتقل من الجسم الساخن إلى الجسم البارد ، بغض النظر عن أي الجسيمين

يمتلك طاقة داخلية أكبر من الآخر ، تفاصي كمية الحرارة في الجملة الدولية كالطاقة بالجول ، وتفاصي بوحدات حرارية أخرى تسمى الحريرة ، وتعرف الحريرة بأنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غرام واحد من الماء النقي درجة مئوية واحدة .

السعه الحراريه

هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الجسم درجة واحدة (كلفن) ، وتقدر بوحدة جول / درجة (J/K⁰).

5-3 مقياس درجة الحرارة :

لصنع مقياس لدرجة الحرارة ، يلزم اختيار خاصية من الخواص الفيزيائية ، التي تتغير بتغيير درجات الحرارة ، مثل تمدد السوائل أو الغازات أو تغير مقاومة سلك البلاتين ، أو غير ذلك . ويلزم أيضاً اختيار عدداً من درجات الحرارة الثابتة ، مثل درجة انصهار الجليد ، ودرجة غليان الماء ، ودرجة غليان الكبريت ، ودرجات انصهار بعض المعادن الندية .

6-3 النقطة الثابتة العيارية :

هي درجة حرارة ثابتة في ظروف معينة ، مثل درجة انصهار الجليد تحت الضغط الجوي النظامي ، ودرجة غليان الماء تحت الضغط الجوي النظامي .

7-3 سلام درجات الحرارة

في هذا السلام النقطتان الثابتتان هما درجة انصهار الجليد ، وهي النقطة السفلی (C⁰) ، ودرجة غليان الماء في الضغط الجوي العادي ، وهي النقطة العليا وأعطيت القيمة C¹⁰⁰ ، وقسم التدرج بين هاتين النقطتين إلى 100 قسم متساوٍ ، وأطلق على كل منها درجة مئوية (درجة سلسليوس C⁰) ، ويرمز لدرجة

الحرارة المقاسة على هذا السلم بالرمز t_c ، ويسمى هذا السلم أحياناً بسلم سلزيوس نسبة إلى الفلكي السويسري الذي ابتكر هذا المقياس سنة 1742م.

3-7-1 سلم فهرنهايت:

لقد أدخل هذا السلم سنة 1709م ، وهو يرجع إلى الفيلسوف الألماني الحامل لهذا الاسم ، وفي هذا المقياس النقطة الثابتة الصغرى هي درجة انصهار الجليد ، وأعطيت القيمة ($32^{\circ}F$) ، والنقطة الثابتة العظمى هي درجة غليان الماء في الضغط الجوي العادي ، وأعطيت القيمة ($212^{\circ}F$) ، أي أن عدد أقسام التدرج 180 قسماً متساوياً ، أطلق على كل منها درجة فهرنهايت ، ويرمز لدرجة الحرارة بالرمز t_F .

3-7-2 السلم المطلق :

يعرف الصفر المطلق ، بأنه درجة الحرارة التي يتلاشى عندها حجم الغاز ، نظرياً مع ثبوت الضغط ، وهذه الدرجة على السلم المئوي هي ($273.15^{\circ}C$) والعلقة بين مقياس كلفن ، والسلم المئوي يمكن أن تكتب كالتالي :

$$T_K = t_0 + 273.15 \text{ K}^0 \quad (3-1)$$

حيث : T_K درجة الحرارة على مقياس كلفن ، و T_C درجة الحرارة على المقياس المئوي.

من هذه العلاقة نجد أن صفر السلم المطلق يقع أسفل صفر السلم المئوي بمقدار (273.15°) ، ويقسم السلمان بنفس الكيفية وقد ثبت حديثاً أن النقطة الثلاثية للماء (الدرجة التي يجتمع فيها الجليد والماء وبخار الماء في حالة اتزان) ، وهي ($0.01^{\circ}C$) أدق وأثبت من درجة حرارة انصهار الجليد ، وقد اختيرت النقطة الثلاثية للماء النقطة الثابتة الوحيدة على السلم المطلق المئوي الذي يسمى سلم

كفن ، وعلى ذلك فإن وحدة درجة الحرارة على مقياس الديناميكا الحرارية (مقياس كفن) تساوي $1/273.15$ من درجة حرارة النقطة الثلاثية للماء على نفس المقياس ويرمز لها بالرمز (K) .

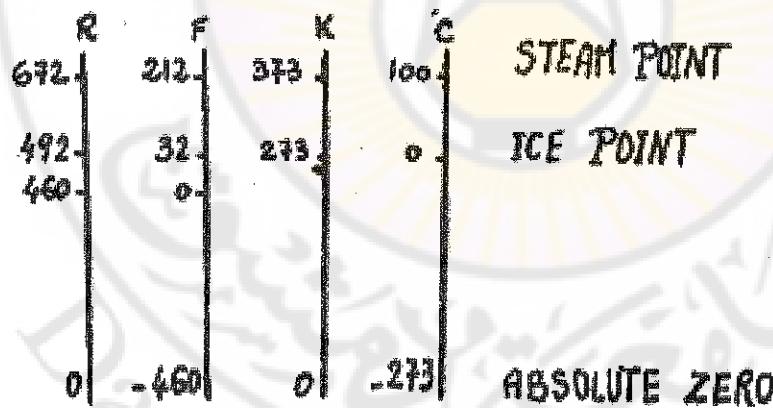
أما صفر السلم المطلق فيقع على سلم فهرنهايت عند ($-459.67^{\circ}F$) ،

وتعرف درجة الحرارة المطلقة الفهرنهايتية بالمعادلة :

$$T_R = t_{0f} + 459.67^{\circ}R \quad (3-2)$$

ويسمى هذا السلم بسلم رانكين ، نسبة إلى علامة العالم رانكين ويقسم سلم رانكين بنفس الكيفية التي يقسم بها السلم الفهرنهايتى ، وتكون العلاقة بين سلم رانكين وسلم كفن كالتالي :

$$T_R = \frac{9}{5} T_K \quad (3-3)$$

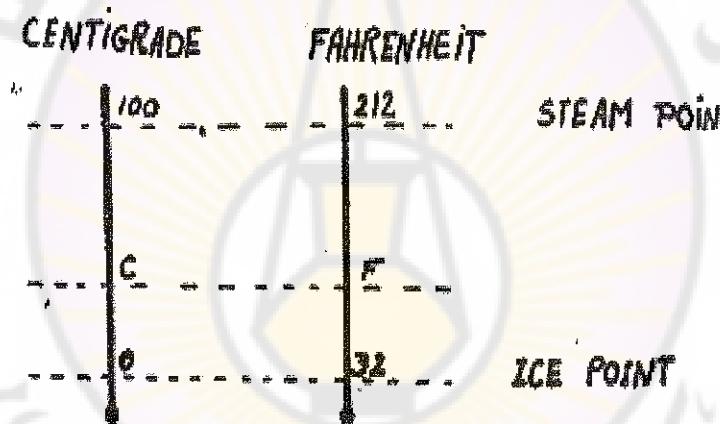


الشكل (1) .

8-3 العلاقة بين سالم درجات الحرارة :

نفرض أن درجة حرارة جسم ما ، مقاساً على السلمين المئوي والفهرنهيتى ،
الشكل (2) ، هي (F,C) على الترتيب ، فتكون التدرجات بين سطح الزئبق
والنقطة السفلية (C-0) و (F,32) على الترتيب ، وتكون النسبة بين أي تدرج
والتدرج الأساسي المقابل له ثابتة أي أن :

$$\frac{C}{100} = \frac{F - 32}{180}$$



الشكل (2)

مثال (1)

حول درجات الحرارة التالية من الفهرنهيات إلى الدرجة المئوية :

-34 F° (ج) 0 F° (ب) 97.8 F° (ج)

الحل

$$t_c = \frac{5}{9}(t_f - 32) \quad (ا)$$

$$t_c = \frac{5}{9}(97.8 - 32)$$

$$t_c = 36.55 \text{ } C^\circ$$

(ب)

$$t_c = \frac{5}{9}(0 - 32) = -17.78 C^\circ$$

(جـ)

$$t_c = \frac{5}{9}(-34 - 32) = -36.66 \text{ } C^\circ$$

مثال (2)

حول درجات الحرارة التالية من التدرج المئوي إلى التدرج الفهرنهايتي :

$$-243 C^\circ \quad (جـ)$$

$$-4 \text{ } C^\circ \quad (بـ)$$

$$30 \text{ } C^\circ \quad (ا)$$

الحل

$$t_f = \frac{9}{5}t_c + 32 \quad (ا)$$

$$t_f = \frac{9}{5}(30) + 32$$

$$= 86 F^\circ$$

(بـ)

$$t_f = \frac{9}{5}(-4) + 32$$

$$= 24.8 \text{ } F^\circ$$

(جـ)

$$t_F = \frac{9}{5}(-234) + 32 \\ = -405.4 \text{ F}^{\circ}$$

مثال (3)

حول درجات الحرارة التالية إلى سلم كلفن

- (أ) 60 C° (ب) -53 C° (جـ) 26 C°

الحل

(أ)

$$t_K = t_C + 273.15 \\ t_K = 26 + 273.15 \\ t_K = 299.15 \text{ K}^{\circ}$$

(ب)

$$t_K = -53 + 273.15 \\ t_K = 220.15 \text{ K}^{\circ}$$

(جـ)

$$t_K = 60 + 273.15 \\ = 333.15 \text{ K}^{\circ}$$

9- 3 التعبير الرياضي للسلم الحراري:

إذا رمزا إلى أي خاصة من الخواص الطبيعية التي تتغير بتغير درجة الحرارة بالرمز (X) ، وكانت (x_t, x_0, x_{100}) ، تمثل قيم هذه الخاصية عند النقطة الثابتة الصغرى ، الخاصية والنقطة الثابتة العظمى ، والدرجة المجهولة (t)

(على الترتيب ، فإن قيمة التغير في المناظر لدرجة واحدة لكل من تدريجي سلسيل وكلفن هو :

$$\frac{X_t - X_0}{t} = \frac{X_{100} - X_0}{100}$$

$$t = \frac{X_t - X_0}{X_{100} - X_0} \cdot 100 \text{ C}^0$$

وبالمثل بالنسبة للسلم الفهرنهايتى فإن:

$$\frac{X_t - X_{32}}{t - 32} = \frac{X_{212} - X_{32}}{180}$$

$$t = \frac{X_t - X_{32}}{X_{212} - X_{32}} \cdot 180 + 32 F^0$$

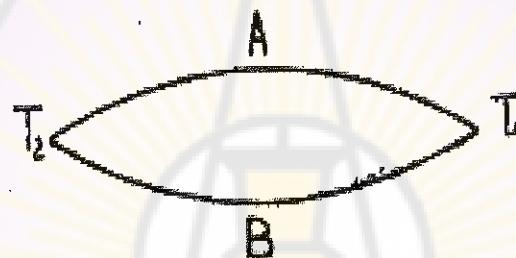
وحيث أن الخواص الفيزيائية لا تتغير جميعها بنفس الكيفية ، ولا بنفس المعدل ، فإن لكل خاصية سلماً حرارياً خاصاً بها ، أي أن درجة حرارة جسم ما مقاساً على سلم خاصية معينة ، تختلف عن درجة حرارة الجسم نفسه لو قيست على سلم خاصية أخرى .

10-3 ميزان الازدواج الحراري

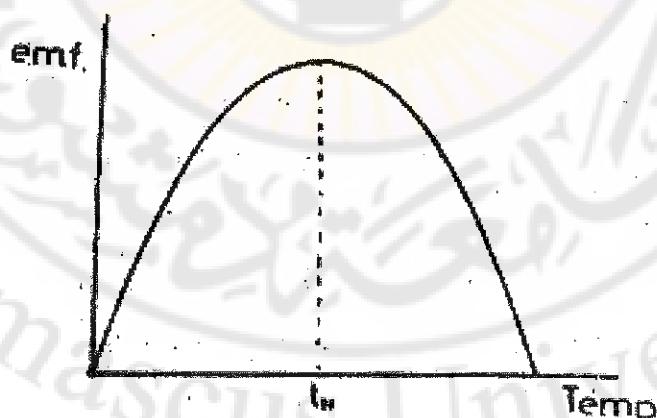
اكتشف سبيك في عام 1821 التأثير الكهروحراري وذلك بتوصيل سلكين من معدنين مختلفين مع بعضهما عند نهايتهما فإذا كانت إحدى النهايتين ساخنة ، والأخرى باردة شكل (3) فإن قوة محركة كهربائية تتكون في هذه الدارة ، وينشأ عنها مرور تيار كهربائي في الدارة ، ولقد وجد أن القوة المحركة الكهربائية المتولدة ، والتيار الكهربائي المار يعتمدان على كل من طبيعة المعدنين المستخدمين

وعلى الفرق بين درجتي حرارة النهايتين ، ويمكن قياس القوة المحركة الكهربائية الناتجة بقطع أحد السلكين ، وتوصيله بمقاييس فولط مناسب ، ولقياس درجة الحرارة بهذا الميزان، يدرج الميزان أولاً بوضع إحدى النهايتين في جليد مبروش قبيل الذوبان ، ووضع النهاية الأخرى في درجات حرارة معلومة ، يرسم المنحنى شكل (4) بين القوة المحركة الكهربائية ، وبين درجة الحرارة المقابلة لها .

توضع النهاية الساخنة بعد ذلك في الجسم المراد إيجاد درجة حرارته ، وتقاس القوة المحركة الكهربائية الناتجة ، ومن المنحنى البياني يمكن إيجاد درجة الحرارة المطلوبة .



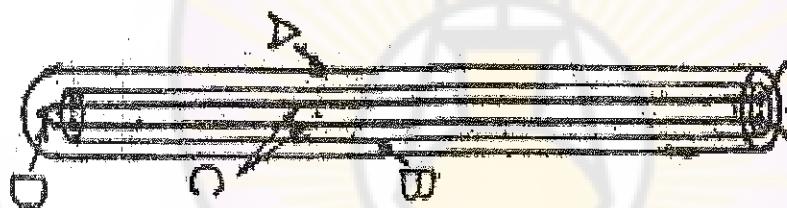
الشكل (3)



الشكل (4)

ودرجة الحرارة التي تكون عندها القوة المحركة الكهربائية أكبر ما يمكن ، تسمى بدرجة التعادل ، ويجب أن يختار الإزدجاج الحراري بحيث تكون درجة تعادله أكبر من الدرجة المطلوب قياسها .

يعزل السلكان (C) كما في الشكل (5) عن بعضهما بامرار كل منها في ثقب أسطواني في أنبوبة حرارية (B) من الخزف ، ويغلف الجميع بأنبوبة حرارية أخرى (A) من نفس المادة ، وذلك لحماية الإزدجاج من الغازات الفعالة ، أو الأبخرة المعدنية التي قد توجد داخل الفرن المراد قياس درجة حرارته ، (D) هو التصاق النهائي للإزدجاج ، ويزداد خارج الأنبوبة (B) بحوالي (0.5 cm).



الشكل (5)

لقياس درجات الحرارة حتى (300°C) يستخدم إزدجاج حراري مكون من سلكين ، أحدهما من النحاس ، أو الحديد والأخر من الكونستتن (الكونستتنان عبارة عن سبيكة من النحاس والنحيل) ، يعطى مثل هذا الإزدجاج حوالي 5 ميكروفولت لكل فرق في درجة الحرارة قدرها (1°C) بين النهايتين . تحسب درجة حرارة النهاية الساخنة (t) ، باستخدام العلاقة التالية :

$$e = at + bt^2 + ct^3 \quad (3-4)$$

حيث (a , b , c) ثوابت يمكن تعبيتها بقياس القوة المحركة الكهربائية ، عند وضع النهاية الساخنة في ثلاثة درجات حرارة معلومة 100°C و 200°C و 300°C ، على التوالي ، فتكون دقة القياس في المدى المذكور هي 0.2°C كما يمكن استخدام نفس الأزدواج في المدى من 190°C إلى 0°C ، بنفس المعادلة ، ولكن بثوابت جديدة يمكن تعبيتها باستخدام درجات حرارة منخفضة معلومة ، ولا يحسن استخدام هذا الأزدواج في درجات حرارة أعلى من 330°C حيث يتأكسد النحاس في هذه الحالة ، وتتغير أبعاد الأسلال مما يتربّط عليه خطأ ، وباستخدام أسلال غليظة من الحديد و الكونستتن أمكن استخدام الأزدواج الحراري للأغراض الصناعية لقياس درجات حرارة تقارب من 750°C ، ولقياس درجات حرارة تصل إلى 1100°C يمكن استخدام أزدواج حراري مكون من سلكين أحدهما من سبيكة من النيكل والكروم والآخر من سبيكة من النيكل والألمانيوم ، ولدرجات حرارة تصل إلى 1500°C يستخدم سلكان أحدهما من البلاتين والآخر من سبيكة من البلاتين والروديوم ، وتستخدم المعادلة :

$$e = at + bt + ct^2 \quad (3-5)$$

في المدى من 630°C إلى 1063°C . (a , b , c) ، ثوابت يمكن تعبيتها بتعيين (e) في درجات انصهار الأنتيميون والفضة والذهب ، يكون الأزدواج في هذه الحالة أزدواجاً عيارياً ، الجدول (1)

يسمى المقدار التفاضلي $\frac{de}{dt}$ الاستطاعة الكهروحرارية، وهي تساوي صفرًا عند درجة التعادل.

جدول (١)

بلاين بلاتين وروبيوم	نيكل كروم نيكل ألومنيوم	النحاس والكتيتان	درجة الحرارة
٦٦٤ دللي فولت	١٤٤ مللي فولت	٤ مللي فولت	١٠٠
١٣٤٤	٨١	٩	٢٠٠
٢٣٣	١٢٣	١٥	٣٠٠
٣٢٥	١٩٣	—	٤٠٠
٤٢٢	٤٦٩	—	٥٠٠
٧٣٣	٣٢٣	—	٨٠٠
٩٥٧	٤١٣	—	١٠٠٠
١٥٣٥	—	—	١٢٠٠

بالنسبة لازدواج المستخدم في صناعة الحديد والصلب ، فإنه يغلف بطبقة رقيقة من السيليكا ، ويصنع بحيث يمكن أخذ القراءة به لمدة بضع ثوان ثم يسحب مباشرة من الفرن فمثلاً إذا كان قطر السلك في الإزدواج هو (1.3mm) ، وسمك غلاف السيليكا عليه (0.5mm) فإن زمن القراءة لا يزيد عن ثلث ثوان ، ويجب أن يستبدل الغلاف بخلاف جديد بعد كل قراءة ، وأن يستبدل الإزدواج نفسه بازدواج جديد بعد كل 12 قراءة .

3-10-1 المعادن والسبائك المستخدمة في الإزدواجات الحرارية :

عند الاتصال بالبارد يمر التيار الكهربائي في دائرة الإزدواج من أحد السلكين إلى السلك الآخر ، وقد اصطلاح على اعتبار السلك الذي يمر منه التيار موجب والذي يمر إليه التيار سالباً ، وهناك مجموعتان من الأسلاك الشائعة استخدامها لهذا الغرض هما مجموعة المعادن الثمينة ومجموعة معادن الأساس والجدولين (1,2) يبينان أنواع المجموعتين ومدى درجات الحرارة المستخدمة من أجل كل نوع

الجدول (2)

مجموعة المعادن الثمينة Precious Metal Group

السلك الموجب	السلك	أقصى درجة حرارة
سبائك من : بلاتين ٪٩٠ روديوم ٪١٠	باتلين	1400°C
سبائك من : بلاتين ٪٨٧ روديوم ٪١٣	باتلين	1400°C
سبائك من : بلاتين ٪٩٥ روديوم ٪٥	باتلين	1700°C
سبائك من : بلاتين ٪٨١ روديوم ٪٢٠	باتلين	1900°C

مجموعة معادن الأساس

السلك الموجب	السلك السالب	أقصى درجة حرارة
تحاس أحمر Copper	كونستان	
	سبائك من : نيكل ٪٤٠ نحاس أحمر ٪٦٠	400°C
حديد	كونستان	850°C
Chromel (كروميل) سبائك من : نيكل ٪٩٠ كروم ٪١٠	Alumel (المول) سبائك من : نيكل ٪٩٤ الومونيوم ٪٢ سليكون ٪٤ منجنيز ٪٤	1100°C

مثال :

وضع الاتصال الساخن لإزدجاج حراري من الحديد والكونستان في درجة مجهولة والبارد في الدرجة 20°C وقيمت القوة المحركة الكهربائية المتولدة فوجد أنها (4.09mV) أوجد الدرجة المجهولة .

الحل

من جدول المعايرة للإردواج المستخدم نجد أن :
القوة المحركة الكهربائية (E_2) المترولة عندما يكون الساخن في الدرجة ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)
والبارد في الدرجة ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) هي (1.019 mV)

$$E = E_1 + E_2 \\ E = 4.09 + 1.019 = 5.109\text{ mV}$$

وهذه هي القوة المحركة الكهربائية المقابلة للملحم الساخن في الدرجة المجهولة
والبارد في درجة الصفر ومن الجدول نجد أن درجة الحرارة المقابلة هي $97\text{ }^{\circ}\text{C}$

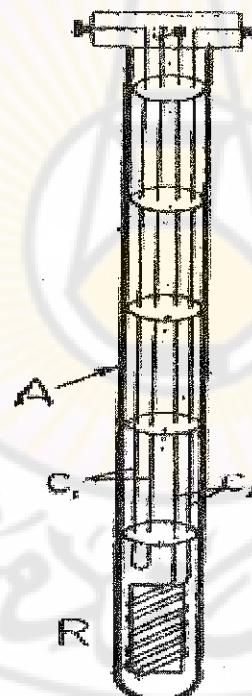
3- ميزان الحرارة البلاطيني :

يتكون ميزان الحرارة شكل (6) ، من سلك رفيع من البلاتين النقي (R) ،
يلف حول إطار من الميكا العازلة ، بحيث لا تتولد فيه تيارات تحريرية ، عند
مرور التيار الكهربائي ، وذلك لأن يثنى السلك على نفسه قبل أن يلف ، يتصل
الملف بسلكين من البلاتين الغليظ (C_2) ، ويوضع في أنبوبة من الخزف ، أو
السيليكا المنصهرة ، وأن يعزل سلكا التوصيل أحدهما عن الآخر بمرورهما خلال
ثقب في أقراص من الميكا داخل الأنبوبة ، لتلافي مقاومة سلكي توصيل الملف ،
يوجد داخل الأنبوبة (A) ، سلكان متشابهان (C_1) ، متصلان مع بعضهما من
أسفل ويسمايان بأسلاك التعادل ، ويتصلان على التوالي مع قنطرة وسطوان
المعدلة شكل (7) ، وتسمى قنطرة كالندر ، وجريفت وفيها (P) و (Q)
مقاومة ثابتتان ، وكل منها يساوي $10\text{ }\Omega\text{m}$ ، (X) مقاومة متغيرة معلومة القيم
(صندوق مقاومات) ، (L_1, L_2) سلك منتظم المقطع مقاومة السنتمتر الطولي
منه معلومة ، ولتكن ρ . لإيجاد مقاومة الملف البلاطيني ، تعديل قيمة (x) ،
ويحرك زالق الغلفانومتر على السلك حتى يرجع مؤشر الغلفانومتر إلى موضع
الصفر ، أي حتى لا يحدث انحراف فيه ، وعلى ذلك فإن :

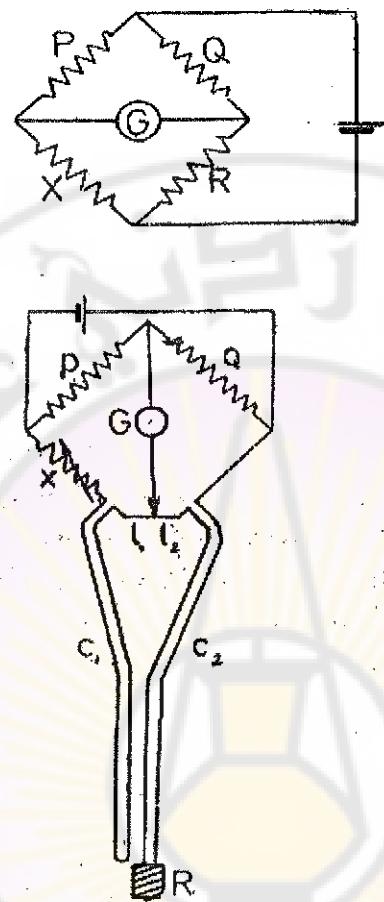
$$\frac{P}{Q} = \frac{X + C_1 + \rho L_1}{\rho L_1 + C_2 + R_t}$$

حيث (R_t) هي مقاومة الملف البلاستيني في درجة الحرارة (t) وبما أن :

$$C_1 = C_2 \\ Q = P \\ R_t = X + \rho(L_1 - L_2) \quad (3-6)$$



الشكل (6)



الشكل (7) جسر وسطون المعدل

ومن ذلك يمكن معرفة مقاومة الملف البلاتين وحده بدون مقاومة أسلاك التوصيل .

12-3 الترمومترات الغازية

تمتاز هذه الموازين الحرارية بالميزات التالية:

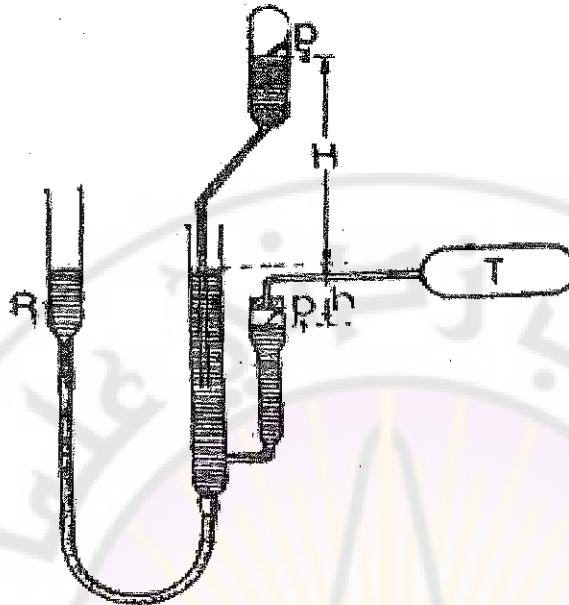
- 1 تعد الغازات مثالية فهي لا تتحول إلى سائل بسهولة .
- 2 يمكن الحصول على الغازات في درجة عالية من النقاوة .

- 3 للغازات معامل تمدد أكبر بكثير من معامل تمدد الزئبق وعلى ذلك فموازين الحرارة الغازية ذات حساسية عالية .
- 4 الغازات النقيّة لها معامل تمدد منتظم وعلى ذلك فهي تتعدد بنفس المعدل في جميع درجات الحرارة بخلاف الزئبق .
- 5 تعتبر موازين الحرارة الغازية عيارية وتستخدم لمعاييرة الموازين الحرارية الأخرى .
- 6 لها مدى واسع حيث يمكن استخدامها بين $^{\circ}\text{C}$ 2500 - 265 بما أن حجم وضغط كمية معينة من الغاز تتغيران بتغيير درجة الحرارة فعلى ذلك يوجد نوعان من الموازين الغازية .
- أ- موازين حرارية يثبت فيها حجم الغاز
- ب- موازين حرارية يثبت فيها الضغط

13-3 أميزان الحرارة الغازي ذو الحجم الثابت :

يتركب الميزان الغازي العياري شكل (8) ، من المستودع (T) الذي يملأ بالغاز النقي الجاف ، يتصل المستودع بأنبوبة شعرية ، تنتهي في الطرف المغلق لمانومتر زئبقي . يتصل المانومتر بمستودع (R) ، به زئبقي عن طريق أنبوبة مرنّة ، بحيث يمكن رفع المستودع أو خفضه ، ينكّس في الطرف المفتوح من المانومتر أنبوبة بارومترية لقياس الضغط الجوي .

نضع (T) في جليد مجروش ، ونرفع المستودع (R) ، أو نخفضه حتى يلامس سطح الزئبقي السن العاجي (P_1) ، ونرفع الأنبوبة البارومترية ونخفضها حتى يلامس سطح الزئبقي السن العاجي (P_2) .



الشكل (8)

ضغط الغاز (P_0) = الضغط الجوي + الفرق بين ارتفاعي الزئبق في المانومتر . أي أن

$$P_0 = h_0 + H$$

نضع (T) في بخار الماء الذي يغلي في الضغط الجوي العادي ، ونكرر العملية السابقة حتى يلامس سطح الزئبق السفين (P_1, P_2) مرة أخرى لكي يظل حجم الغاز ثابتاً في كل حالة .

$$P_{100} = h_{100} + H$$

وأخيراً نضع (T) في الجسم المراد قياس درجة حرارته ، ويضبط الترمومتر كما سبق

$$p_t = h_t + H$$

وباستخدام العلاقة الرياضية :

$$t = \frac{P_t - P_0}{P_{100} - P_0} \cdot 100 C^0 \quad (3-7)$$

14-3 ميزان الحرارة الإشعاعي (البิرومتر الضوئي) :

يستخدم هذا البيرومتر لقياس درجات الحرارة المرتفعة ، وهو يعتمد على قانون بلانك

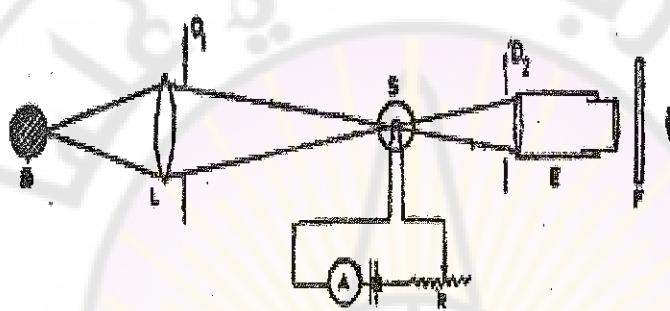
$$E_\lambda = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda t}} \quad (3-8)$$

حيث E_λ هي طاقة الإشعاع الأحادي طول الموجة، والذي طول موجته λ و C_1 و C_2 ثابتان يتكون البيرومتر شكل (9) ، من تلسكوب به مصباح (s) ذو فتيلة نضاء ببطارية متصلة بمقاومة متغيرة ، لقياس شدة التيار ينظر المجرب من خلال العينية (E) والتي أمامها لوح (F) من الزجاج الأحمر ، الذي يسمح باستقبال لون واحد من الإشعاع. يضبط التلسكوب على المصدر (B) ، المراد إيجاد درجة حرارته باعتباره جسأً أسوداً ، يحرك المصباح داخل أنبوبة التلسكوب حتى يقع خيال (B) على مستوى فتيلة المصباح ، ثم تغير شدة التيار الكهربائي حتى تصبح شدة إضاءة الخيال مساوية لشدة إضاءة الفتيلة ، أي حتى تخفي الفتيلة في ضوء الخيال ، عند ذلك تؤخذ قراءة الأمبير ، ولتدريج البيرومتر تستخدم مصادر حرارية معلومة القيم حتى درجة $1063^\circ C$ يرسم منحنى بياني بين درجة الحرارة ، وقراءة الأمبير لقياس درجات حرارة أعلى من $1063^\circ C$ ، يستخدم قاطع الإشعاع ، بالطريقة نفسها المستخدمة في البيرومتر السابق فإذا كانت (T) هي درجة حرارة المصدر ، T' درجة الحرارة كما يقرأها البيرومتر من المنحنى البياني :

$$\frac{E}{E'} = \frac{2\pi}{\theta} = \exp \left[-\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} \right) \right]$$

$$\ln \frac{2\pi}{\theta} = \frac{C_2}{\lambda} \left[\frac{1}{T'} - \frac{1}{T} \right]$$

ومنها يمكن حساب T حيث $C_2=1.432$



الشكل (٩)

مسائل الفصل الثالث

-1 عرف ما يلي :

1) الطاقة الداخلية ب) درجة الحرارة ج) كمية الحرارة

- 2 اشرح كيف يمكن صنع مقياس ترمومترى - ثم اشرح نوعين من التداريج لهذا المقياس .
- 3 اشرح موضحاً بالرسم الترمومترى الغازى ذو الحجم الثابت
- 4 اشرح موضحاً بالرسم الترمومتر البلاتيني
- 5 ما هو الازدواج الحراري - وكيف يمكن استخدامه كمقياس ترمومترى وما هي أهم مميزاته .
- 6 عدد مميزات الترمومترات الغازية .
- 7 حول درجات الحرارة التالية إلى سلم كلفن :

(1) (- 60 F°) (2) (- 20 F°) (3) (220 F°)

-8 حول درجات الحرارة التالية من الفهرنهيات إلى الدرجة المئوية

(1) (90 F°) (2) (10 F°) (3) (- 50 F°)

-9 حول درجات الحرارة التالية من التدريج المئوي إلى التدرج الفهرنهياتي

(1) (- 200 C°) (2) (- 6 C°) (3) (20 C°)

-10 إذا كانت درجة الحرارة التي ينصدر عندها الذهب هي C^0 1064 ودرجة غليانه C^0 3080 حول هذه الدرجات المئوية إلى الفهرنهيات

-11 إذا كان طولا عمود الزئبق في ساق ترمومتر عند درجة تجمد الماء ودرجة غليانه على الترتيب هما 15 cm و 25cm احسب درجة الحرارة التي يكون فيها طول العمود 22 cm

-12 - ترمومتر بلاتيني مقاومته عند الصفر المئوي وعند درجة غليان الماء هي على الترتيب 200 أوم و 400 أوم. احسب درجة الحرارة التي تجمع مقاومته 300 أوم

-13 - ترمومتر بلاتيني مقاومته 300 أوم عندما يكون في حالة اتزان حراري مع جسم آخر درجة حرارته 1000 سلزيوس ، ما هي مقاومته إذا لامس جسم درجة حرارته 200 سلزيوس

-14 - ترمومتر بلاتيني مقاومته عند درجة الصفر المئوي ودرجة غليان الماء هي على الترتيب 2.56 أوم و 3.56 أوم وضع في وسط درجة حرارته مجهولة فسجل الترمومتر مقاومة مقدارها 6.78 أوم ، أوجد درجة حرارة الوسط؟.

ما هي درجة الحرارة التي يكون لمقاييس سلسليوس و فهرنهايت عندها القيمة العددية نفسها.

15 -
دورة سلسليوس = 3
دورة فهرنهايت = 1

-15 - حول كلاً مما يلي إلى سلم فهرنهايت ورانكين

(- 20 C°) جـ

(5C°) بـ

(30 C°) 1

الفصل الرابع

انتقال الحرارة

4-1 طرق انتقال الحرارة :

تنقل الحرارة من الموضع الساخن إلى الموضع البارد من الجسم ، أو من جسم ساخن إلى مكان آخر بارد ببعض أو كل الطرق التالية :

- أ- التوصيل
- ب- الحمل
- ج- الإشعاع

وتبعاً للنظرية الحركية للجزيئات ، تكون جزيئات المادة دائمة الحركة ، وتزداد هذه الحركة بارتفاع درجة الحرارة ، فإذا كان لدينا ساق معدنية من الحديد ، وسخناها من أحد طرفيها ، تكتسب الجزيئات في هذا الطرف طاقة وتزداد سعة اهتزازها حول مواضعها المتوسطة ، فتصادم مع جاراتها من الجزيئات ، وتكتسبها طاقة تجعلها تهتز بسرعة أكبر مما كانت عليه ، وبتصادم هذه الجزيئات مع ما يجاورها من الجزيئات الأخرى تكتسبها طاقة ، وهكذا ، ومن ذلك نرى أن الحرارة تنتقل من طرف الساق الساخن إلى الطرف البارد عن طريق اهتزاز الجزيئات دون انتقالها من مواضعها المتوسطة ، تسمى هذه العملية بالتوصيل . وهو يحدث في الأجسام الصلبة والسائلة ، والغازية ، ويكون انتقال الحرارة خلال الأجسام الناقلة بواسطة الإلكترونات الحرية داخل المعدن .

أما انتقال الحرارة بالحمل فهو يحدث عن طريق حركة الجزيئات داخل المادة حاملة الطاقة الحرارية معها ، وبتصادم هذه الجزيئات مع الجزيئات الباردة تكتسبها طاقة أكثر مما كانت عليه ، وهكذا فمثلاً إذا سخنا سائلاً في إناء مثلاً فإن جزيئات السائل الملائقة للقاح تسخن أولاً ، ونقل كثافتها أكثر فتصعد إلى أعلى أما الجزيئات الباردة ف تكون كثافتها أكبر فتحتفض إلى أسفل وتسخن بدورها ،

وهكذا تكون تيارات الحمل داخل السائل لا يحدث انتقال الحرارة بالحمل ، إلا في السوائل ، والغازات حيث تكون الجزيئات حرة الحركة .

يلاحظ مما سبق ، انتقال الحرارة بالتوصيل أو بالحمل لا يحدث إلا داخل المادة نفسها ، أي لابد من وسط لكي تنتقل إن فيه الحرارة ، أما انتقال الحرارة بالإشعاع ، فإنه يحدث خارج الجسم الساخن ، ويمكن أن يحدث في الفراغ كما يحدث لانتقال الحرارة من الشمس إلى الأرض ، خلال ملايين الأميال من الفراغ ، يعد انتقال الحرارة بالتوصيل أو بالحمل بطبيعة بالنسبة لانتقال الحرارة بالإشعاع ، لأن سرعة الإشعاع هي سرعة الضوء .

4-2 انتقال الحرارة بالتوصيل :

نفرض أن لدينا شريحة متوازية الوجهين من مادة ما ، وأن ثخانة هذه الشريحة d شكل (1) ومساحة أحد وجهيها ($A m^2$) ، وأن درجة حرارة الوجه الساخن (θ_1) ، ودرجة حرارة الوجه الآخر (θ_2) ، وأن هاتين الدرجتين ثابتتان لا تتغيران مع الزمن حيث ($\theta_2 > \theta_1$)

تنقل الحرارة في هذه الحالة (التي تسمى بالحالة الثابتة) بمعدل ثابت من وجه الشريحة الساخن إلى الوجه البارد عمودية على الوجهين .

كمية الحرارة (جول Q) التي تنتقل في زمن معين (ثانية t) تتناسب مع الزمن (t) ، والمساحة (A) ، فرق درجة الحرارة ($\theta_2 - \theta_1$) ، وعكساً مع السماكة (d) .

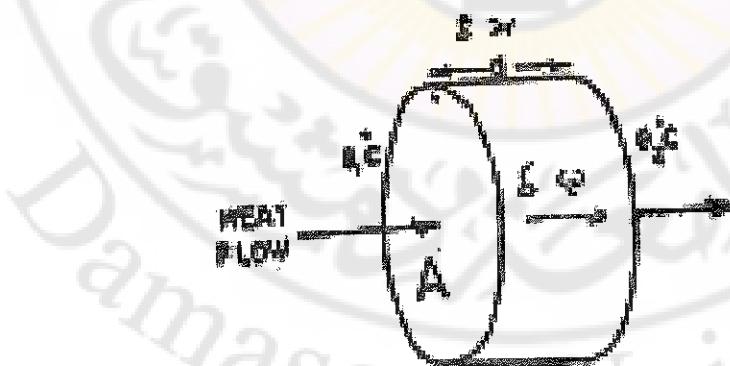
$$Q = KA \frac{\theta_1 - \theta_2}{d} t \quad (4-1)$$

حيث (K) ثابت ، يختلف باختلاف المادة ، ويسمى معامل التوصيل الحراري ويمكن تعريفه كالتالي :

هو كمية الحرارة التي تنتقل بالتوسيط في الثانية الواحدة من (1 m^2) ، من أحد وجهي شريحة متوازية الوجهين ثنايتها (1 m) ، والفرق في درجة الحرارة بين وجهيها (1 K) في الحالة الثابتة ووحدات K هي $\text{W JS}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ أي $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ تسمى الكمية $\frac{\theta_1 - \theta_2}{d}$ بالتدريج الحراري ، وهو عبارة عن النسبة بين فرق درجتي الحرارة ، والبعد بينهما ، فإذا كانت $\delta \theta$ ، هي الفرق في درجتي الحرارة لمساحة قدرها x فإن التدرج الحراري يساوي $\frac{\delta \theta}{\delta x}$ وبذلك يمكن كتابة المعادلة (4-1) كالتالي :

$$\begin{aligned}\frac{dQ}{dt} &= -KA \frac{\delta \theta}{\delta x} \\ \frac{dQ}{dt} &= -KA \frac{d\theta}{dx}\end{aligned}\quad (4-2)$$

والإشارة هنا سالبة ، لأن (θ) تقل كلما زادت (x) ، أي أنهما يتغيران في اتجاهين متعاكسين .



الشكل (1)

4-3 تطبيقات على الحالة العامة لانتقال الحرارة :

أ- معدل انتقال الحرارة خلال مقطع ساق معزولة حرارياً ، وإيجاد توزيع درجات الحرارة على طولها في الحالة المستقرة:

نفرض ساقاً أسطوانيّة منتظمة المقطع ، ومساحة مقطعها A ، وأن درجتي حرارة طرفيها ، بعد الحالة الثابتة هما (θ_1, θ_2) ، حيث $(\theta_1 > \theta_2)$ في الحالـة الثابتـة $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ وبافتراض أن الساق ليس بداخلها أي مصدر حراري ، أي أن $Q' = 0$ ولما كانت الساق معزولة ، فإن الحرارة لا تتسرب من جوانبها إلى الخارج بل تنتقل خلالها في اتجاه واحد فقط من طرفها الساخن إلى طرفها البارد (اتجاه x مثلاً) ، بتطبيق ما سبق تأخذ المعادلة العامة الشكل :

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = 0 \quad (4-3)$$

بتكمال المعادلة (4-3) نحصل على

$$\theta = ax + b \quad (4-4)$$

حيث (a) و (b) ثابتان ولتعيينهما نجري الآتي :

عند

$$x = 0$$

$$\theta = \theta_1$$

إذن

$$\theta_1 = b$$

$$\theta = ax + \theta_1$$

ومنها

$$\text{وعندما } x = L \text{ فإن } \theta = \theta_L \text{ ومنها}$$

$$\theta_2 = aL + \theta_1$$

$$a = -\frac{\theta_1 - \theta_2}{L} \quad (4-5)$$

وتأخذ المعادلة (4-5) الشكل :

$$\theta = \theta_1 - \frac{\theta_1 - \theta_2}{L} x \quad (4-6)$$

لإيجاد معدل انتقال الحرارة خلال مقطع الساق نفضل العلاقة (6) بالنسبة لـ (x)

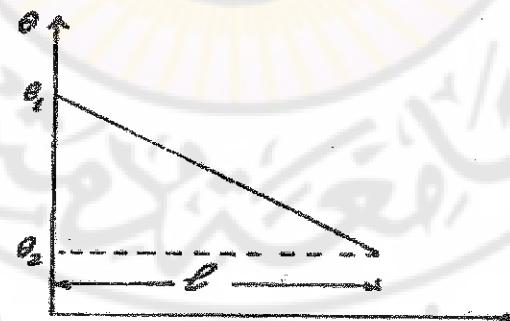
$$\frac{d\theta}{dx} = -\frac{\theta_1 - \theta_2}{L} \quad (4-7)$$

بالت遇ويض من (7-4) في معادلة فوريير لانتقال الحرارة :

$$\frac{dQ}{dt} = KA \frac{\theta_1 - \theta_2}{L} \quad (4-8)$$



الشكل (2)



الشكل (3)

بـ- انتقال الحرارة خلال جدار مكون من طبقتين مختلفتين d_1 و d_2 (المادة الأولى) و d_2 (المادة الثانية)، تنتقل بفرض أن K_1 معامل التوصيل الحراري لمادتها ، K_2 معامل التوصيل الحراري لمادتها ، A مساحة السطح الحرارة بمعدل ثابت خلال الطبقات .

$$\frac{dQ}{dt} = K_1 A \frac{\theta_1 - \theta_2}{d_2} = K_2 A \frac{\theta_2 - \theta_3}{d_1}$$

$$\theta_1 - \theta_2 = -\frac{dt}{K_1} \frac{A}{d}$$

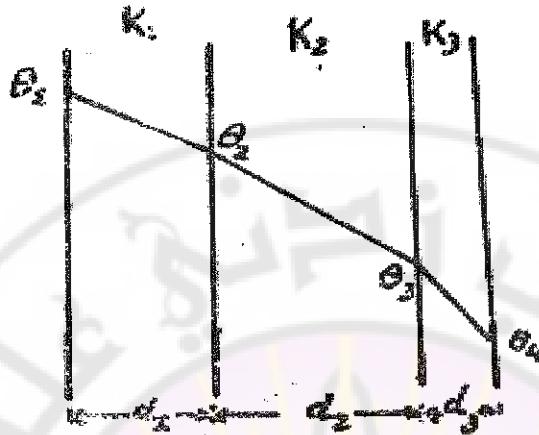
$$\theta_2 - \theta_3 = \frac{dQ}{dt} K_2 \frac{A}{d_2}$$

و بالجمع

$$\theta_1 - \theta_3 = \frac{dQ}{dt} \left[\frac{1}{K_1} \frac{d_1}{A} + \frac{1}{K_2} \frac{d_2}{A} \right]$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\theta_1 - \theta_3}{\frac{1}{K_1} \frac{d_1}{A} + \frac{1}{K_2} \frac{d_2}{A}} \quad (4-9)$$

هذه المعادلة شبيهة بمعادلة قانون أموم في الكهرباء ، حيث $\frac{dQ}{dt}$ تقابل شدة التيار و $(\theta_1 - \theta_3)$ تقابل فرق الجهد ، و $\left(\frac{1}{K}\right)$ تقابل المقاومة النوعية .



الشكل (4)

جـ - انتقال الحرارة خلال جدار كرة جوفاء قطرها الداخلي (r_1) والخارجي هو (r_2) نفرض أن درجة حرارة السطح الداخلي للكرة هو θ_1 ، والخارجي هو θ_2 وذلك في الحالة الثابتة $\theta_2 > \theta_1$ ، بافتراض عنصر كروي من جدار الكرة نصف قطره r وثخانته dr ، بتطبيق قانون فورييه على هذا العنصر يكون:

$$\frac{dQ}{dt} = -K 4\pi r^2 \frac{d\theta}{dr}$$

$$r^2 \frac{d\theta}{dr} = -\frac{\frac{dQ}{dt}}{4\pi K} = a$$

$$d\theta = a \frac{dr}{r^2}$$

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = a \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2}$$

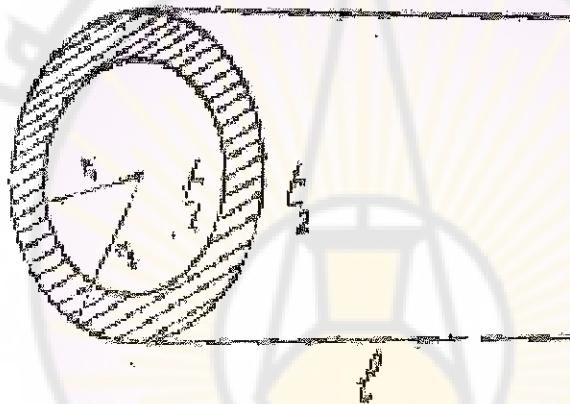
$$\theta_2 - \theta_1 = -a \left[\frac{1}{r} \right]_{r_1}^{r_2}$$

$$\theta_1 - \theta_2 = a \frac{r_1 - r_2}{r_1 r_2}$$

وبالتعويض في قيمة (a)

$$\frac{dQ}{dt} = 4\pi K r_1 r_2 \frac{\theta_1 - \theta_2}{r_2 - r_1}$$

د- انتقال الحرارة خلال جدار أسطواني رقيق:



الشكل (5)

إذا كانت (t_1, t_2) ، هما درجتا حرارة السطحين الداخلي والخارجي للجدار ، بعد الحالة الثابتة وأن (r_2, r_1) ، هما نصفا القطرتين ، (L) طول الأنبوية ، فإن الحرارة تنتقل بمعدل ثابت عمودياً على السطحين وأن :

$$\frac{t_1 - t_2}{r_2 - r_1} = \text{الانحدار الحراري}$$

مساحة السطح هو متوسط مساحة السطحين

$$= 2\pi \frac{r_1 + r_2}{2} L$$

ف تكون كمية الحرارة المنتقلة في الثانية بعد الحالة الثابتة

$$\frac{dQ}{dt} = K \cdot 2\pi \frac{r_1 + r_2}{2} L \frac{t_1 - t_2}{r_2 - r_1} \quad (4-10)$$

حيث (k) معامل التوصيل الحراري لمادة الأنبوية .

هـ- تعين معامل التوصيل الحراري لمادة رديئة التوصيل الحراري على شكل أنبوية مثل أنبوبة زجاج (بغلاف يمر فيه بخار الماء ، يدخل تيار من الماء بمعدل ثابت في الأنبوية ، وتقاس درجة حرارته في المدخل والمخرج بعد الحالة الثابتة .

في هذه الحالة تنتقل الحرارة عمودية على سطحي الأنبوية بمعدل ثابت من السطح الخارجي إلى السطح الداخلي ، وهي تساوي كمية الحرارة التي يكتسبها الماء في الزمن تحاط الأنبوية الزجاجية الشكل 6 نفسه .

فإذا كانت (m) ، كتلة الماء المار في الثانية الواحدة خلال الأنبوية ، (s) الحرارة النوعية للماء ، (θ_2), (θ_1) هما درجتا الحرارة للمدخل والمخرج على الترتيب بعد الحالة الثابتة .

ف تكون كمية الحرارة التي اكتسبها الماء في الثانية الواحدة

$$\frac{dQ}{dt} = ms(\theta_2 - \theta_1) \quad (4-11)$$

فإذا كانت (r_1, r_2) ، هما نصف قطر الأنبوبة الداخلي والخارجي على الترتيب ، وإذا اعتبرنا درجة حرارة البخار $(100 \text{ } ^\circ\text{C})$ ، ومتوسط درجة حرارة السطح الداخلي

$$\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$$

$$\frac{\left(100 - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right)}{r_2 - r_1} = \text{الدرج الحراري}$$

$$\frac{2\pi r_1 L + 2\pi r_2 L}{2} = \text{ومتوسط مساحة سطح الزجاج}$$

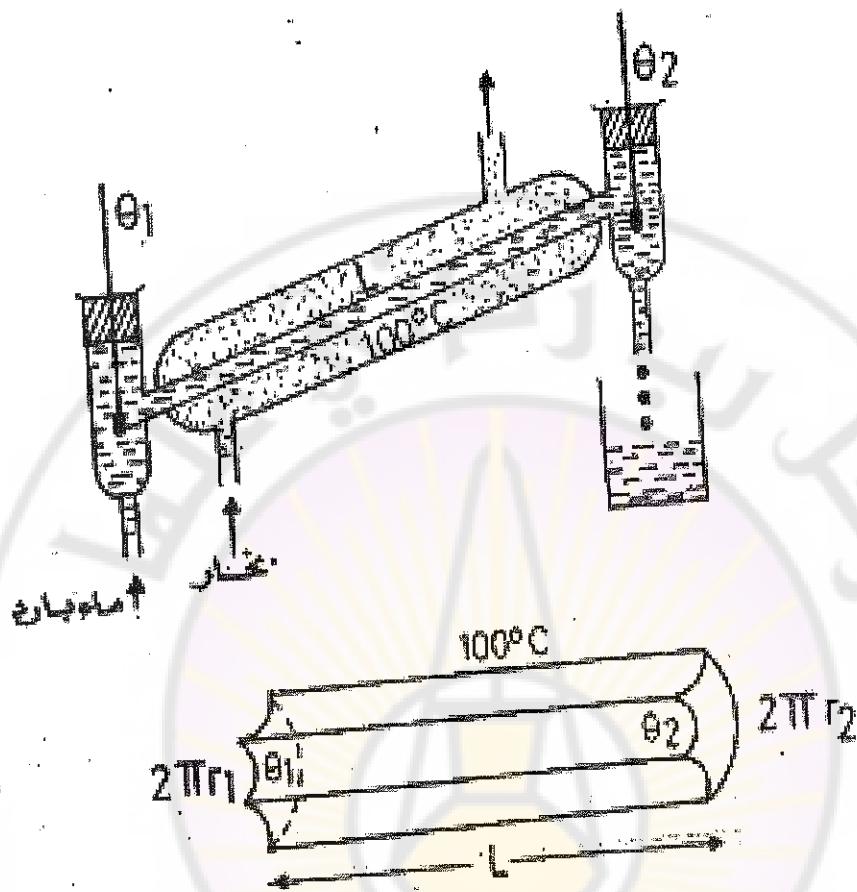
حيث (L) طول الأنابوبة (الجزء الموجود داخل الغلاف)

$$\frac{dQ}{dt} = K \frac{2\pi r_1 L_1 + 2\pi r_2 L_2}{2} \cdot \frac{\left(100 - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right)}{r_2 - r_1} \quad (4-12)$$

ومن المعادلتين $(4-11)$ و $(4-12)$ نجد

$$K\pi L \frac{r_1 + r_2}{r_2 - r_1} \left(100 - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) = ms(\theta_2 - \theta_1) \quad (4-13)$$

ومنها يمكن إيجاد قيمة (K)



الشكل (٦)

جدول (1)

معامل التوصيل الحراري لبعض المواد في درجة الحرارة الغازية

$K_{W=1, K=1}$	المادة	$K_{W=1, K=1}$	المادة
٠٩٥٠	الطوب الحراري	٤٠٥٢٦٦	النحاس
٠١٨٨٤	المطاط	٢٩٢٦	الذهب
٠٦٨٣٦	الإجاج	٢٨٤٥٦	النحاس
٠١٩١٨	الفلز	٢٠٩	الألمونيوم
٢٠٤	اللامة	٢٢٤٤	الرصاص
٠٩٨٥	الجلد	٧٢٥٦	المعدن
٠٤٤١	الخواص	٦٦٣٩	البلاستين

٤- الحمل الحراري

تنقل الحرارة بواسطة الحمل الحراري عن طريق حركة الجزيئات نفسها من الموضع الساخنة إلى الموضع الباردة حاملة الطاقة معها ، وبتصادم هذه الجزيئات مع الجزيئات الأخرى ، تنتشر الحرارة خلال المادة ولا يحدث هذا إلا في الموضع ، والحمل الحراري نوعان :

أ- الحمل الحر

تكون فيه حركة الجزيئات ناتجة عن اختلاف كثافتها

ب- الحمل القسري :

وفيه تجبر الجزيئات على الحركة بأي مؤثر خارجي كمروحة ، أو تفريغ حرقة السائل بجوار الأسطح الصلبة ، تتم بإحدى الطريقتين الآتيتين :

1 - حركة طبقية :

وفيها يمكن تخيل السائل على أنه يتحرك في طبقات ، وبذلك تنشأ مقاومة بين هذه الطبقات نتيجة للاحتكاك الذي تقابله في حركتها بالنسبة إلى بعضها بعضاً، ويلاحظ وجود طبقة رقيقة من السائل ساكنة ملائمة للسطح الصلب ، وتزداد سرعة الطبقات التالية لهذه الطبقة بالتدريج إلى أن تصل إلى سرعة السائل نفسه

2 - حركة اضطرابية :

وفيها لا يتحرك السائل على شكل طبقات ، أو بمعنى آخر يحدث تداخل بين طبقات السائل المختلفة ، وفي هذه الحالة أيضاً تكون هناك طبقة رقيقة ساكنة ملائمة للجدار ، ولكن ثخانتها تكون أقل من ثخانة الطبقة المنشورة في حالة الحركة الطبيعية .

يتم انتقال الحرارة بالحمل بطريق التوصيل الحراري أولاً من السطح الساخن إلى السائل خلال الطبقة الساكنة الملائمة للجدار ، وبالحمل ثانياً خلال السائل نفسه ، وجزء صغير جداً يمكن إهماله بالإشعاع من السطح الساخن إلى جسم السائل .

وعليه فإن معدل انتقال الحرارة من السطح إلى جسم السائل تعطى من العلاقة التالية :

$$\frac{dQ}{dt} = h_c A \Delta \theta \quad (4-14)$$

حيث A مساحة السطح ، $\Delta \theta$ الفرق بين درجتي حرارة السطح وجسم السائل و h_c معامل الحمل الحراري ، ويشمل كلاً من التوصيل خلال الطبقة الرقيقة الملائمة للسطح ، والحمل خلال السائل نفسه وتعريفه هو :

كمية الحرارة المنتقلة خلال وحدة المساحات في وحدة الزمن ، لكل فرق في درجة الحرارة بين السطح ، وبين جسم السائل يساوي درجة واحدة ، وأبعاده $M T^3 K^{-1}$ ووحدته $J m^{-2} S^{-2} K^{-1}$ وتعتمد h_c على عدة عوامل أهمها:

- (1) - شكل السطح (مستو ، منحنى ، كروي ، حلزوني ، أي شكل آخر)
- (2) - وضع السطح (أفقي - شاقولي)
- (3) - نوع المائع (سائل ، غاز)
- (4) - كثافة ، و معامل لزوجة المائع ، وحرارته النوعية ، ومعامل توصيله الحراري .
- (5) سرعة المائع ، ونوع حركته (طبقي أو اضطرابي) .

4 - 5- قانون نيوتن للتبريد :

معدل بروادة جسم (أي النقص الحادث في كمية حرارته في وحدة الزمن) ، يتاسب مع الفرق بين درجة حرارة الجسم ، ودرجة حرارة الوسط المحيط به .
أي أن

$$\frac{dH}{dt} = -K(\theta - \theta_r) \quad (4-15)$$

حيث θ درجة حرارة الجسم في أي لحظة ، θ_r درجة حرارة الوسط ثابت ينوقف على مساحة السطح المعرض من الجسم ، وعلى طبيعة السطح ، تسمى $(\theta - \theta_r)$ بالزيادة في درجة الحرارة ، والقانون أوجده نيوتن من التجارب العملية ، وهو صحيح في حالة الأجسام التي تبرد في تيار من الهواء ، حيث يكون انتقال الحرارة بالحمل أكثر منها بالإشعاع ، ويجب أن تكون الزيادة في درجة الحرارة بسيطة حوالي (30°C) ، وقد دلت التجارب الحديثة على أن القانون يمكن أن يطبق دون أي خطأ يذكر على الأجسام التي تبرد في حيز مغلق .

وحيث أن كمية الحرارة المكتسبة ، أو المفقودة تساوي السعة الحرارية للجسم مضروباً في التغير في درجة حرارته ، فإن قانون نيوتن للتبريد يمكن كتابته كالتالي :

$$W = -\frac{d\theta}{dt} = -K(\theta - \theta_r) \quad (4-16)$$

حيث W السعة الحرارية للجسم ، $\left(\frac{d\theta}{dt} \right)$ معدل التبريد (أي النقص الحادث في درجة حرارته في وحدة الزمن)

4-6 تصحيح التبريد :

عند تسخين جسم ما فإننا نمد هذا الجسم بكمية من الحرارة الكافية لرفع درجة حرارته إلى الدرجة المراد رفعه إليها ، لكن نتيجة لوجود هذا الجسم في وسط ذو درجة حرارة ثابتة ، أقل من درجة حرارة الجسم فإنه تبعاً لقانون نيوتن للتبريد سوف يفقد الجسم كمية من الحرارة الذي أمد بها إلى الوسط المحيط ، والتي تتناسب مع الفرق بين درجة حرارته ، ودرجة حرارة الوسط ، وبالتالي فإن درجة حرارته سوف تصل إلى درجة حرارة عظمى (θ) دون الدرجة المطلوبة بمقدار ($\delta\theta$) ، وهذا المقدار ($\delta\theta$) ، يمثل الخطأ الناشئ عن فقد كمية من الحرارة إلى الوسط الخارجي أثناء إجراء التجربة ، ويسمى مثل هذا المقدار بتصحيح التبريد ، وذلك لأن إضافته إلى الدرجة العظمى (θ) ، التي وصل إليها الجسم يعطي الدرجة العظمى التي كان يجب عليه الوصول إليها ، لو أن الجسم لم يفقد أية حرارة إلى الوسط الخارجي ويمكن تعين تصحيح التبريد ($\delta\theta$) ، وذلك بتسجيل درجة حرارة الجسم مع الزمن أثناء تسخينه ، وعند إيقاف عملية التسخين نستمر في تسجيل درجات الحرارة مع الزمن أثناء تبريد الجسم في نفس الوسط إلى أن تنخفض درجة حرارته بمقدار ($\Delta\theta$) (حوالي من 3 إلى 2 درجة) ، وترسم العلاقة المبينة بالشكل (7) ، البعد (BD) يمثل الفرق بين درجة حرارة الجسم ، ودرجة حرارة الوسط في اللحظة التي تمتلها النقطة (D) ، ومن قانون نيوتن للتبريد :

$$W \frac{d\theta}{dt} = -K \cdot BD \quad ; \quad K' = \frac{K}{W}$$

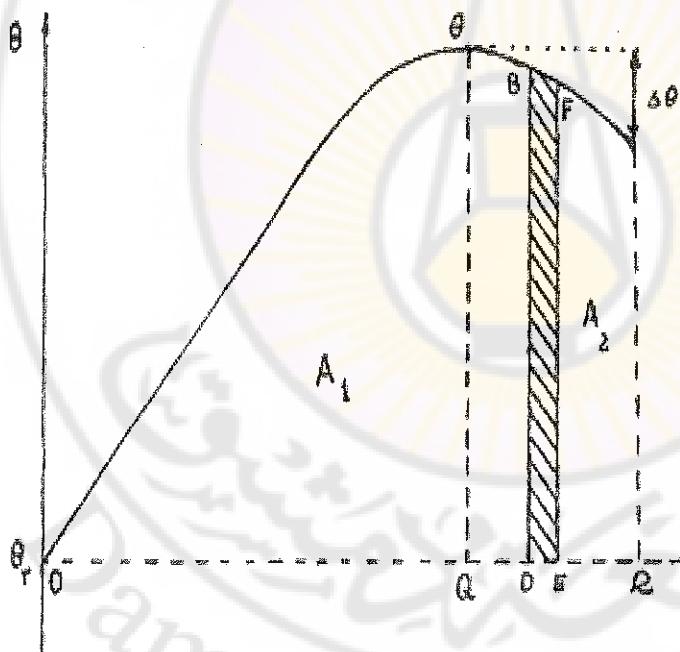
$$d\theta = -K' \cdot BD \cdot dt$$

$$= -K' X \quad (\text{Area BDEF}) = -K' BD \cdot DE$$

أي أن انخفاض درجة الحرارة الناتج عن التبريد في الفترة ΔE (أي dt)، يتناسب مع المساحة (BDEF)، وبالتالي يتضح أن انخفاض درجة الحرارة ($\Delta\theta$) في الفترة (QR) يتناسب مع المساحة (A_2)، كذلك فإن انخفاض درجة الحرارة ($\delta\theta$) في الفترة (OQ) يتناسب مع المساحة (A_1)

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\delta\theta}{\Delta\theta}$$

$$\delta\theta = \Delta\theta \frac{A_1}{A_2} \quad (4-17)$$



الشكل (7)

4-6 الإشعاع الحراري :

الإشعاع الحراري هو انتقال الحرارة خلال الفراغ دون الحاجة إلى وسط مادي ينقلها ، فحرارة الشمس التي تستغرق رحلتها 150 مليون من الكيلومترات ، وأغلبها خلال الفراغ لاتصل إلينا عن طريق التوصيل ، أو الحمل الحراري ، وإنما عن طريق الإشعاع ، هذا الإشعاع عبارة عن موجات كهرومغناطيسية تسير بسرعة الضوء ، ولها القدرة على النفاذ خلال الفراغ .

وعندما تسقط على سطح ما فإنها تتصدى ، وبالتالي فإن طاقة حرارية تنتقل إلى الجسم الماس .

كل جسم وفي أي درجة حرارة يشع سطحه موجات كهرومغناطيسية ، في نفس الوقت يمتص الموجات الساقطة عليه ، وطول هذه الموجات يعتمد على طبيعة سطح الجسم ، وعلى درجة حرارته ، ففي درجة الحرارة المنخفضة يكون معدل طاقة الإشعاع الصادرة ضعيفة ، وبالتالي فإن طول الموجات الكهرومغناطيسية يكون طويلاً ، وعندما ترتفع درجة حرارة الجسم يرتفع معدل طاقة الإشعاع الصادر بسرعة كبيرة جداً تتناسب مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة للجسم ، أي تتناسب طردياً مع T^4 ، وقد ثبتت التجارب المخبرية أن معدل طاقة الإشعاع الصادرة من سطح تتناسب أيضاً مع مساحته A كما أنها تعتمد على طبيعة السطح حيث يعبر عن هذه الحقيقة ثابت ليس له أبعاد ، وهو (ϵ) وقيمة تكون بين الصفر والواحد ونستطيع أن نلخص ما سبق في معادلة تعبّر عن معدل طاقة الإشعاع الصادر وهي

$$R_e = \sigma \epsilon A T_e^4$$

حيث R_e معدل طاقة الإشعاع الصادر ووحداتها (W) (و(σ) ثابت فيزيائي يسمى ثابت ستيفان بولتزمان، وقيمه تساوي تقريباً

$$5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^4$$

الثابت (ε) يصف خاصية السطح المشع ، ويسمى معامل الإصدار .
ويكون في العادة كبيراً للسطح القائم اللون والخشن ، وصغيراً للسطح الفاتح اللون والأملس . فالجسم الذي له أعلى إصدار أي أن ($\epsilon = 1$) ، يسمى جسمًا معتماً ، لأنه يمتص جميع الأشعة الساقطة عليه .

أما الجسم الذي له أدنى إصدار أي ($\epsilon = 0$) فإنه يسمى عاكساً مثالياً ، لأنه لا يمتص أيًّا من الأشعة الساقطة عليه .

الجسم الذي له إصدار عالٍ يكون ماصاً جيداً ، وبالتالي فإنه جيد الإشعاع ، والجسم الذي يكون إصداره صغيراً ، فإنه يكون ماصاً رديئاً ، وبالتالي فإنه رديء الإشعاع ، والجسم كما يشع في أي درجة حرارة فإنه يمتص أيضاً ، فإذا وضع جسم في درجة حرارة (T_e) قرب حائط مثلاً - في درجة حرارة (T_a) فإنه سيمتص الإشعاع الصادر عن الحائط بمعدل :

$$R_a = \sigma \epsilon A T_a^4$$

فإذا كانت درجة الحرارة أعلى من درجة حرارة الحائط ، أي أن ($T_e > T_a$) ، فإن معدل الإشعاع الم澈في الصادر عن الجسم يكون

$$\begin{aligned} R &= R_e - R_a \\ R &= \sigma \epsilon A (T_e^4 - T_a^4) \end{aligned} \quad (4-18)$$

أما إذا كان الجسم أبرد من الحائط أي ($T_e < T_a$) ، فإن الجسم سيمتص إشعاعاً بنفس المعدل في المعادلة (4-18)

4-7 قوة امتصاص السطح للحرارة

تعرف قوة امتصاص السطح للحرارة ، بأنها نسبة كمية الإشعاع الحراري الذي تمنشه وحدة السطوح من السطح في الثانية الواحدة إلى كمية الإشعاع الساقط على نفس المساحة في نفس الوقت ، وقد وجد أن قوة إصدار أي سطح للإشعاع الحراري تساوي قوة امتصاصه لهذا الإشعاع

8-4 قوة إشعاع السطح للحرارة :

تعرف قوة إشعاع أي سطح للحرارة ، بأنها نسبة كمية الحرارة الصادرة عن وحدة السطوح من السطح في واحدة الزمن إلى كمية الحرارة التي تشعها وحدة السطوح من سطح الجسم الأسود المثالي في واحدة الزمن وفي نفس الظروف .

4-9 قانون ستيفان :

في سنة 1879م اقترح ستيفان أن الإشعاع الكلي الصادر من أي جسم ، يتناسب مع القوة الرابعة لدرجة حرارته المطلقة ، وكان هذا الاقتراح مبنياً على النتائج التي توصل إليها تندال من قياس معدل إصدار الحرارة بالإشعاع من ساك ساخن من البلاتين ، وفي سنة 1884م تمكن بولتزمان من إثبات قانون ستيفان نظرياً من قوانين الديناميكا الحرارية . ووجد أن القانون لا ينطبق إلا على الأجسام السوداء المثالية . وسمى القانون بعد ذلك ، بقانون ستيفان و بولتزمان وهو في صيغته الرياضية

$$E = \sigma T^4 \quad (4-19)$$

حيث E هي الطاقة الكلية للإشعاع الصادر في الثانية الواحدة من (1m^2) من جسم أسود في درجة حرارة مطلقة قدرها (T) ، (σ) ثابت يسمى ثابت ستيفان

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

وعند استخدام القانون يجب الأخذ بعين الاعتبار الإشعاع الذي يمتصه الجسم من الوسط المحيط به .

فإذا وضع جسم درجة حرارته (TK^0) في وسط درجة حرارته ($T_0 K^0$) فإن الطاقة الصادرة من (1m^2) في الثانية هي :

$$E = \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (4-20)$$

4-10 الجسم الأسود المثالي :

هو السطح الذي يمتص كل الطاقة الساقطة عليه من الخارج ، ويشع كل الطاقة الساقطة عليه من الداخل إلى الوسط الخارجي ، وعليه فإنه في حالة الجسم الأسود لا تعتمد الطاقة المنبعثة من سطحه على نوع السطح ، بل تعتمد على درجة حرارة الجسم .

وفي الطبيعة لا توجد أجسام سوداء مثالية ، ولكن يمكن صنع مثل هذه الأجسام عملياً .

مثال (1)

كرة من النحاس نصف قطرها (5 cm) محاطة بكرة أخرى متحدة معها في المركز ، نصف قطرها (10 cm) ، فإذا ملء الفراغ بينهما بمادة عازلة ، وسخنـت الـكرة الداخـلـية كـهـربـائـيـاً بمـعـدـلـ قـدرـه (10 W) فإن فرقـاً في درـجـةـ الحرـارـة قـدرـه (55 K⁰) ينشأ بين سطحيـ الكرـتين ، فـما هو مـعـامـلـ التـوـصـيلـ الحرـاري للمادة العازلة .

الحل

كمية الحرارة التي تنتقل في الثانية الواحدة بين كرتين متحدين بالمركز هي : الحالـةـ الثـابـتـةـ هي :

$$\frac{dQ}{dt} = 4\pi Kr_1 r_2 \frac{\theta_1 - \theta_2}{r_2 - r_1}$$

$$\frac{dQ}{dt} = 10 \text{ W}$$

$$10 = (4)(314)K.5.10^{-3} \cdot 10.10^2 \frac{55}{5 \times 10^{-2}}$$

$$K=0,111$$

مثال (2) :

أنبوبة طولها (3m) ونصف قطرها الخارجي (15.10^{-3} m) غطيت بطبقة من عازل سمكها (24.10^{-3} m) وكانت درجة حرارة السطح الخارجي للعزل (588K^0) وكانت درجة حرارة الهواء المحيط (295K^0) ، فما هو معدل فقدان الحرارة بالإشعاع من الأنبوبة = 0.94×10^{-3}

الحل

$$2\pi(15.10^{-3} + 24.10^{-3}) \times 3 = 0.164 \text{ m}^2$$

$$Q = \epsilon\sigma A(T_1^4 - T_2^4)$$

$$Q = 0.94 \cdot 5.672 \cdot 10^{-8} [(588)^4 - (295)^4]$$

$$Q = 5900 \text{ W}$$

4-11 درجة حرارة سطح الشمس :

إذا اعتبرنا أن الشمس جسم أسود ، يمكن استنتاج درجة حرارة سطحها المنظور ، باستخدام قانون ستيفان كالتالي :

إذا كانت (R) نصف قطر الشمس ، (T) درجة الحرارة المطلقة لسطحها ، فإن الطاقة الحرارية التي يفقدها السطح في الثانية هي $= 4\pi R^2 \sigma T^4 \text{ Watt}$
وإذا كانت (x) هي البعد بين الشمس والأرض ، فإن هذه الطاقة تتوزع على سطح كرة نصف قطرها (x) ، على مساحة $= 4\pi x^2$ أي أن الطاقة الساقطة على (1 m^2) ، من الأرض في الثانية الواحدة هي :

$$S = \frac{4\pi R^2 \sigma T^4}{4\pi x^2} \quad \text{W m}^{-2}$$

وتسمى (S) ، بالثابت الشمسي ويمكن قياسه بتجميع أشعة الشمس داخل غلاف أسود من ثقب صغير في الغلاف ، ومعلوم مساحته ، تفاصي كمية الحرارة المكتسبة بوضع هذا الغلاف في مسرع له مكافئ مائي معلوم . وقد وجد أن (S)

لها قيمة متوسطة تساوي (1351 W.m^{-2}) ، أي أن الأرض تستقبل في المتوسط **1350 جول على كل متر مربع في الثانية** .

تتغير هذه القيمة مع البقع الشمسية في دورة قدرها **11 سنة** ، بالتعويض في المعادلة السابقة باعتبار أن

$$R = 6.93.10^8 \text{ m}$$

$$x = 14.94.10^{10} \text{ m}$$

$$\sigma = 5.67.10^{-8} \text{ Wm}^{-2} K^{-4}$$

$$1350 = \frac{(6.93.10^8)^2 \cdot (5.67.10^{-8}) T^{-4}}{(1494.10^{10})^2}$$

$$T = 5770 \text{ K}$$

هذه النتيجة أقل من الحقيقة لأن الشمس لا تشع كجسم أسود مثالي ، لذا يجب أن تكون درجة حرارتها أعلى من الجسم الأسود الذي يشع بنفس الشدة ، كما أن درجة حرارة باطن الشمس أعلى من هذا بكثير ، ومن المعروف أن الشمس تستمد حرارتها من التفاعلات النووية التي تنشأ بداخلها ، وعلى هذا الأساس تمكّن جينز من حساب درجة حرارة باطن الشمس ، وقدرها بحوالي 10^7 درجة مطلقة .

باستخدام قيمة الثابت الشمسي ، يمكن البرهنة أن نصيب الكرة الأرضية من طاقة الشمس مقدار كبير جداً يقدر بحوالي **230 مليون حصان في الثانية** أما إنتاج الشمس من الطاقة فهو أكبر بنحو **200 مليون مرة أو ما يعادل $4.6 \cdot 10^{23}$ حصان في الثانية** .

يمكن حساب درجة حرارة الشمسي باستخدام معادلة (فين)

$$\lambda_m T = 0.00293 \text{ mK}$$

وبما أن $m = 49.10^{-8} \text{ m}$ طول الموجة الذي يوافق النظرية العظمى للتتابع لأقصى طاقة في الإشعاع الشمسي

$$49.10^{-8} m T = 0.00293$$

$$T = 5970 \text{ K}$$

ويلاحظ أن هذه القيمة تتفق إلى حد ما مع القيمة المحسوبة باستخدام معادلة ستيفان

4-12 تأثيرات الحرارة في الأحياء

الكائنات الحية في تفاعل حراري دائم ، ومستمر مع بيئتها ، والتوازن الحراري البيئي على سطح الأرض تحفظه الشمس كل يوم ، وتمده بقدرة تعادل $(1.4 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2)$ ، ومعظم الأحياء تحافظ على درجة حرارة معينة ثابتة ، وذلك عن طريق تنظيمها للطاقة الإستقلابية التي تنتجهما ، يعرف معدل الإستقلاب الأساسي ، على أنه كمية الحرارة التي ينتجها الجسم عندما يكون الجسم في حالة راحة .

فأعضاء الإنسان تعمل بطاقة أقل من معدل الإستقلاب الأساسي ، بينما عندما يقوم الإنسان بعمل شاق ، فإن أعضاءه تعمل بطاقة أكبر من الإستقلاب الأساسي . التغير في درجة حرارة الجسم الحي يمكن أن يغير شكل بروتيناته ، فإذا كان هذا التغير كبيراً ، فإن البروتينات قد تعجز عن القيام بوظائفها الحيوية والحفاظ على درجة حرارة ثابتة ، فإن الجسم يستخدم آلياته المتعددة ليعوض الحرارة المفقودة ، فعندما تكون درجة حرارة البيئة عالية ، أو يكون معدل الإستقلاب عالياً ، فإن الجسم يعوض ذلك بزيادة كمية الحرارة المفقودة وذلك عن طريق توسيع الأوعية الدموية ، وتخيير العرق من على سطح الجسم ، أما عندما تكون درجة الحرارة منخفضة ، فإن الجسم يعمل على تقليل كمية الدم المتداولة لسطح الجلد ، لإنقاص كمية الحرارة المفقودة .

أ- أثر درجة حرارة الوسط على الجسم

يؤدي تعرض الجسم البشري إلى أجواء ذات درجات حرارة ، ورطوبة عالية إلى ارتفاع درجة حرارته إلى درجات عالية ، لا تفلح عندها وسائله المختلفة - توسيع الأوردة والشرايين والتعرق وخفض إنتاج الطاقة الحرارية ، والتغير في

السلوك ، مثل شرب الماء والتخفيف من الملابس ، أو التحرك إلى مكان بارد - في خضها ، مما يؤدي إلى إجهاد هائل على القلب يجعله يعمل بمقدار أربع مرات عن الحالة العادية ، وبالتالي يزداد معدل التنفس ، فيصل إلى 50 مرة في الدقيقة ، ويصاب الجسم في هذه الحالة بما يسمى ضربة الشمس ، ومما يجدر ذكره أن زيادة درجة الحرارة بمقدار درجة مئوية واحدة ، يؤدي إلى زيادة استهلاك الأوكسجين بمقدار (13%) ، تشكل ضربة الشمس خطراً كبيراً على حياة الإنسان بشكل عام وتؤدي إلى الوفاة ، ولكنها تشكل خطراً أكبر على حياة كبار السن ، لعدم قدرة أجهزة الجسم على العمل بكفاءة ، كما أنها تشكل خطراً على حياة الأفراد الذين يعانون من الأمراض والجفاف ، وكذلك الذين يتعاطون أدوية من شأنها تعطيل أجهزة الجسم التي تحكم في الاتزان الحراري .

أما البرودة الشديدة ، فتعد أيضاً خطراً كبيراً على حياة الإنسان وتؤدي إلى الوفاة إذا لم يسعف المريض بسرعة .

إن البرد الشديد يؤدي إلى تلف أنسجة الجسم نتيجة تعرضها للتجمد وتسرب فقدان في الإحساس وبياض أو اصفرار عند نهايات الأطراف ، مثل أصابع الأيدي والأرجل ، وشحمة الأذن ، ومقدمة الأنف ، يجب الحصول على مساعدة طبية عند حدوث هذه الأعراض ، كما يجب عدم تدفئة هذه النهايات أثناء انتظار المساعدة الطبية ، لأن تدفئة الأطراف ، يدفع الدم البارد إلى القلب ، والذي بدوره يؤدي إلى تعطله عن العمل وموت المريض ، وإذا ظهرت على المريض أعراض بروادة الجسم الشديد ، يجب أولاً تدفئة قلب الجسم قبل الأطراف ، وتمثل أعراض البرودة الشديدة في الارتعاش غير المنتظم ، وقد الذكرة ، وعدم القدرة على التوازن ، والكلام غير المفهوم وال الخمول ، والتعب الشديد .

4-13 العلاج الحراري :

يمكن استخدام الأمواج الميكروية والراديوية ذات الترددات المنخفضة - من المدى 500 كيلوهرتز إلى 2500 ميجا赫تز للأغراض الطبية والعلاجية ،

وتتلخص الفاعلية العلاجية والطبية والحيوية للموجات الراديوية والدقيقة عند التردد المذكور على اعتبار أنها قادرة نادراً على التوغل داخل الأنسجة الحية كجسم الإنسان،

ورفع درجة حرارة المحيط (الوسط) المحصور في مجال سقوطها فقط، - ويشيع طيباً - استخدام الترددات المذكورة لأغراض العلاج الحراري ، ويمكن استخدام هذه التقنية الطبية الحديثة في الاستفادة من هذا التسخين ، والإحماء للوسط المحيط بغرض التخفيف من آلام العضلات والتهاب العظام ، والأغراض الأخرى التي يكون فيها التسخين للأنسجة الداخلية مفيداً .

ومما يجدر ذكره أهم خاصية للموجات الدقيقة تتحقق في إشارة جزيئات الماء - كما في أفران الميكرويف - باختيار التردد المناسب لهذه الموجات ليتطابق مع الطاقة اللازمة لإثارة جزيء الماء في الوسط ، وبالتالي تتم عملية الامتصاص بحدتها الأقصى لإحداث عملية التسخين ، ومن أهم المجالات الطبية والحيوية للموجات الدقيقة ما يلي :

١- العلاج الطبيعي :

تعتمد تقنية العلاج الطبيعي بالموجات الدقيقة والموجات الراديوية ، على الاستفادة من خاصية التسخين المرافق لامتصاصها ، حيث تستخدم بواسطة أخصائي العلاج الطبيعي لتدفئة ، وتسخين الأنسجة العميقة، وفي نفس الوقت يتم التحكم والسيطرة على درجة الحرارة الخارجية ، وتعتبر هذه الطريقة بديل ناجح للتقنية الصينية القديمة المعروفة بالوخز بالإبر .

٢- عمليات البالون الميكروية

أثبتت تقنية عمليات البالون الميكروية نجاحها في الحد من حدوث المشاكل التي عادة ما تعقب عمليات قسطرة البالون التقليدية

3- تسخين أحواض التعقيم

يمكن تعليم الأجهزة الطبية وغيرها عن طريق الأمواج الميكروية بدلاً من التعقيم بالطرق التقليدية - أفران حرارية وغيرها - حيث تعد هذه الطريقة قادرة على تأمين مصدر حراري آمن يسهل التحكم فيه والسيطرة عليه دون أدنى درجة من التلوث .

4- إتلاف الخلايا السرطانية :

تعتمد تقنية إتلاف الخلايا السرطانية بالتسخين ، المعروفة بالهابيرثيرمي ، على التسخين المحدود والمقيد في مكان محدد ، كموقع الخلايا السرطانية ، مما يسهل من مهمة القضاء عليها دون إتلاف خلايا الوسط المحيط بها ، وقد تم حديثاً تطوير هذه التقنية بشكل كبير باستخدام تقنية علاج التخثر بالميكرويف.

5- مجالات طبية أخرى

يمكن استخدام التسخين بالموجات الميكروية والراديوية في المجالات الآتية :

- 1- تقنية تسخين وتدفئة الدم في الدورة الدموية أثناء إجراء العمليات الجراحية
- 2- إذابة عينات كريات الدم الحمراء المجمدة عادة عند درجة حرارة $(65- C^{\circ})$ ، بدلاً من استخدام التقنية التقليدية (حمام ماء دافئ) والتي عادة ما تكون بطيئة ، وغير مأمونة المخاطر من التلوث
- 3- جراحة وعلاج القلب بالتسخين ، وانسداد الشرايين
- 4- جراحة الأنف والأذن والحنجرة حيث يتم استخدام هذه التقنية لعلاج احتباس الهواء المسؤول عن حالات الشخير
- 5- جراحة المسالك البولية ، لمعالجة انسداد القناة البولية ، واحتباس البول ولكن على الرغم من التطبيقات المذكورة للموجات الدقيقة والراديوية ، إلا أنها لا تخلو من بعض المخاطر نتيجة للتأثير الحراري ، و التسخيني التي تحدثه في الوسط

4-14 التصوير الحراري :

الموجات الصوتية هي موجات ميكانيكية ، تنشأ عن اهتزاز المواد ، مما ينتج عنه زيادة أو نقص الضغط في المائع المحيط بمصدر هذه الموجات ، ويسبب هذا التغير في الضغط انتشار هذه الموجات طولياً ، أي أنها تنتشر في نفس اتجاه زيادة ونقص الضغط .

تتميز الموجات الصوتية كغيرها من الموجات ، بخواص محددة مثل الطول الموجي (λ) وعدد مرات نبذتها في الثانية ، وهو ما يطلق عليه التردد (f) الذي يقاس بوحدة الهرتز HZ (نبذة لكل ثانية) ، بجانب ذلك فإن هذه الموجات لها سرعة انتشار (V) حيث ترتبط هذه الخواص ببعضها البعض حسب المعادلة التالية

$$(V = \lambda f)$$

أقسام الموجات الصوتية

-1 الموجات تحت السمعية

-2 الموجات السمعية

-3 الموجات فوق السمعية

ما يهمنا هو الموجات فوق السمعية ، وهي موجات يزيد تردداتها على 20 ألف هرتز ، وتتميز هذه الموجات بأن ترددتها أكثر من المدى المسموع بواسطة الأذن ، ولذلك لا نستطيع استقبالها ، و يطلق على هذا النوع تجاوزاً للموجات فوق الصوتية ، وهو خطأ شائع

14-1 طرق الاستخدام

نوجد عدة طرق لاستخدام الموجات فوق السمعية ، في مسح أعضاء الجسم المختلفة منها ما يلي :

١- طرق المسح المطالي (A-scan)

وتطبق للحصول على معلومات تشخيصية عن عمق الأجسام الغريبة الموجودة في الجسم ، أو أبعاد مكونات العضو ، فمثلاً إذا طبقت هذه الطريقة على العين ، فإنه يمكن إيجاد المسافات بين القرنية والعدسة والشبكة ، وأيضاً تحديد الأجسام الغريبة في العين ، وعندما تنتشر هذه الموجات داخل العين ، فإن جزءاً منها يرتد عند وجود أي حد فاصل داخل نسيج العين ، ومن حساب زمن الارتداد يمكن إيجاد العمق أو البعد ، وذلك بمعرفة سرعة هذه الموجات داخل الوسط .

٢- طرق المسح الطولي (B-scan)

وتشتمل لإيجاد صورة العضو في بعدين ، وهي تختلف عن طرق المسح (A) في أن المحول يتتحرك ، ولذا يقوم بمسح شامل للعضو ، وإذا كان الجهاز مزود بحاسب ، فإنه يقوم بتجميع الموجات المرتدة على هيئة صورة ثنائية الأبعاد ، ومع التقدم المذهل في برامج الحاسوب ، أمكن الحصول على صورة ملونة ثلاثية الأبعاد.

٣- طرق مسح الحركة (M-scan)

وتجمع هذه الطريقة بين الطريقتين السابقتين (A) و (B) ، وفيها يكون المحول ثابت ، والعضو هو الذي يتتحرك مثل حركة القلب وصماماته

٤- تأثير دوبلر

ويستخدم لقياس سرعة تحرك الأشياء مثل قياس سرعة الدم أو ضربات قلب طفل في رحم الأم ، ويأتي مصطلح دوبلر نسبة إلى مكتشفه ، وتعتمد الفكرة الأساسية لتأثير دوبلر معروفة منذ القدم - على أنه إذا اقترب شخص من مصدر صوتي تحدث زيادة ظاهرية لتردد الصوت الذي يستقبله ، أما إذا ابتعد عن المصدر فيحدث انخفاض ظاهري للتردد الذي يستقبله .

الجدير بالذكر أن قياس سرعة تحرك الأشياء باستخدام تأثير دوبلر ليس مقتصرة على استخدام الموجات فوق السمعية ، ولكن يمكن استخدام أي نوع آخر من الموجات الكهرومغناطيسية ، مثل الموجات القصيرة ، والموجات الميكروية ، والأشعة تحت الحمراء ، وأشعة الليزر .

مسائل الفصل الرابع

1- استنتاج معدل الزيادة في سمك الجليد على سطح بحيرة تحت تأثير
الظروف الآتية :

درجة حرارة الماء في البحيرة (0°C)

درجة حرارة الهواء (-12°C)

سمك طبقة الجليد (0.03 cm)

معامل التوصيل الحراري للجليد ($2.1\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$)

كتافة الجليد (920 Kg m^{-3})

الحرارة الكامنة لانصهار الجليد ($3.3 \cdot 10^5\text{ J Kg}^{-1}$)

والمطلوب :

1- ما هو الزمن اللازم لزيادة سمك الجليد بمقدار (1 mm)

2- ما هو المعدل عندما يتضاعف سمك الجليد

2- كرة من النحاس كتلتها (0.1 Kg) علقت بواسطة سلك من النحاس ، قطره (1.2 mm) وطوله (0.08 m) في وسط إناء مفرغ ، فإذا أهملت كمية الحرارة
التي تفقد بالإشعاع ، وثبت طرف السلك عند درجة حرارة (15°C) ، فما هو
معدل التغير في درجة حرارة الكرة عندما تكون درجة حرارتها (80°C) ، إذا
علم أن الحرارة النوعية للنحاس ($390\text{ J Kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$) وأن معامل التوصيل
الحراري للنحاس ($400\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$)

3- خزان مكعب الشكل مليء بماء في درجة حرارة (90°C) ، تم عزله تماماً
بمادة عازلة ، معامل التوصيل الحراري لمادتها ($6.4 \cdot 10^{-2}\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$) ،
إذا كان طول ضلع المكعب هو (1 m) وسمك الطبقة العازلة هو

، فاحسب معدل انتقال الحرارة خلال طبقة المادة العازلة ، إذا

كانت درجة حرارة السطح الخارجي للعزل هي $(40C^0)$

- 4- جدار يتكون من طبقتين من الخشب ، سمك كل منها (3 cm) بينهما طبقة

من مادة عازلة سماكتها (0.01 m) ، ما هو معدل انتقال الحرارة خلال وحدة

المساحات من هذا الجدار ، إذا كانت درجتي حرارة وجهي الجدار هما

$(0C^0)$ و $(20C^0)$ ، علماً بأن معامل التوصيل الحراري للخشب هو

$(2.4\text{ W m}^{-1} K^{-1})$ ، و معامل التوصيل الحراري للمادة العازلة هو

$(0.24\text{ W m}^{-1} K^{-1})$

- 5- أنبوبة أسطوانية من النحاس قطرها الداخلي (0.075 m) والخارجي

(0.080 m) يمر بها ماء متوسط درجة حرارته $(70C^0)$ غطيت هذه

الأنبوبة بطبقة من مادة عازلة سماكتها (1 cm) ومعامل توصيلها الحراري

$(0.4\text{ W m}^{-1} K^{-1})$ وكان معدل فقدان الحرارة من سطحها الخارجي

$(20W\text{ m}^{-1})$ لكل درجة أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط ، احسب

درجة حرارة السطح الخارجي للعزل ومعدل فقدان الطاقة الحرارية من

سطح متر طولي من الأنبوة إذا علمت أن متوسط درجة حرارة الوسط

المحيط $(16C^0)$

- 6- وضع جسم في وعاء مفرغ محاط بجليد مجروش في درجة حرارة

$(0C^0)$ ، فإذا كانت درجة الحرارة الابتدائية لهذا الجسم $(300C^0)$ وبيرد

داخل الوعاء بمعدل $(0.35C^0 S^{-1})$ ، احسب ثابت ستيفان إذا علم أن كتلة

الجسم (0.32 Kg) وحرارته النوعية هي $(420\text{ J Kg}^{-1} K^{-1})$ ومساحة

سطحه $(8cm^2)$ ويمكن اعتباره جسماً أسود .

- 7- احسب القدرة التي تفقد من سطح كرة قطرها (10^{-2} m) و ابعاذه سطحها

(0.6) إذا علقت في حيز درجة حرارته $(300K^0)$ وثبتت درجة حرارتها

بواسطة سخان كهربائي عند درجة حرارة $(500K^0)$ علماً بأن ثابت ستيفان

هو $(5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4})$ وأن الحرارة المنتقلة بالتوسيط خلال سلك التعليق يمكن إهمالها.

-8 أنبوبة طولها متر مصنوعة من مادة عازلة معامل التوصيل الحراري لمادتها هو $(0.005 \text{ Jm}^{-1} \text{ S}^{-1} \text{ }^0\text{K}^{-1})$ فإذا كان نصف قطرها الداخلي والخارجي هما $(2 \text{ cm}, 3 \text{ cm})$ على الترتيب وكانت درجة حرارة السطح الداخلي والخارجي $(227\text{ }^0\text{C}, 127\text{ }^0\text{C})$ على الترتيب ودرجة حرارة الوسط الموجودة فيه $(27\text{ }^0\text{C})$ ، احسب كمية الحرارة المنتقلة بالتوسيط خلال جدارها في الساعة؟ وإذا كانت الحرارة المفقودة بالإشعاع تساوي (0.06) من كمية الحرارة المنتقلة بالتوسيط ، احسب معامل إصدار السطح الخارجي .



الفصل الخامس

الحركة الموجية والصوت

1-5 المقدمة :

إذا أثرت قوة خارجية لحظية في جسم تبدأ الجزيئات التي تقع تحت تأثيرها المباشر، في التحرك حركة اهتزازية حول مراكز اتزانها ، ثم تنتقل الحركة منها إلى ما يليها من الجزيئات وهكذا .

ت تكون من الحركة المتتالية لهذه الجزيئات دفعة اضطراب تنتقل خلال الجسم ، ويتخذ مثل هذا الاضطراب أشكالاً متعددة داخل الجسم تبعاً لطبيعة الجسم واتجاه القوى التي تحدث الاضطراب الذي يسمى عادة بالحركة الموجية . وأهم الموجات الجاذبة نوعان هما :

1- الموجة العرضية :

إذا كان اتجاه حركة جسيمات المادة الحاملة للموجة عمودياً على جهة حركة الموجة نفسها فإن الموجة تسمى موجة عرضية . مثال على ذلك حبل مثبت من طرف واحد بينما يندفع طرفه الآخر إلى أعلى ثم إلى أسفل في حركة اهتزازية في هذه الحالة ينتقل الاضطراب خلال الحبل بينما تهتز جسيمات الحبل في حركة توافقية بسيطة في اتجاه عمودي على جهة انتشار الاضطراب .

ومن أمثلة الموجات العرضية موجات الضوء وهي موجات كهرمغناطيسية فيها الحقلان المغناطيسي والكهربائي عموديان على جهة انتشار الموجة

2- الموجات الطولية :

تهتز جسيمات المادة فيها بجهة انتشار الموجة مثال على ذلك اهتزاز حلقات النابض في جهة حركة الموجة

5- الجانب الذاتي للصوت :

من "الذاتية"
العزمية

هناك سؤال يطرح نفسه دائمًا : إذا حدث انفجار هائل في صحراء شاسعة ولم تكن هناك أذن تسمع الانفجار فهل هناك صوت ؟ للإجابة عن هذا السؤال نقول طبعاً إن هناك صوتاً ، ولكن عدم سماع ذلك الصوت لا يعني عدم وجوده بل عدم وصوله إلى السامع . و من هنا تظهر أهمية تعريف الصوت .

فمن وجهة نظر الفيزياء ما نطلق عليه كلمة (صوت) ما هو إلا سلسلة من التابعات السريعة لتضاغطات وتخلافات متالية في الهواء .

أما من وجهة النظر الفيزيولوجية فإن ما نطلق عليه كلمة (صوت) هو الإحساس بالسمع الناتج من دخول التتابعات السريعة لتضاغطات وتخلافات في الهواء إلى الأذن البشرية .

والموجات السمعية تقتصر على مدى التردد الذي يمكنه أن يهيئ الأذن البشرية والمخ للإحساس بالسمع ، ويمتد هذا المدى من حوالي 20 هرتز إلى حوالي 20000 هرتز ويقال له مدى السمع . وهكذا يتضح أن الإجابة على السؤال تتوقف على التعريف الذي يعرف به الصوت .

إن مصادر الموجات السمعية في الطبيعة كثيرة جداً وهي الأوتار المهترة (مثل أوتار الكمان والبيانو والقيثارة والحبال الصوتية للإنسان) والأعمدة الهوائية المهترة (مثل الأرغن وأنابيب الرنين ومحمد الأصوات في السيارات) والصفائح والأغشية الرقيقة المهترة (مثل الطبول والدفوف وأجهزة تكبير الصوت) وغيرها كثيرة .

وتختلف استجابة الأذن البشرية للصوت المسنوع باختلاف خواص الصوت من حيث الشدة والتردد والطابع . ومن المفيد جداً أن نتعرّف على استجابة الأذن للصوت قبل التطرق لتأثير كل من الشدة والتردد والطابع على الأذن .

3- استجابة الأذن البشرية للصوت :

إن الأذن البشرية العادمة جهاز فائق الحساسية للصوت يفوق في تحسسه أدق الأجهزة المصنوعة لهذا الغرض .

وهناك حدود لحساسية الأذن للصوت من حيث الشدة والتردد ، فالحد الأدنى لشدة الصوت المسموع هو 10^{-12} واط لكل متر مربع وهذا يقابل أضعف صوت تحسه الأذن البشرية ويعادل ضغط صوتي مقداره 20×10^{-6} باسكال (20×10^{-6} نيوتن/ m^2) وهذا الحد من الضغط يدعى بحافة السمع (أو عتبة السمع) .

إن هذا التغير微小 في مقدار الضغط الجوي 20×10^{-6} باسكال (ويعادل جزءاً واحداً من 5000000000 جزء من الضغط الجوي الاعتيادي) يسبب إزاحة لغشاء الطبيل بمسافة تقل عن قطر جزيء الهيدروجين .

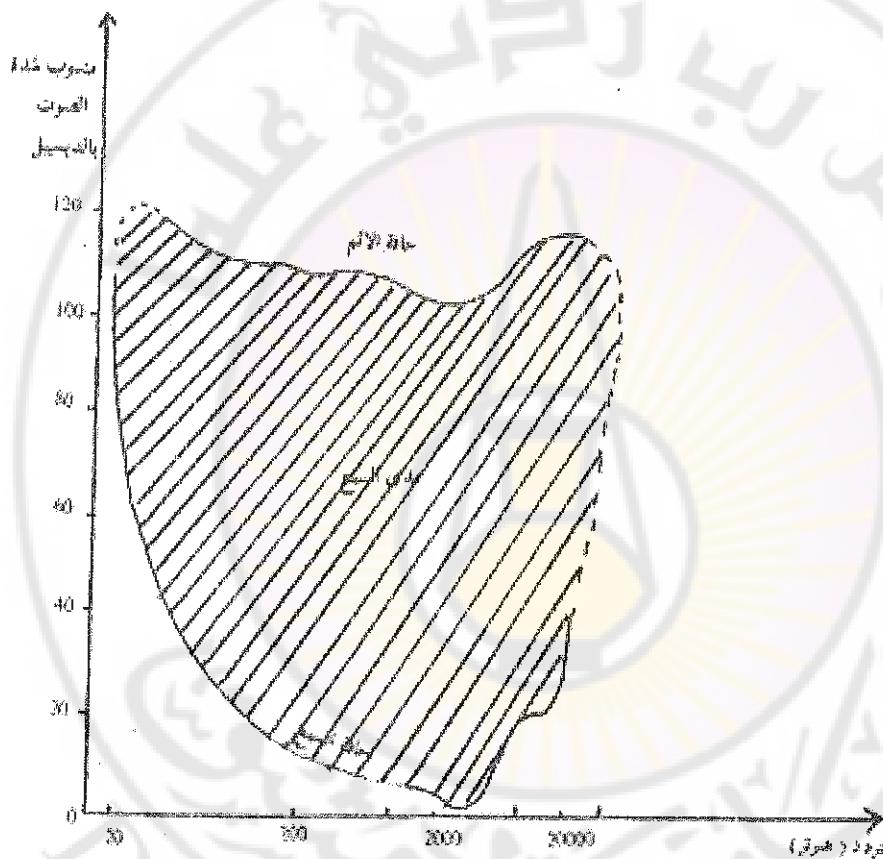
ومع هذه الحساسية الزائدة فإن الأذن البشرية تتحمل ضغطاً صوتيًا يفوق قيمة أدنى ضغط صوتي مسموع بأكبر من مليون مرة ، وهذا الحد من الضغط يدعى بعقبة الألم .

وهكذا يتضح أن الأذن البشرية العادمة تحس بال WAVES التضاغطية كصوت إذا كان ضغطها الصوتي يتراوح بين الحدين 20×10^{-6} باسكال إلى 20 باسكال وإذا كان ضغط الصوت أقل من 20×10^{-6} باسكال فإنه لم يعد مسموعاً ، وإذا زاد عن 20 باسكال يسبب الألم للأذن .

أما من ناحية التردد فإن الأذن البشرية العادمة تسمع الأصوات التي تقع تردداتها ضمن المدى المحصور بين حوالي 20 هرتز إلى حوالي 20000 هرتز ، أما الموجات التي تقع تردداتها خارج هذا المجال فلا يمكن للأذن البشرية أن تتحسسها كصوت ، وتسمى الموجات التي يقل ترددتها عن 20 هرتز

بالموجات تحت السمعية وتسمى الموجات التي يزيد ترددتها عن 20000 هرتز
بالموجات فوق السمعية .

إن الشكل (1) يوضح مجالات الشدة والتردد للموجات التضاغطية التي
يمكن للأذن العادية أن تحسها كصوت .



يوضح إن الأذن العادي يتقبل جميع الأصوات التي تقع شدتها بين خطاهي السمع وخطه المهدورة
تردداتها بين 20 هertz و 20000 هertz

الشكل (1)

في هذا الشكل نلاحظ أن أدنى شدة للصوت المسموع التي تمثل حافة السمع ليست ثابتة مع التردد ، إذ يلاحظ أن الأذن العادبة تكون حساسيتها أعظم ما يمكن للأصوات التي تقع تردداتها ضمن المجال المحصور بين حوالي 700 هرتز و 6000 هرتز وفي هذا المجال تكون قيمة أقل ضغط صوتي مسموع هي 20.10^6 باسكال ولهذا السبب تم اعتبار هذه القيمة مرجعية في الصوتيات .

وتضعف حساسية الأذن للصوت كلما ابتعد التردد عن هذا المجال سواء بالزيادة أو بالنقصان ، وعند الترددات المنخفضة التي تقل عن حوالي 30 هرتز أو الترددات العالية التي تزيد عن حوالي 12000 هرتز تكون الأذن العادبة غير حساسة إلى حد بعيد ، مما يقتضي أن ترتفع شدة الصوت كثيراً لكي يمكن سماعه .

ويلاحظ من الشكل أيضاً أن شدة الصوت التي تسبب الألم للأذن (عقبة الألم) تكاد تكون ثابتة مع التردد .

مما تقدم يتبيّن أن استجابة الأذن السليمة للصوت ليست خطية بل معقدة وتختلف باختلاف تردد الصوت وشدته ، وهذه الصفة المميزة للأذن البشرية تقيد كثيراً في تمييز الأصوات المختلفة . وأهم الخصائص التي يعتمد عليها السامع لتمييز الأصوات المختلفة هي العلو والدرجة والنوعية .

4-5 العلو :

يرتبط العلو بشدة الصوت ، فإذا كانت تعرف الشدة بأنها المعدل الزمني لتدفق الطاقة الصوتية خلال وحدة المساحة وهي كمية فيزيائية يمكن قياسها وحسابها بدقة إلا أن العلو يتوقف على تأثير شدة الصوت على الأذن (أي على حكم السامع) .

وعليه يعرف العلو بأنه ذلك الإحساس الذي يتوقف على شدة الصوت المسموع ، ومع أن علو الصوت يزداد مع ازدياد شدته إلا أن الأذن ليست بنفس الحساسية

لأصوات ذات الترددات المختلفة ونتيجة لذلك فالأنف لا تستطيع سماع الصوت ذي التردد العالي بنفس العلو الذي تسمع به صوتاً تردد أقل وشدة مساوية لشدة الصوت الأول .

إن استجابة الأنف البشرية للأصوات التي لها نفس التردد ولكنها تختلف بالشدة تتغير لوغاريتmicmياً وليس خطياً ، وهذه النتيجة تتفق مع علاقة فيزيولوجية أكثر شمولاً تدعى قانون فيبر - فيخنر (weber - Fechner law) وطبقاً لهذا القانون :

مقدار الإحساس يتاسب طردياً مع لوغاريتيم الشدة .
فإذا فرضنا أن مقدار الإحساس (علو الصوت) هو L وأن شدة الصوت I فإن :

$$L \propto \log I \quad (5-1)$$

ويجب أن نلاحظ أن هذا القانون لا ينطبق بدقة عند حدود السمع الدنيا والعلياً (أي قرب حافتي السمع والألم) أما في المجالات الأخرى فإن القانون يعطي نتائج جيدة .

ومن العلاقة الأخيرة نحصل على :

$$L = K \log I \quad (5-2)$$

حيث أن K مقدار ثابت .

وبمقابلة (5-2) نجد أن :

$$\frac{dL}{dI} = \frac{K}{I} \quad (5-3)$$

أن المقدار $\frac{dL}{dI}$ يدعى بحساسية الأنف .

ويلاحظ من هذه العلاقة أن حساسية الأنف تقل مع زيادة شدة الصوت ، وهذا يعني أن الأنف تحس التغيرات في شدة الصوت بشكل أفضل كلما قلت شدة الصوت المسموع .

أي بعبارة أخرى أن شدة الصوت يجب أن تصبح عشرة أمثالها لكي تحسها الأذن وكأنها أصبحت أعلى مرتين ، وأن الشدة يجب أن تتضاعف مئة مرة لتبدو للأذن أنها أعلى بثلاث مرات وهكذا

ولما كان العلو هو إحساس سمعي يتوقف على حكم السامع ذاته أي أنه ظاهرة فيزيولوجية وليس فيزيائية لذلك فإنه يتعدد قياسه بدقة بأي جهاز . إن علو الصوت يعتمد على شدة الصوت وحساسية الأذن بينما شدة الصوت تعتمد على عدة عوامل أهمها :

1- سعة الاهتزاز للمصدر :

إن شدة الصوت الناتج من أي مصدر صوتي تتناسب طرداً مع مربع سعة الاهتزاز .

2- المساحة السطحية للسطح المهتر :

إن شدة الصوت الناتج من مصدر مهتر تتناسب طرداً مع مساحة السطح المهتر .

3- المسافة بين المصدر والمستلم :

حيث أن شدة الصوت تتناسب عكساً مع مربع المسافة الفاصلة بين المصدر ونقطة الاستلام .

5- درجة الصوت :

تعرف درجة الصوت بأنها ذلك الإحساس الذاتي الذي يتوقف على تردد الصوت المسموع ، أي أنها حدة نغمة الصوت كما تشعره الأذن البشرية ، فمثلاً عند نقر وتر مشدود فإن الوتر يهتز ويستطيع أي سامع أن يقرر درجة الصوت الناتج من اهتزاز الوتر وإذا ما ازداد الشد في الوتر فإن تردد الاهتزاز يرتفع

ويستطيع السامع أن يقرر حالاً أن درجة الصوت الجديد أعلى من درجة الصوت الأول ، وفي هاتين الحالتين تعدد درجة الصوت مرادفة لتردداته وهذا يتضح أن درجة الصوت هي الحكم الذي يصدره السامع على الأصوات ويرتبها وفق سلم في مخه وفق إحساسه لتردداتها .

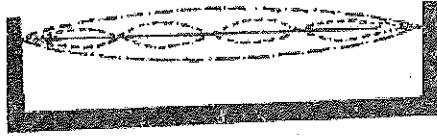
إن درجة الصوت لا تعتمد على علو الصوت أو نوعيته ، فأصوات النساء والأطفال درجاتهن عالية لأن تردداتهما مرتفعة بينما صوت الرجل الكبير درجته منخفضة وأجش لأن تردداته منخفض .

إذا كان الصوت المسموع ذا تردد منفرد (نغمة ندية) فعندئذ يمكن تمييزه تماماً بمعرفة علوه ودرجته فقط ، أما إذا كان الصوت معقداً أي مركباً من خليط من الترددات فعندئذ تحتاج لمميزه إلى معرفة علوه ودرجته ونوعيته .

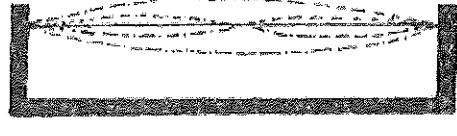
6-5 نوعية النغمة أو الصوت :

إن نوعية النغمة هي التي تمكنا من التمييز بين صوتين لهما العلو نفسه والدرجة نفسها ولكنهما صادران من مصدرين مختلفين ، وهذا يعزى إلى الاختلاف في عدد وترتيب وشدة التوافقيات التي يتتألف منها كل صوت .

فمثلاً لو كان لدينا صونومتران فيهما وتران متماثلان تماماً من حيث قوة الشد والطول ومساحة المقطع العرضي والكتافة ، وسمح لكلا الوترين بالاهتزاز بوساطة قوس يمر عليهما بنفس الوقت ، ثم لمس الوتر الأول من منتصفه والثاني من ربعه لمساً خفيفاً فعندئذ سنلاحظ أن الوتر الأول سيهتز بكماله وبجزأين في نفس الوقت كما مبين في الشكل (2 - آ) .



(ب)



(ج)

الشكل (2): يبين وتران مهتزين في حالة اهتزاز

(أ) : الوتر يهتز بكامله وبجزأين (النغمة الأساسية والنغمة التوافقية الأولى)
 (ب) : الوتر يهتز بكامله وبأربع أجزاء (النغمة الأساسية والنغمة التوافقية الثالثة)
 وبذلك ينتج نغمتان هما : النغمة الأساسية والنغمة التوافقية الأولى ، بينما
 الوتر الثاني سيهتز بكامله وبأربع أجزاء بنفس الوقت كما هو مبين في الشكل
 (2 - ب) ، وبذلك تنتج نغمتان هما : النغمة الأساسية والنغمة التوافقية الثالثة .
 وعند سماع الصوتين الناتجين من اهتزاز الوترين نلاحظ أن هناك اختلافاً بينهما
 ناتجاً من اختلاف النوعية ، وهذا يعزى إلى اختلاف النغمات التوافقية المصاحبة
 للنغمة الأساسية .

وعلى هذا الأساس يمكن التمييز بين الأصوات المنبعثة من الآلات
 المختلفة في جوقة موسيقية حتى وإن كانت جميعها تعزف نغماً واحداً بالشدة
 نفسها .

ومن الجدير باللحظة أن النغمات الموسيقية الممزوجة بالتوافقيات يكون
 صوتها غنياً وجميلاً وبدون هذه التوافقيات يكون الصوت ثقيلاً وفي الواقع لو
 كانت جميع الآلات الموسيقية تبعث نغمات نقية خالية من التوافقيات تماماً لكان
 أصواتها متشابهة وليس لها عذوبة أو جرس موسيقي .

ولو فرضنا أن شخصاً يناديك ، فإنك ستدرك حال سمعه من خلال على
 ودرجة صوته إن كان صوت رجل أو طفل أو امرأة ، أما نوعية الصوت
 فستساعدك على التعرف على الشخص المنادي وتميزه ، وهذا هو السبب الذي

يجعل صفة الصوت (النوعية) تؤدي دوراً مهماً في تمييز الأصوات ، وإنما في إن
أصوات كافة الأشخاص ستكون متشابهة .

7-5 الأصوات الصامتة (أو غير المسموعة) :

لقد وجدنا أن الموجات الصوتية المسموعة هي تلك التي لا يقل ضغطها الصوتي عن $20 \cdot 10^{-6}$ باسكال ويترافق تردداتها بين 20 هرتز و 20000 هرتز .
أما الموجات التي تقع تردداتها خارج هذا المجال من التردد فإنها غير مسموعة ، وتسمى الموجات التي يقل ترددتها عن 20 هرتز بالموجات تحت السمعية ومثل هذه الموجات تتولد عادة عن المصادر الضخمة كما عند الاهتزازات الأرضية أو العواصف أو الأعاصير ، وتسمى الموجات التي يزيد ترددتها عن 20000 هرتز بالموجات فوق السمعية ويمكن توليدتها بوساطة الاهتزازات المرنة لبلورة الكوارتز التي تجاوب مع مجال كهربائي متذبذب (التأثير الكهروضاغطي) وقد أمكن بهذه الطريقة توليد موجات فوق سمعية تزيد تردداتها عن $6 \cdot 10^8$ هرتز وفي هذه الحالة يكون الطول الموجي المقابل في الهواء حوالي $5 \cdot 10^5$ سم وهو ما يتساوى مع طول الموجات الضوئية ، وهذه الموجات تطبيقات عملية واسعة في عالم اليوم وسيكون لها شأن كبير في عالم المستقبل .

8-5: المستوى الصوتي ووحداته:

إن الحد الأدنى لشدة الصوت المسموع بالكاد للأذن البشرية السليمة هو 10^{-12} واط لكل متر مربع (وهذا يقابل ضغطاً صوتيًا قيمته $20 \cdot 10^{-6}$ باسكال أي $20 \cdot 10^{-6}$ نيوتن لكل متر مربع) بينما الحد الأقصى لشدة الصوت الذي يمكن للأذن العاديه أن تتحمله هو حوالي 1 واط لكل متر مربع (وهذا يقابل ضغطاً صوتيًا قيمته 20 باسكال) .

من هذه القيم يتضح أن مدى شدة الصوت الذي تستطيع الأذن أن تسمعه واسع جداً ، وهذا يقتضي التعامل مع أرقام هائلة تتراوح قيمتها بين 10^{-12} و 1 واط لكل متر مربع ، وهذا أمر غير عملي تماماً .

وقد وجدها من قانون ويبير - فيخبر أن استجابة الأذن البشرية لشدة الصوت المسموع هي لوغاريتمية وليس خطية ، أي أن الإحساس بعلو الصوت في أي تردد معين لا يزداد خطياً مع الشدة بل مع لوغاريتم الشدة .

وعلى ضوء هذه الحقائق يمكن اقتراح وحدة مقياس لوغاريتمي لشدة الصوت المسموع يتحقق منه فائدتان هما :

أولاً : أنه يعطي تقريباً أفضل بكثير للإحساس البشري للعلو النسبي للصوت من مقياس وحدة الشدة المباشر .

ثانياً : أنه يضغط مجال الأرقام الهائلة التي يصعب التعامل معها إلى أرقام عملية صغيرة نسبياً يسهل تداولها .

وعليه يمكن تعريف المقياس اللوغاريتمي لشدة الصوت في شكل رياضي كما يلي :

$$\text{منسوب شدة الصوت} = \log_{10} \frac{I}{I_0} \text{ بيل} \quad (5-4)$$

حيث I هي شدة الصوت المقاس بوحدة الواط لكل متر مربع و I_0 هي شدة الصوت المرجعية وهي كمية اختيارية وتؤخذ عادة مساوية للحد الأدنى لشدة الصوت المسموع وهي 10^{-12} واط لكل متر مربع .

إن وحدة منسوب شدة الصوت هي الـ (بل) نسبة إلى الكساندر غراهام بن مخترع التليفون ، وعملياً تعد وحدة الـ (بل) كبيرة لذلك يفضل استخدام غالباً الديسيبل وهذه :

$$10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

وهكذا يتضح أن الديسيبل ليست وحدة قياس مطلقة ، بل إنها لو غار يتم النسبة بين كمية مقاسة وأخرى مرجعية متفق عليها وهي حافة السمع .

وعلى هذا الأساس فإن منسوب شدة الصوت عند حافة السمع هو 0 ديسيل و منسوب شدة الصوت عند عتبة الألم هو 120 ديسيل ، وأن نغمة صوتية شدتها 10 مرات القيمة المرجعية للشدة لها منسوب شدة يساوي 1 بيل أو 10 ديسيل وصوت له شدة تعادل 100 مرة القيمة المرجعية للشدة لها منسوب شدة يعادل 2 بيل أو 20 ديسيل .

ونلاحظ إذا ازداد منسوب شدة الصوت بمقدار 1 ديسيل ، فإن هذا يعني زيادة في شدة الصوت تعادل 26 بالمئة ، والأذن السليمة تدرك حسياً هذا المقدار من الزيادة في الشدة في المدى المتوسط من الترددات المسموعة ، وعليه فإن أقل تغير في منسوب الشدة يمكن أن تحسه الأذن البشرية العادية هو 1 ديسيل . ولما كانت معظم أجهزة القياس تعطي القياس المباشر للضغط الصوتي وليس الشدة ، وحيث أن شدة الصوت / تتناسب طردياً مع مربع الضغط الصوتي لذلك فإن :

$$10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 = \text{منسوب شدة الصوت بالديسيبل}$$

حيث أن p هو الضغط الصوتي المقاس وأن P_0 هو الضغط الصوتي المرجعي ويساوي 2.10^{-5} نيوتن لكل متر مربع وهو يمثل أقل ضغط صوتي مسموع أي حافة السمع . والعلاقة الأخيرة تصبح :

$$20 \log \frac{P}{P_0} = \text{منسوب الضغط الصوتي بالديسيبل}$$

وهذا يساوي عددياً منسوب شدة الصوت بالديسيبل . والجدول (1) يبين القيم التقريبية لشدة بعض الأصوات حينما يكون الشخص السامع قريباً من مصدر الصوت .

الجدول (1)

يبين القيم التقريرية لمنسوب شدة بعض الأصوات

منسوب شدة الصوت بالديسيبل	نوع مصدر الصوت
0	طنين الذبابة (أدنى صوت مسموع)
10	حفيف الشجر - غرفة النوم
15 – 20	الهمس المتوسط العلو
30	في مكتبة عامة
40	الموسيقى الخفيفة
50	في غرفة الطعام
60 – 65	النخاطب العادي
60 – 70	رنين الهاتف
70 – 85	طريق كثيف المرور
80	ساعة توقيت
90	زئير الأسد (على بعد 6 متر) والشلال
100	نقابة الصخور تعمل بالهواء المضغوط
100 – 110	الرعد
115 – 120	مطار الطائرات النفااثة (عند التحليق)
130	المدفع الرشاش
150 – 155	منطقة هبوط حاملة الطائرات (على بعد 20 متر)
175	صاروخ الفضائي

٩- الضوضاء أو الضجيج :

يمكن أن تصنف الأصوات المسموعة علمياً إلى صنفين :

أ- الأصوات الموسيقية :

الأصوات الموسيقية هي تلك الأصوات المسموعة وتمتاز بكونها أصواتاً ذات إيقاع خاص أو تكرار دوري محدد ، وعليه تعدّ الأصوات الناتجة من اهتزاز أوتار الكمان أو عزف الناي هي أصوات موسيقية .

بينما الأصوات التي تولد تأثيراً مزعجاً للإذن البشرية تدعى بالضجيج ، وتمتاز بكونها أصوات متقطعة وغير دورية وتنتج عادة من عدم انتظام الاهتزاز في المصدر الصوتي مثل الأصوات المتولدة من دق المطرقة أو سقوط طبق على الأرض ، أو بوق سيارة أو مدفع .

لقد اعتمدنا في تصنيف الأصوات المسموعة بأنها موسيقية أو ضجيجاً استناداً إلى طبيعتها. ولما كان السامع هو الحكم النهائي الذي يقرر مدى تقبله أو رفضه للأصوات المسموعة لذلك يجب أن نضع تعريفاً شاملاً للضجيج يراعى فيه أساساً رد فعل السامع وليس طبيعة الصوت المسموع وعلى هذا الأساس يكون التعريف الذاتي للضجيج بأنه :

(أي صوت مسموع غير مرغوب فيه) وهذا يعني أن ما يمكن عده ضجيجاً في وقت من الأوقات قد لا يكون كذلك في وقت آخر وأن أرق الأصوات الموسيقية قد يعدّ ضجيجاً بالنسبة للسامع إن لم يكن راغباً في سماعها فعلاً لسبب من الأسباب .

ورغم أن هذا التعريف ليس موضوعياً لأنه يستند على عوامل ذاتية للسامع إلا أنه معتمد ويُعول عليه دولياً بشكل عام .

إن الضجيج تأثير في صحة الإنسان يتوقف على الشدة والتردد وفترّة التعرض .

10-5 ظاهرة التشتت :

يمكن وصف ظاهرة التشتت بأنها التغير في سرعة نقدم الموجة الجيبية في الوسط المادي مع الطول الموجي أو التردد . وعموماً فإن أي إشارة أو اضطراب يتتألف من خليط من الترددات المختلفة .

وفي الواقع فإن معظم الأصوات التي نتعامل معها هي أصوات معقدة تتراكب من مزيج من الترددات ونادراً ما نتعامل مع صوت أحادي التردد (أو نغمة نقية تماماً) .

ومن حسن الحظ أن ظاهرة التشتت في مجال الصوت محدودة وليس لها الأهمية كما في مجال الضوء أو الموجات الكهرومغناطيسية عموماً ، ولكن بالنظر لأهمية هذه الظاهرة في النظرية العامة للحركة الموجية يجب أن نتعرف عليها بشيء من التفصيل .

إذا ما تحركت مجموعة من الموجات ذات الأطوال الموجية المختلفة في وسط مادي مشتت فإن كل موجة تحرك بسرعة تختلف عن سرع الموجات الأخرى .

وبذلك فإن هذه الظاهرة تعني أنه بعدما كانت جميع الموجات في الموقع نفسه في لحظة ما فإنها تصبح منفصلة عن بعضها في موقع آخر في لحظة أخرى نتيجة اختلاف سرعها.

وخير مثال عملي على هذه الظاهرة في مجال البصريات هو تحلل الضوء الأبيض إلى مركباته بواسطة المنشور ، وذلك بسبب تباين سرع المركبات (أي الموجات المختلفة التي يتألف منها الضوء الأبيض) خلال مرورها بمادة المنشور ، ونتيجة ذلك تتكسر هذه المركبات بزوايا مختلفة .

ومثال آخر على هذه الظاهرة في مجال الصوتيات هو تحلل الصوت المركب من عدة ترددات إلى مركباته عند مروره خلال ثاني أوكسيد الكربون .

ويقال للوسط المادي الذي تعتمد فيه سرعة انتقال الموجة على الطول الموجي (أو التردد) بأنه وسط مشتت مثل أي وسط شفاف كالزجاج أو الماء أو الهواء بالنسبة للموجات الضوئية . وفي مثل هذه الأوساط تكون العلاقة بين سرعة الضوء C والطول الموجي λ هي :

$$\frac{1}{c} = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (5-5)$$

حيث A و B ثابتان بالنسبة للوسط المعنـي .

ومن الأمثلة الأخرى في الفيزياء على توقف سرعة الموجة على الطول الموجي هو الموجات السطحية في سائل عمقه h وكثافته p وتوتره السطحي T ، حيث سرعة الموجة السطحية هي C :

$$C^2 = \left(\frac{g}{2\pi k} + \frac{2\pi k T}{\rho} \right) \tanh(2\pi kh) \quad (5-6)$$

حيث g هو تسارع الجاذبية الأرضية و K هو العدد الموجي .

5-11 السرع في الحركة الموجية :

في البداية يجب أن نؤكـد أن الوسط الناـقل للموجـة كالهواء مثلاً ، ليس متصلـاً بل متقطعاً ويتألـف من عدد هائل من الجـزيـات منفصلـة عن بعضـها تماماً .

ولكن مصادر الصوت تكون عادة كبيرة جداً بالمقارنة مع الأبعـاد الفاصلة بين الجـزيـات تحت الشروـط الجوـية الاعـتيـادية وإن هـذه الجـزيـات المنـفرـدة الـتي يـتألـف منها الوـسط لا تـتنـقل مع المـوجـة بل تـهـتزـ مـوضـعيـاً حـولـ نقاطـ تـوازنـها وـعـلـى هـذا الأـسـاس يـمـكـنـ اعتـبارـ الجـزيـاتـ عـبـارـةـ عـنـ مـهـزـاتـ تـهـتزـ بـحرـكـاتـ توـافـقـيـةـ اـهـتزـازـ طـولـياًـ حـولـ مواـضـعـ تـوازنـهاـ . وـطـبـيعـيـ أنـ جـمـيعـ هـذـهـ

المهترات لا تهتز بالطور نفسه بل بأطوار مختلفة تتغير دورياً . واختلاف طور حركة هذه المهترات هو الذي نلاحظه كموجات .

وهناك ثلات سرع في الحركة الموجية متميزة عن بعضها تماماً ولكن ترتبط مع بعضها بعلاقات رياضية ، وهي :

1 - سرعة الجسم .

2 - سرعة الموجة أو سرعة الطور (الموجة منفردة) .

3 - سرعة المجموعة (العدد من الموجات المركبة) .

وبالنظر لأهمية هذه السرعات في الحركة الموجية سنتطرق لكل منها بشيء من التفصيل على افتراض أن الموجات التي سنتعامل معها جيبية .

5-12 سرعة الجسم :

وهي السرعة التوافقية البسيطة للجسم حول موضع توازنه ، وهي مقدار متغير ، وتكون قيمتها عظمى عند لحظة مرور الجسم في موضع توازنه وتكون صفرأً عندما يكون في أقصى إزاحة عن موضع التوازن .
الإزاحة الآتية ξ للجسم في آية لحظة زمنية t هي :

$$\xi = a \sin(\omega t - kx) \quad (5-7)$$

حيث الرموز تحمل معناها الاعتيادي .

$$\omega = kc$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{ولدينا}$$

وبذلك تصبح المعادلة (5-7) كالتالي :

$$\xi = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x) \quad (5-8)$$

حيث c هي سرعة الموجة .

إن سرعة الجسيم u هي :

$$u = \frac{d\xi}{dt}$$

وبمقابلة المعادلة (5-8) بالنسبة للزمن نحصل على :

$$u = \frac{d\xi}{dt} = \frac{2\pi ac}{\lambda} \cos \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x) \quad (5-9)$$

إن هذه المعادلة توضح العلاقة بين سرعة الجسيم المهتز u وسرعة الموجة c

إن القيمة العظمى لسرعة الجسيم هي u_0 حيث

وهذه العلاقة توضح أن :

$$\text{أقصى سرعة للجسيم } u_0 = \frac{2\pi a}{\lambda} \times \text{سرعة الموجة } c$$

وفي الواقع فإن سرعة الجسم u هي السرعة التي يزودها المصدر الصوتي المهتز لجسيمات الوسط وتتوقف على سعة الاهتزاز واتجاهه وتخفي عندما يتوقف السطح المهتز عن الاهتزاز وهذه السرعة تختلف عن السرع الجزيئية العشوائية المرتبطة بالحركة المستمرة لجسيمات الوسط سواء كانت هناك حركة اهتزازية أو لم تكن .

وطبقاً للنظرية الحركية للغازات فإن جزيئات أي غاز في حالة حركة دائمة في الفضاء بسرع مختلفة تتفاوت في المقدار من الصفر إلى ما لا نهاية تقريرياً (وفق توزيع ماكسويل لسرع الجزيئات) .

وإذا فرضنا أن متوسط مربع سرعة هذه الجزيئات هو \bar{v}^2 فإن الضغط الناتج من تصادم هذه الجزيئات مع أي سطح هو p_0 وهذا الضغط يعطى بالعلاقة :

$$p_0 = \frac{1}{3} \rho_0 \bar{v}^2 \quad (5-10)$$

حيث ρ_0 هي كثافة الغاز و p_0 هو ضغط الغاز .

ولما كانت سرعة الموجة الصوتية في أي غاز تحت شروط ثابتة (adiabatic) هي c حيث :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}}$$

ومنها نجد أن :

$$p_0 = \frac{1}{\gamma} \rho_0 c^2 \quad (5-11)$$

حيث γ هي النسبة بين السعة الحرارية للغاز تحت ضغط ثابت c_p إلى سعته

$$\left(\gamma = \frac{c_p}{c_v} \right) \quad \text{تحت حجم ثابت } c_v : \quad (5-12)$$

وبتعويض p_0 من المعادلة (10) في المعادلة (11) نحصل على :

$$c = \sqrt{\frac{1}{3} \gamma v^2} \quad (5-12)$$

من هذه المعادلة يتضح أن هناك علاقة مباشرة بين سرعة الموجة الصوتية c والجذر التربيعي لمتوسط مربع سرعة جزيئات الغاز $(\sqrt{v^2})$ وإذا علمنا أن قيمة γ تعتمد على عدد درجات الحرية للجزيئة المكونة للغاز وفق العلاقة :

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1 + \frac{2}{n}$$

حيث n هو عدد درجات الحرية . فللغازات الأحادية الذرة ($n=3$) . وللغازات الثنائية الذرة ($n=5$) وللغازات الثلاثية الذرة ($n=7$) وعليه فإن قيم γ لهذه الغازات هي 1.29, 1.40, 1.66 على الترتيب .

ومن مقارنة المعادلين (10-5) و (11-5) يبدو واضحاً أن هناك تطابق في الشكل ، وبتعويض القيمة المناسبة لـ γ في المعادلة (12-5) يتضح أنه طبقاً للنظرية الحرارية للغازات أن سرعة تقدم الموجة الصوتية في أي غاز لها

نفس المرتبة من المقدار للجذر التربيعي لمتوسط مربع السرع الجزيئية لذ لك الغاز (يعتبر الهواء غاز ثانوي الذرة) .

وهذه النتيجة تبدو صحيحة إلى حد كبير إذا علمنا أن مرتبة القيمة لسرعة الجسيمات الناتجة عن مرور الموجات الصوتية ذات الشدة الاعتيادية (كما في الموجات المرافقة للكلام والموسيقى) لا يتجاوز $10 \text{ سم}/\text{ث}$ بينما متوسط السرعة للحركة الجزيئية العشوائية هي في حدود 10^4 إلى $10^5 \text{ سم}/\text{ث}$ تحت الشروط الاعتيادية . وعلى ضوء ما نقدم يمكن تصور عملية تقدم الموجة الصوتية كالتالي :

عندما يهتر المصدر الصوتي فإن بعض الجزيئات تتدفع نحوه نتيجة الحركة العشوائية وتلتلامس مع السطح المهتر ، وبذلك تستلم كمية حركة إضافية صغيرة بالمقارنة مع متوسط كمية الحركة التي تمتلكها قبل التلامس .

ولما كانت كمية الحركة كمية متوجهة ، لذلك فإن الزيادة بكمية الحركة التي اكتسبتها الجزيئات التي تلامست مع السطح المهتر ستنتقل (بنفس المقدار والاتجاه) إلى الجزيئات الأخرى التي ستصطدم معها ، وهذا الإضطراب المصاحب لعملية انتقال كمية الحركة من جزيء إلى آخر سينتقل باتجاه محدد في الفضاء بسرعة تحددها أساساً السرع الجزيئية العشوائية وليس سرعة الجسيم التي استلمها من المصدر المهتر .

وتجدر باللحظة أن هذا التصور يتفق مع الحقيقة التي تشير إلى أن سرعة المسوجة مقدار ثابت (في الأوساط غير المشتتة) حتى على مسافات بعيدة بما فيه الكفاية لكي تصبح سرعة الجسم المصاحبة للموجة ضئيلة جداً .

وفي الواقع إذا كانت الزيادة في سرعة الجسم التي يكتسبها من السطح المهتر كبيرة بالمقارنة مع متوسط السرع العشوائية للجزيئات فإن سرعة الموجة

تصبح ، وكما هو متوقع أكبر من قيمتها الاعتيادية بالنسبة للموجات ذات السعات الصغيرة .

فالاضطرابات المتولدة من الانفجارات الشديدة في الهواء تنتقل في المناطق القريبة من موقع الانفجار بسرعة تفوق عدة مرات سرعة الموجات الصوتية ، وهذا يشكل ما يدعى بالموجات الراحة (اختراق جدار الصوت)

5- سرعة الموجة (أو سرعة الطور) :

وهي سرعة تقدم طور معين للموجة المفردة وهي مقدار ثابت في الوسط الواحد وتساوي حاصل ضرب التردد f في الطول الموجي λ أي أن :

$$f\lambda = c \quad (\text{مقدار ثابت})$$

وهذا المقدار الثابت c (سرعة الموجة) يعتمد على الثوابت الفيزيائية للوسط ، فمثلاً سرعة الموجة الطولية في عمود المائع (سائل أو غاز) هي مقدار ثابت يتوقف على ثوابت الوسط k و ρ_0 أي أن :

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho_0}} \quad (5-13)$$

وسرعة الموجة المستعرضة في سلك متوتر تحت شد معين هي مقدار ثابت يتوقف على ثوابت السلك F و μ أي أن :

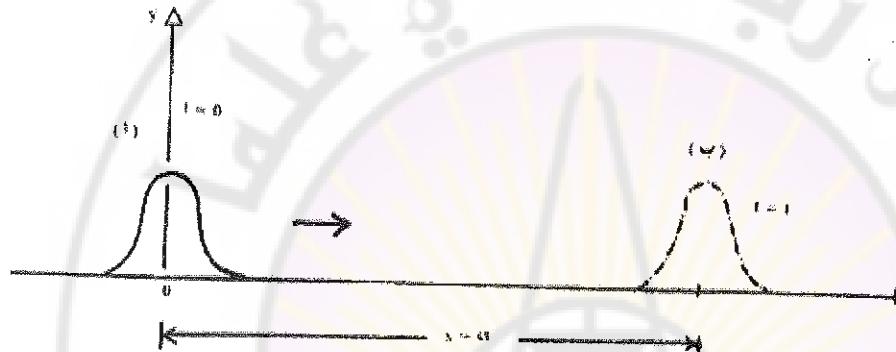
$$c = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (5-14)$$

ولأهمية توضيح مفهوم سرعة الطور (أو سرعة الموجة) بطريقة تحليلية سنختار للسهولة موجة مستعرضة تنتقل في سلك طويلاً مشدود على طول المحور السيني x ، نفرض أنه في لحظة معينة ، ولتكن $t=0$ ، يمكن تمثيل شكل الموجة (أي شكل الاضطراب الموضعى في السلك) بالمعادلة :

$$y = f(x) \quad (5-15) \quad \text{حيث } y \text{ هي الإزاحة المستعرضة للسلك عند } x \text{ كما هو مبين في الشكل (3)} .$$

وإذا فرضنا أنه بمرور الزمن تنتقل هذه الموجة على طول السلك دون أن يتغير شكلها ، وبعد مرور الزمن t تكون الموجة قد انتقلت المسافة ct إلى اليمين ، حيث c هي مقدار سرعة الموجة ، بفرض ثبوتها . وبذلك تكون معادلة الموجة بعد مضي الزمن t هي :

$$t = t \quad y = f(x - ct) \quad (5-16)$$



الشكل (3) : يبين شكل التشوّه في السلك (في هذه الحالة نبضة) ،

(أ) النبضة عند الزمن $t = 0$ ،

(ب) النبضة عند الزمن $t > 0$ وقد تحركت إلى اليمين مسافة $x = ct$

إن هذه المعادلة تعطي نفس الشكل الموجي حول النقطة $x = ct$ عند الزمن t كما كانت تعطيها المعادلة (5-15) حول $x = 0$ عندما $t = 0$ وفي الحقيقة إن هذه المعادلة تعدّ المعادلة العامة لأية موجة على أية شكل تحرك إلى اليمين .

والآن لنتأمل هذه المعادلة بشكل دقيق ، إذا أردنا أن نتابع جزءاً معيناً من حركة (أو طور) الموجة مع مرور الزمن ، فيجب أن نبحث عن قيمة خاصة

للمتغير x (كأن نقول ، قمة النبضة مثلاً) وفي هذه الحالة الخاصة تكون قيمة ثابتة لأنها تصف جزءاً معيناً من طور الموجة .

أما من وجهة النظر الرياضية ، فإن هذا يعني أننا نبحث عن كيفية تغير x مع t عندما يأخذ المقدار $(x - ct)$ قيمة معينة ثابتة ، وعند ثبوت قيمة $(x - ct)$ فإن ذلك يعني أنه بازدياد t يجب أن تزداد x حتى يبقى المقدار $x - ct$ ثابتاً ، ومن ثم فإن المعادلة (5-15) تمثل في الواقع ، موجة تتحرك إلى اليمين (اتجاه تزايد x) ، أما إذا أردنا أن نمثل موجة تتحرك إلى اليسار فإننا نكتب :

$$y = f(x + ct) \quad (5-17)$$

حيث إن الموضع للطور الثابت $(x + ct)$ للموجة يتراقص بازدياد الزمن ، وهكذا يتضح أنه يمكن بسهولة الحصول على سرعة طور معين للموجة ، فلطور معين لموجة تتحرك إلى اليمين يجب أن يتتوفر الشرط التالي :

$$x - ct = \text{مقدار ثابت} \quad (5-18)$$

وبإجراء التفاضل ينتج أن :

$$\frac{dx}{dt} - c = \text{مقدار ثابت} \quad (5-19)$$

ومن ثم فإن c هي سرعة طور الموجة ، أما الموجة التي تتحرك إلى اليسار فإننا نحصل بالطريقة نفسها على سرعة طورها ($-c$) . وبنفس الطريقة تماماً يمكننا تطبيق التحليل نفسه على الموجات الطولية .

5-14 سرعة المجموعة :

لقد اقتصرت دراستنا لحد الآن على التعامل مع الموجات الأحادية التردد (أي ذات الطول الموجي الثابت) ، وقد وجدنا في البند السابق أن الموجة المنفردة تتحرك بسرعة ثابتة في الوسط الواحد (غير المشتت) مهما كان طولها الموجي ومقدار هذه السرعة يتوقف على الثوابت الفيزيائية لذلك الوسط ،

و هذه السرعة (سرعة الموجة) في هذه الحالة هي نفسها سرعة تقدم الطاقة التي تحملها الموجة .

أما في حالة التعامل مع عدد أو مجموعة من الموجات ذات الأطوال الموجية المختلفة التي تتحرك آنئياً في وسط ما ، وهذا ما هو شائع في معظم الحالات العملية ، فإنه ينبغي التعامل مع السلوك الجماعي لجميع الموجات في أن واحد وعدم التعامل مع كل موجة على انفراد خاصة إذا كانت المجموعة تتحرك في وسط مشتت .

إن بحث سلوك مثل هذه المجموعة من الموجات يقودنا إلى النوع الثالث من السرع الذي سبق أن تطرقنا له في الفقرة (5-11) وهو سرعة المجموعة . وللسهولة فقط سنكتفي باعتبار مجموعة تتكون من موجتين تتحركان بنفس الاتجاه ولهمما المسافة نفسها a والفرق بين ترددיהם ω_1 و ω_2 مقدار صغير جداً ، ونفرض أن الموجتين هما:

$$\begin{aligned} y_1 &= a \sin(\omega_1 t - k_1 x) \\ y_2 &= a \sin(\omega_2 t - k_2 x) \end{aligned} \quad (5-20)$$

وطبقاً لقاعدة التركيب ، فإن التأثير المركب للموجتين يعطى بالمحصلة بحيث :

$$y = y_1 + y_2 = a \sin(\omega_1 t - k_1 x) + a \sin(\omega_2 t - k_2 x)$$

و منها نحصل على :

$$y = 2a \sin\left[\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right)t - \left(\frac{k_1 + k_2}{2}\right)x\right] \cos\left[\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right)t - \left(\frac{k_1 - k_2}{2}\right)x\right] \quad (5-21)$$

إن حد الجيب يمثل موجة ترددتها $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ وهو المتوسط الحسابي للترددرين الأصليين ω_1 و ω_2 و عددها الموجي يمثل $\frac{k_1 + k_2}{2}$

ولما افترضنا أن الفرق بين التردددين الزاويين ω_1 و ω_2 هو مقدار صغير وكذلك الفرق بين k_1 و k_2 أي أن :

$$\omega_1 - \omega_2 = \delta\omega$$

$$k_1 - k_2 = \delta k$$

لذلك فإن :

$$\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} = \omega_1 - \frac{\delta\omega}{2} = \omega_2 + \frac{\delta\omega}{2}$$

$$\frac{k_1 + k_2}{2} = k_1 - \frac{\delta k}{2} = k_2 + \frac{\delta k}{2}$$

وهذا يشير إلى أن قيمة المتوسط الحسابي للتردددين الأصليين يساوي إلى درجة عالية من الدقة قيمة أحد التردددين ، وكذلك فإن قيمة المتوسط الحسابي للعددين الموجيين الأصليين يساوي إلى درجة عالية من الدقة قيمة أحد العدددين الموجيين ، وهذا يعني أن حد الجيب يمثل موجة جيبية طورها يماثل إلى حد كبير طوري الموجتين الأصليتين .

والشكل (4-أ) يبين الموجة الجيبية التي يمثلها حد الجيب في المعادلة (5-21)

وحد الجيب تمام في المعادلة (5-21) يمثل موجة ترددتها الزاوي $\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$

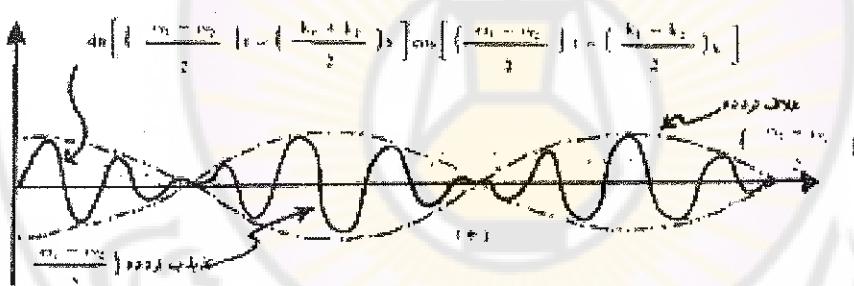
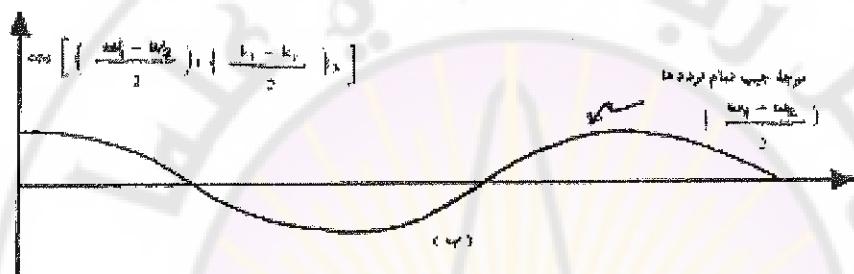
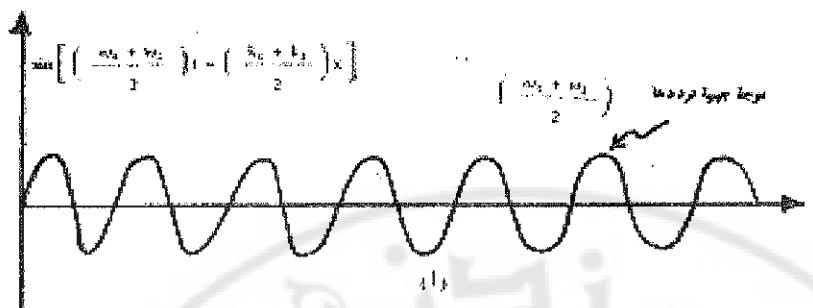
وعددها الموجي $\frac{k_1 - k_2}{2}$ وسرعة هذه الموجة هي :

$$\frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2}$$

إن هذا الحد يتغير مع كل من الزمن والمسافة ببطء أكثر مما هو في حد

الجيب ، والشكل (4-ب) يبين الموجة التي يمثلها حد الجيب تمام .

إن الشكل (4-ج) يبين المنحني البياني للتابع (5-21) عند ثبوت الزمن t



الشكل (4-5) : يبين مجموعة موجية مركبة من موجتين (أ) يمثل حد الجيب في المعادلة (21-5) (ب) يمثل حد جيب التمام ، (ج) يمثل الخط المتصل (وليس المتقطع) حاصل ضرب الحدين وهذا المنحني يمكن الحصول عليه بضرب الإحداثيات الرئيسية للحدين الجيب (أ) والجيب تمام(ب) مع بعضهما نقطة بنقطة ، فينتج المنحني المستمر (ج) الذي يظهر واقعاً داخل الغلاف المنشط ،

والغلاف المنقط هو في الحقيقة منحني الجيب تمام (ب) وصورته في المحور السيني x .

ومما يجدر ملاحظته من تمايز الحدين في x و t في المعادلة (5-21) أن شكل المنحني البياني الناتج من رسم y مع t عند ثبوت x مشابه لما هو مبين في الشكل (4-ج) الناتج من رسم y مع x عند ثبوت t .

إن تعاقب نمو السعة و�بوطها مع الزمن يؤدي إلى ظهور ظاهرة الضربات (الخفقان) ، ومن الواضح أن التابع (5-21) الممثل بالمنحني البياني (4-ج) يعني أن هناك تضمين لسعة الاهتزازات العالية التردد وذات الطول الموجي القصير بواسطة غلاف طوله الموجي طويل وتتردده منخفض .

إن تركيب موجتين أو أكثر بهذا الأسلوب يعرف بمجموعة موجية ، والآن لنرى كيف تسلوك المجموعة الموجية في الأوساط المشتتة وغير المشتتة .

في الأوساط غير المشتتة (أي الأوساط المادية التي لا يتوقف فيها سرعة الموجة على الطول الموجي) تكون سرعة الموجة c ثابتة وتعطي بالعلاقة :

$$C = \frac{\omega_1}{k_1} = \frac{\omega_2}{k_2} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2}$$

وهذا يعني أن الموجة الجيبية التي يمثلها الشكل (4-أ) والموجة الجيب تمام التي يمثلها الشكل (4-ب) لهما نفس السرعة الموجية تماماً .

وعلى هذا الأساس فإن الغلاف المنقط المنخفض التردد والمنحني المستمر العالي التردد الذي يقع داخل الغلاف في الشكل (4-ج) يتحرك إلى اليمين مع مرور الزمن بنفس السرعة ، وهذا يشير إلى أن أي إشارة مركبة من خليط من الموجات تقدم في وسط غير منتسب سرعة ثابتة دون أن يصاحبها تغير في الشكل .

أما في الأوساط المشتتة حيث السرعة الموجية تتغير مع الطول الموجي فإن :

$$\frac{\omega_1}{k_1} \neq \frac{\omega_2}{k_2}$$

ولذلك فإن :

$$\frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2} \neq \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2}$$

وهذا يعني أن المنحني الداخلي المستمر في الشكل (4-جـ) يتقدم بسرعة

$$\cdot \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} \text{ تختلف عن سرعة الغلاف المنقط } \frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2}$$

وهذا يشير إلى أن أي إشارة مركبة من موجتين أو أكثر يتغير شكلها مع مرور الزمن أثناء تقدمها في وسط مشتت بسبب اختلاف سرعة تقدم المنحني المستمر داخل الغلاف عن سرعة الغلاف .

وفي الغالبية العظمى من الحالات التي تواجهنا في الفيزياء تكون سرعة المنحني

$$\text{المستمر } \frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2} \text{ داخل الغلاف أكبر من سرعة الغلاف } \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} \text{ ، وهذا}$$

النوع من التشتت يدعى بالتشتت العادي ، ومثال على ذلك هو الموجات السطحية ذات الأطوال الموجية الهائلة في البحار حيث يمكن إهمال تأثيرات التوتر السطحي .

وفي حالات نادرة في الفيزياء تكون سرعة الغلاف المنقط $\frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2}$ أكبر من

سرعة المنحني المستمر $\frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2}$ وهذا النوع من التشتت يدعى بالتشتت الشاذ ،

ومن الأمثلة على ذلك هي الموجات المستعرضة في قضيب صلب وال WAVES الموجات الكهرومغناطيسية القريبة مما يسمى بحافة الامتصاص أو التجاوب .

والآن يجب أن ندرس كمية ذات أهمية خاصة في الفيزياء ، وهي السرعة التي تتقدم بها الطاقة التي تحملها مجموعة موجية مركبة من موجتين أو أكثر .

وقد علمنا في حالة التعامل مع موجة منفردة أن الطاقة التي تحملها تقدم بسرعة هي سرعة تقدم السعة العظمى والتي هي طبعاً سرعة الموجة (أو سرعة الطور) .

أما في حالة أي مجموعة موجية ولتكن الحالة المبينة في الشكل (4-ج) فنلاحظ أن سرعة تقدم السعة العظمى هي سرعة الغلاف المنقط ويتبع ذلك أن الطاقة تقدم بسرعة الغلاف ، وهذه السرعة تدعى بسرعة المجموعة وسنرمز لها بالحرف c_g لتمييزها عن سرعة الموجة c . وقد وجدنا أن الغلاف يتحرك

بسرعة $\frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2}$ لذلك فإن :

$$c_g = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} \quad (5-22)$$

وقد فرضنا في البداية أن ω_1 تختلف عن ω_2 و k_1 عن k_2 بمقادير صغيرة جداً لذلك يمكن كتابة العلاقة (5-22) بالشكل :

$$c_g = \frac{\delta\omega}{\delta k}$$

وعندما نقترب قيمة δk من الصفر فعندئذ نحصل على :

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (5-23)$$

ولكن لدينا :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} , \omega = 2\pi f$$

لذلك فإن :

$$c_g = \frac{d(2\pi f)}{d(2\pi/\lambda)} = \frac{df}{d(1/\lambda)} = -\lambda^2 \frac{df}{d\lambda} \quad (5-24)$$

وهذه المعادلة الهامة يمكن التعبير عنها بصيغ أخرى مفيدة وكما يلي :
لدينا العلاقة

$$\omega = kc \quad (5-25)$$

حيث أن c هي سرعة الموجة (إن الموجات المركبة التي تشكل المجموعة الموجية لها سرع مختلفة ولكن متقاربة مع بعضها في القيمة لذلك يمكن استخدام القيمة المفردة لـ c) .

وعندئذ نحصل على سرعة المجموعة بالصيغة :

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(kc)}{dk}$$

$$c_g = c + k \frac{dc}{dk} \quad (5-26)$$

وإذا عوضنا :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

في المعادلة (5-26) نحصل على :

$$c_g = c + \frac{1}{\lambda} \frac{dc}{d(1/\lambda)}$$

ومنها نجد أن سرعة المجموعة تعطى بالعلاقة :

$$c_g = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda} \quad (5-27)$$

ولابد هنا أن نشير إلى أن تسمية المجموعة الموجية غير مناسبة تماماً إذا كانت المجموعة مؤلفة من موجتين فقط إذ أن التسمية تكون أفضل للمجموعة إذا كانت مؤلفة من عدد كبير من الموجات .

ورغم أن هذه النتائج استخلصناها من تركيب موجتين فقط إلا أنها صحيحة تماماً لأي مجموعة مركبة من أي عدد من الموجات ، فعندما يكون لدينا مجموعة مؤلفة من عدد كبير من الموجات فعندئذ نختار أقصر وأطول موجتين من المجموعة ونتعامل معهما بالأسلوب السابق نفسه وننوصل إلى نتائج تمثل بدقة كافية السلوك الجماعي للمجموعة الموجية ، أما إذا كانت المجموعة مؤلفة

من ما لانهاية من الموجات فعندها نحتاج إلى استخدام رياضيات متقدمة تشمل على نظرية تحويلات فوريير التي تقع خارج نطاق دراستنا .

15-5 سرعة الموجات الصوتية في الأوساط المختلفة :

إن الموجات الصوتية هي موجات طولية (أي موجات تضاغطية) في أي وسط مادي وإن سرعة هذه الموجات c في المائع (سائل أو غاز) تعطى بالمعادلة :

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (5-28)$$

حيث أن ρ هي كثافة المائع و K هو معامل المرونة الحجمي ويعطى بالعلاقة :

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta V/V} \quad (5-29)$$

حيث أن ΔV هو مقدار التغير في الحجم V الذي يسببه تغير في الضغط قدره Δp

وفي الغازات التي تخضع لعملية كظومة (adiabatic) تكون :

$$K = \gamma P \quad (5-30)$$

حيث أن P هو ضغط الغاز و γ هي النسبة بين السعة الحرارية للغاز تحت ضغط ثابت إلى السعة الحرارية للغاز تحت حجم ثابت وقيمة γ تعتمد على عدد درجات الحرية لجزيء الغاز وهذا يعتمد بدوره على درجة تعقيد الجزيء ، فالغازات الأحادية الذرة تكون قيمة $\gamma = 1.66$ والغازات الثنائية الذرة تكون قيمة $\gamma = 1.40$ والغازات الثلاثية الذرة تكون قيمة $\gamma = 1.29$ وهو الهواء الجوي الذي معظم مكوناته غازات ثنائية الذرة تكون قيمة $\gamma = 1.40$.

وبما أن السوائل صعبة الانضغاط (K كبيرة) لذلك فإن سرعة الصوت فيها (C) كبيرة بالمقارنة مع سرعة الصوت في الغازات .

إن سرعة الموجات الطولية في المواد الصلبة تعتمد على إبعاد الجسم الصلب الذي تمر خلاه الموجة التضاغطية .

إن مرور مثل هذه الموجة في أي وسط يحدث تضاغطاً في يصاحبها قوة قص ولما كان الوسط الصلب بخلاف المواقع (السوائل والغازات) يبدي مقاومة لقوى القصبية أو المماسية لذلك يحدث في الوسط الصلب موجات طولية بالإضافة إلى الموجات المستعرضة ، فإذا كان الجسم الصلب على شكل قضيب معدني رقيق محدود المقطع العرضي فإن تأثير التشوه المستعرض يكون معقداً جداً وغاية في الصغر ويمكن إهماله وعليه تكون سرعة الموجات الطولية C في القضيب الصلب هي :

$$C = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (5-31)$$

حيث Y هو معامل المرونة الطولي (معامل يونغ) و ρ هي كثافة مادة القضيب .
أما في الأجسام الصلبة الممتدة فإن تأثير التشوه المستعرض لا يمكن إهماله وعليه يجب أن نأخذ بالحسبان كلاً من الموجتين الطولية والمستعرضة .
إن سرعة الموجات الطولية C_L في الجسم الصلب الممتد إلى مالا نهاية في جميع الاتجاهات تتوقف على معامل الصلاة n كما على معامل المرونة الحجمي K أي أن :

$$C_L = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}n}{\rho}} \quad (5-32)$$

حيث أن ρ هي كثافة مادة الجسم الصلب ولدينا العلاقات بين معاملات المرونة :

$$n = \frac{Y}{2(1+\sigma)}$$

$$K = \frac{Y}{3(1-2\sigma)}$$

وبالتعويض n و K في المعادلة (32-5) نجد أن سرعة الموجات الطولية في الجسم الصلب الممتد هي :

$$C_L = \sqrt{\frac{Y(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

حيث أن σ هي نسبة بواسون وتساوي 0.25 لمعظم المواد الصلبة . وسرعة الموجات المستعرضة C_T في الأجسام الصلبة الممتدة تتوقف على معامل القص n أي أن :

$$C_T = \sqrt{\frac{n}{\rho}}$$

ولكن :

$$n = \frac{Y}{2(1+\sigma)}$$

لذلك فإن :

$$C_T = \sqrt{\frac{Y}{2\rho(1+\sigma)}}$$

إن الموجات التضاغطية (الطولية) وال WAVES الموجات القصبية المستعرضة يمكن أن تتقى في الأوساط الصلبة الممتدة إلى ما لا نهاية على شكل موجات مستوية أو كروية أو اسطوانية

إن النسبة بين سرعة الموجة الطولية C_L إلى سرعة الموجة المستعرضة C_T يمكن إيجادها بدلالة نسبة بواسون فقط .

$$\frac{C_L}{C_T} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{(1-2\sigma)}}$$

ولما كانت قيمة σ أقل من واحد لذلك نستنتج أن سرعة الموجة الطولية أكبر دائمًا من سرعة الموجة المستعرضة .

إن سرعة الموجات التضاغطية في معظم المعادن المهمة تتراوح بين 4000 م/ثا و 6000 م/ثا وفي بعض المواد ذات الصلابة العالية تكون السرعة أكبر .

وهكذا يتضح أن سرعة الموجات الصوتية في المواد الصلبة أكبر بشكل ملحوظ مما هي في المواد السائلة ، والغازية .

16-5 العوامل المؤثرة في سرعة الموجة الصوتية في الهواء :

يعد الهواء واحداً من أهم الأوساط المادية لانتقال الموجات الصوتية وهناك جملة من العوامل المؤثرة في سرعة انتقال الموجة الصوتية في الهواء وهي :

-1 تأثير تغير الضغط على سرعة الصوت :

إن سرعة تقدم الموجة الصوتية في الهواء لا تتأثر إذا تغير ضغط الهواء ، وذلك لأن أي تغير في ضغط كتلة معينة من الهواء يولد تغيراً مماثلاً في حجم الهواء ، إذا كان حجم الهواء V وكتلته m فعندئذ تكون كثافته ρ هي :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5-36)$$

وطبقاً لقانون بويل إذا كان لدينا كتلة معينة من الغاز تحت درجة حرارية ثابتة فإن :

$$pV = \text{مقدار ثابت} \quad (5-37)$$

حيث p هو ضغط الهواء .

وبتعويض V من (5-36) في (5-37) نحصل على :

$$\frac{pm}{\rho} = \text{مقدار ثابت}$$

أو :

$$\frac{p}{\rho} = \text{مقدار ثابت آخر}$$

وهذا يعني أنه إذا تضاعف ضغط الغاز فإن كثافته تتضاعف أيضاً وبذلك

تبقى النسبة $\frac{p}{\rho}$ ثابتة ، ولما كانت سرعة الصوت c هي :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$$

لذلك فإن سرعة الصوت في الهواء أو أي غاز لا تعتمد على تغيرات الضغط بشرط بقاء درجة الحرارة ثابتة .

2- تأثير تغير درجة الحرارة على سرعة الصوت :

لدينا سرعة الصوت في الهواء أو أي غاز هي :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$$

ولكن المعادلة العامة للغاز (إذا كان مثاليّاً) هي :

$$PV = \frac{n}{M} RT \quad (5-38)$$

حيث n هي كتلة الغاز R الثابت العام للغاز و T درجة الحرارة المطلقة للغاز و الوزن الجزيئي للغاز من هذه المعادلة نحصل على :

$$p = \frac{m}{V} \frac{RT}{M} = \rho RT / M$$

نعرض في معادلة سرعة الصوت فنجد أن :

$$c = \sqrt{\gamma RT / M}$$

ولكن γ و R و M ثوابت لأي غاز معين لذلك فإن :

$$c = k \sqrt{T} \quad (5-39)$$

حيث k هو مقدار ثابت ويساوي $\sqrt{\gamma R / M}$:

ولذلك فإن سرعة الصوت في أي غاز تتناسب طرداً مع الجذر التربيعي لدرجة الحرارة المطلقة لذلك الغاز .

وإذا فرضنا أن سرعة الصوت في درجة الصفر سيلزيوس هي C_0 فإن المعادلة (5-39) تصبح :

$$C_0 = k\sqrt{273} \quad (5-40)$$

وإذا فرضنا أن سرعة الصوت في درجة الحرارة سيلزيوس هي c فإن المعادلة (5-39) تصبح :

$$C_t = k\sqrt{273 + t} \quad (5-41)$$

وبتقسيم (5-41) على (5-40) نحصل على :

$$\frac{C_t}{C_0} = \sqrt{\frac{273 + t}{273}} = \left(1 + \frac{t}{273}\right)^{1/2}$$

وبفك القوس باستخدام نظرية ذات الحدين نحصل على :

$$\frac{C_t}{C_0} = 1 + \frac{1}{546}t$$

لذلك فإن :

$$C_t = C_0 \left(1 + \frac{t}{546}\right)$$

وإذ افترضنا أن سرعة الصوت في الهواء في درجة الصفر هي 322 م/ثا فإن :

$$C_t = 322 \left(1 + \frac{t}{546}\right)$$

$$C_t = 322 + 0.611t \quad (5-42)$$

الحد الأول في الطرف الأيمن يمثل سرعة الصوت في درجة الصفر سيلزيوس بينما الحد الثاني يمثل الزيادة في سرعة الصوت إذا ازدادت درجة الحرارة بمقدار t .

ومن ذلك نستنتج أن مقدار الزيادة في سرعة الصوت عندما تزداد درجة الحرارة بمقدار واحد درجة سيلزيوس = 0.61 m/s .

3 - تأثير تغير الرطوبة في سرعة الصوت :

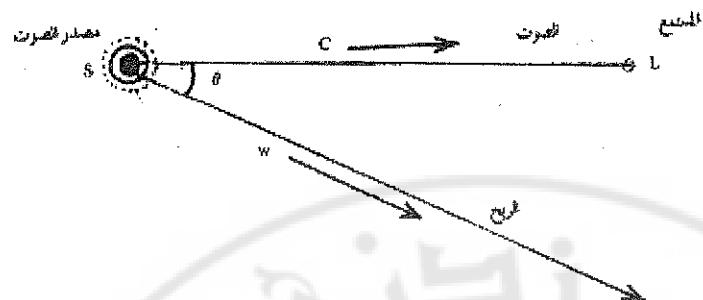
من المعلوم أن كثافة بخار الماء تحت الشروط القياسية من ضغط ودرجة حرارة تساوي 0.0008 g/cm^3 ($\frac{18}{22400} \text{ g/cm}^3$) بينما كثافة الهواء الجاف بالشروط نفسها هي 0.001293 g/cm^3 لذلك فإن كثافة البخار أقل من كثافة الهواء الجاف ، وعليه فإن الهواء الرطب يجب أن تكون كثافته أقل من كثافة الهواء الجاف .

وبما أن سرعة الصوت تزداد كلما قلت كثافة الوسط ، لذلك فإن سرعة الصوت في الهواء تزداد مع ازدياد رطوبته ، على افتراض أن قيمة γ ثابتة عملياً للهواء الجاف كما للهواء المشبع ببخار الماء .

4 - تأثير الريح في سرعة الصوت في الهواء :

عندما تهب الريح بسرعة W باتجاه تقدم الصوت نفسه فإن سرعة الصوت تزداد وتصبح محسنة سرعته $(c + W)$ ولكن إذا كانت الريح تهب باتجاه معاكس لاتجاه تقدم الصوت فإن سرعة الصوت تقل وتصبح محسنة سرعته $(c - W)$.

أما إذا كانت الرياح تهب باتجاه يصنع زاوية θ مع اتجاه انتقال الصوت كما هو مبين في الشكل (5) .



الشكل (5) يبين اتجاه حركة الموجة الصوتية واتجاه حركة الريح

فإن مركبة سرعة الريح باتجاه $W \cos \theta = SL$ وهذه المركبة تضاف إلى السرعة c وعليه فإن الصوت ينتقل بالاتجاه SL بمحصلة سرعة تساوي $(c + W \cos \theta)$ ولذلك فإن الصوت يتحرك أسرع إذا كانت الزاوية θ حادة . ويكون أبطأ إذا كانت الزاوية θ منفرجة . ولا يكون للريح تأثير في سرعة الصوت إذا كانت $\theta = 90^\circ$ أو عندما تهب الريح عمودية على اتجاه تقدم الصوت . إذا كانت الريح تهب بنفس اتجاه انتقال الصوت فإن $\theta = 0^\circ$ وبذلك تصبح سرعة الصوت $(c + W)$. أما إذا كانت الريح تهب بعكس اتجاه انتقال الصوت فإن $\theta = 180^\circ$ وبذلك تصبح سرعة الصوت $c - W$

5- تأثير تردد الطول الموجي في سرعة الصوت :

إن سرعة الصوت c في الهواء لا تعتمد على تردد الصوت f أو طوله الموجي λ وذلك لأن :

$$c = f\lambda \quad \text{مقدار ثابت}$$

وتكون سرعة الصوت في الهواء ثابتة طالما كانت خواص الهواء ثابتة .

6- تأثير السعة في سرعة الصوت في الهواء :

إن سرعة الصوت في الهواء لا تتوقف على السعة ما لم تكن السعة كبيرة جداً . وفي الأصوات الاعتيادية حيث السعة صغيرة تكون سرعة الصوت ثابتة

وهي سرعته الاعتيادية في الهواء . أما في حالة الأصوات الشديدة الناتجة من المدفعية أو الانفجارات حيث السعة كبيرة فإن الصوت يتقدم بسرعة أكبر من سرعته الاعتيادية .

17-5 طرائق إيجاد سرعة الصوت في الأوساط المختلفة :

هناك عدة طرق لقياس سرعة الصوت في الأوساط الغازية والسائلة والصلبة وسنكتفي بذكر أهم تلك الطرق ، ثم نشرح بالتفصيل الطرق العملية فقط ، تلك التي يمكن إجراؤها في المختبر .

1- الطرائق المباشرة لإيجاد سرعة الصوت :

وهذه الطرائق ذات أهمية تاريخية وقد تطورت هذه الطرق منذ القرن السابع عشر حيث كانت المحاولات الأولى لإيجاد سرعة الصوت بطريقة إطلاق المدفعية على مسافة بعيدة وقياس الفترة الزمنية بين رؤية الومض وسماع الصوت بواسطة ساعة توقيت .

وبتقسيم المسافة التي يقطعها الصوت على الفترة الزمنية التي يستغرقها أمكن قياس سرعته وهذه السرعة تعتمد على الظروف الجوية والأخطاء الشخصية . وفيما بعد تم قياس الفترات الزمنية التي يستغرقها الصوت لقطع نفس المسافة في اتجاهين متوازيين وبذلك تم التخلص من الخطأ الناجم من حركة الهواء . وقد تمكن رينولت فيما بعد من تحسين هذه الطريقة وذلك باستخدام دارة كهربائية تعمل على قياس الفترة الزمنية بين لحظة إطلاق المدفع ولحظة استلام الصوت وبذلك تمكن من تقليل الأخطاء البشرية المصاحبة لقياس . وقد تطورت الوسائل المستخدمة في هذه الطريقة وبذلك ازدادت دقتها، إلا أنها لم تكن عملية لأنها تحتاج إلى مسافات طويلة في الهواء . وظروف جوية ثابتة .

2- الطرق غير المباشرة لإيجاد سرعة الصوت :

لقد تطورت وتعددت طرق إيجاد سرعة الصوت في الأوساط الغازية والسائلة والصلبة . وقد تميزت هذه الطرق بدقتها وأهم هذه الطرق هي :

- أ- طريقة هب .
- ب- طريقة بيرس .
- ج- طريقة كاي وشيرات .
- د- طريقة كندت .
- هـ - طريقة أنبوب الرنين في عمود الهواء .

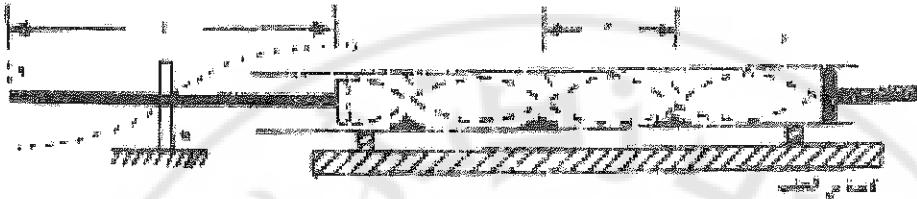
وستقف هنا عند طريقتين ، هما : طريقة كندت وطريقة أنبوبة الرنين . وذلك لأهميتهما في قياس سرعة الصوت ، فطريقة كندت مختبرية سهلة وصالحة لإيجاد سرعة الصوت في المواد الغازية والسائلة والصلبة . أما طريقة أنبوبة الرنين فهي تقييد في إيجاد سرعة الصوت في الهواء .

طريقة كندت :

تمتاز هذه الطريقة بدقتها وسهولتها وبساطة أجهزتها . ويتالف جهاز كندت المبين في الشكل (6) من أنبوبة زجاجية مفتوحة الطرفين T تدعى بأنبوبة الرنين ، طولها حوالي $2m$ وقطرها حوالي $5cm$ وتنستد على قاعدة من الخشب .

في الطرف الأيسر قضيب منتظم من المعدن أو الزجاج AB طوله حوالي $1m$ وممسوك من منتصفه بإحكام بمسند ثابت B ويثبت في نهاية القضيب الواقعة داخل الأنبوبة قرص معدني دائري الشكل D . قطر هذا القرص أقل بمقدار ضئيل من قطر الأنبوبة لكي يسهل اهتزازه طولياً على امتداد الأنبوبة دون أن يلامسها من الداخل . والطرف الآخر من الأنبوبة يزود بمكبس متحرك P يسهل تحركيه داخل الأنبوبة للتحكم بطول عمود الهواء المحصور

بين المكبس P والقرص D . ويجب أن يكون الجهاز بكماله مثبتاً بإحكام على مسند صلب لتجنب أي رجة أو هزة عنيفة قد تؤدي إلى كسر الأنبوة الزجاجية في أثناء إجراء التجربة .



الشكل (6) جهاز كندت

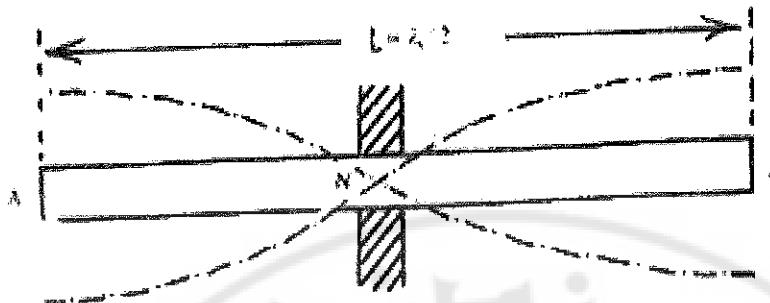
طريقة العمل :

يجب أن تكون الأنبوة الزجاجية جافة تماماً ومتثبة بوضع أفقي ، يذر على امتدادها من الداخل طبقة رقيقة من مسحوق الليكوبوديوم الجاف (أو أي مسحوق آخر خفيف كبرادة الفلين مثلاً) .

يسحب القضيب على طوله من طرفه الحر . وذلك باستخدام قطعة قماش رطبة ، و في أثناء جر القطعة الرطبة تحنّك مع القضيب المعدنى وتثير فيه اهتزازات طويلة .

ولما كان القضيب مثبتاً من مركزه فإن منتصفه بعد عقدة (تضاغط) بينما طرفاه الحران A يعتبران بطينين (تخلخلين) وبذلك يتشكل موجة طولية واقفة على طول القضيب بطينين متتاليين مساوياً لنصف طول الموجة الصوتية λ خلال مادة القضيب أي أن:

$$\lambda = 2l$$



الشكل (7) يبين موجة طولية مستقرة في قضيب معدني طوله L ، العقدة N في منتصفه وفي طرفه بطون A عندما يهتز القضيب طولياً بتردد معين فإنه يسبب اهتزاز القرص D بنفس التردد .

ويلاحظ أنه عندما يهتز القضيب يبعث صوتاً ذا نغمة عالية . في أثناء ذلك يعدل موقع المكبس P ببطء حتى يبدأ مسحوق الليكوبوديوم بالاضطراب بشدة . وعندما يستمر القرص بالاهتزاز نلاحظ أن المسحوق يتجمع في موقع متناوبة ومتباعدة بانتظام وهذه الموضع تدعى بالعقد N حيث تكون فيها حركة المسحوق أقل ما يمكن ويتحقق ذلك عندما يحدث الرنين بين القضيب وعمود الهواء أي عندما يتساوى التردد الطبيعي للقضيب مع التردد الطبيعي لعمود الهواء (أو المائع) المحصور بين المكبس P والقرص D وبذلك يتشكل ما يعرف بالموجات الواقفة في عمود الهواء نتيجة تداخل الموجات المنبعثة من القرص المهتز مع الموجات المنعكسة من المكبس . والآن نقياس المسافة بين عدّة عقد منها تحسب متوسط المسافة الفاصلة بين عقدتين متتاليتين ولتكن d وهذه المسافة تساوي نصف طول الموجة في عمود الهواء الذي يهتز بتردد مقدار f وهو نفس تردد القضيب . والآن نحسب سرعة الصوت في الأوساط الصلبة والسائلة والغازية .

(أ) - سرعة الصوت في قضيب صلب :

من الواضح أن المسافة d بين عقدتين متتاليتين في عمود الهواء داخل الأنبوة يساوي نصف طول الموجة الصوتية في الهواء λ_a أي أن

$$d = \frac{\lambda_a}{2}$$

وإذا كانت سرعة الصوت في الهواء هي C_a وتردد f لذلك فإن :

$$C_a = f\lambda_a = 2fd \quad (5-43)$$

ولما كان القضيب يهتز طولياً وفي منتصفه عقدة لذلك فإن :

$$L = \frac{\lambda_s}{2}$$

حيث λ_s يمثل طول الموجة الصوتية خلال القضيب وإذا كانت سرعة الموجة الصوتية في القضيب هي C_s فعندئذ :

$$C_s = f\lambda_s = 2fL \quad (5-44)$$

يلاحظ من المعادلين (5-43) و (5-44) أن التردد f مشترك وهذا هو الحال دائماً في ظاهرة الرنين . وعليه نحصل من هاتين المعادلين على :

$$f = \frac{C_s}{2L} = \frac{C_a}{2d}$$

وإذا كانت سرعة الصوت في الهواء C_a معلومة ، فعندئذ يمكن بقياس L و d أن نحسب سرعة الصوت في القضيب من العلاقة :

$$C_s = C_a \frac{L}{d} \quad (5-45)$$

وبهذه الطريقة يمكن حساب سرعة الصوت في أي قضيب صلب سواء كان مصنوعاً من الحديد أو الزجاج أو الخشب أو النحاس ... الخ .

(ب) سرعة الصوت في السائل :

في هذه الحالة تملأ الأنبوة الزجاجية بالسائل المطلوب إيجاد سرعة الصوت خلاله وتنبدل برادة الحديد الناعمة بمسحوق الليكوبوروم، ونجد المسافة بين عقدتين متتاليتين ولتكن d' فعندئذ :

$$d' = \frac{\lambda_1}{2}$$

حيث λ_1 يمثل طول الموجة الصوتية في السائل . وإذا كانت سرعة الصوت في ذلك السائل هي C_1 فإن :

$$C_1 = f\lambda_1 = 2fd' \quad (5-46)$$

ولما كانت سرعة الصوت في الهواء هي :

$$C_a = f\lambda = 2fd \quad (5-47)$$

ومن المعادلتين الأخيرتين نحصل على :

$$C_1 = C_a \frac{d'}{d} \quad (5-48)$$

من هذه العلاقة نحصل على سرعة الصوت في السائل إذا كانت سرعة الصوت في الهواء معلومة .

(ج) سرعة الصوت في الغاز :

في هذه الحالة تفرغ الأنبوة من الهواء وتتملأ بالغاز المطلوب إيجاد سرعة الصوت خلاله . ومرة أخرى يهترقضيب طوليًّا وإذا كانت المسافة بين عقدتين متتاليتين هي d'' فإن :

$$d'' = \frac{\lambda_a}{2}$$

حيث λ_g يمثل الطول الموجي للصوت في الغاز . وإذا كانت سرعة الصوت في ذلك الغاز هي C_g فإن :

$$C_g = f\lambda_g = 2 fd''$$

ولما كانت سرعة الصوت في الهواء هي :

$$C_a = f\lambda_a = 2 fd$$

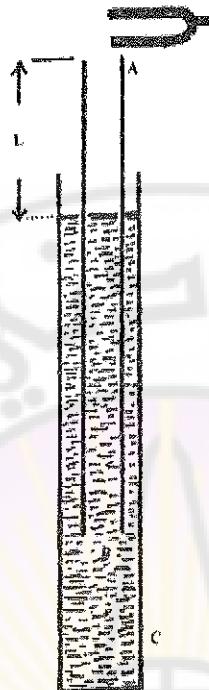
ومن المعادلتين الأخيرتين نحصل على :

$$C_g = C_a \frac{d''}{d} \quad (4-49)$$

ومنها يمكن مقارنة سرعة الصوت في الغاز مع سرعته في الهواء . وإذا كانت سرعة الصوت في الهواء معلومة فعندئذ يمكن حساب سرعة الصوت في أي غاز .

طريقة أنبوبة الرنين :

إن هذه الطريقة المألوفة هي من أبسط الطرق المختبرية لإيجاد سرعة الصوت في الهواء في درجة حرارة المختبر . والجهاز الرئيسي في هذه الطريقة هو عبارة عن أنبوبة متغيرة الطول ومغلقة من أحد طرفيها . ويمكن الحصول على مثل هذه الأنبوبة التي تدعى بأنبوبة الرنين كما هو مبين في



الشكل (8)

حيث تمثل AB أنبوبة مفتوحة الطرفين وتغمر جزئياً في ماء داخل الاسطوانة C ذات قطر داخلي أكبر من قطر أنبوبة الرنين .

إذا وضعت شوكة رنانة مهترئة بالقرب من الفتحة العليا لأنبوبة الرنين فإن رنينا سوف يحدث عندما يتساوى تردد الشوكة الرنانة مع تردد عمود الهواء داخل أنبوبة الرنين . وهذا لا يتحقق إلا عند أطوال معينة لعمود الهواء . وللحصول على هذه الأطوال نبدأ عندما يكون طول عمود الهواء حوالي واحد سنتيمتر ، ونرفع الأنبوبة ببطء من الماء والشوكة مستمرة بالاهتزاز حتى نحصل على أقصى شدة للصوت المسموع وهذا يشير إلى حصول الرنين الأول ، وهذا يحدث عندما يكون طول عمود الهواء L فوق سطح الماء يساوي $\frac{\lambda}{4}$ وهذا يقابل التردد الأساسي لاهتزاز عمود الهواء .

والحصول على أفضل موقع للرنين يتلزمه عنية خاصة وذلك لأن اهتزاز عمود الهواء عند هذا التردد بالذات يتلاشى بشدة وبنفس الوقت فإنه يستجيب بسهولة لأي تردد آخر فضلاً عن تردد الشوكة الرنانة إذا كان ذلك التردد مساوياً أو مقارباً للتردد الأساسي . وعليه يجب أن يتكرر إجراء التجربة عدة مرات للحصول على متوسط طول عمود الهواء L . وإذا فرضنا أن الطول الموجي للنغمة التي تبثها الشوكة الرنانة هو λ فإن :

$$L = \frac{\lambda}{4}$$

وإذا كان تردد الشوكة الرنانة هو f فإن سرعة الصوت في الهواء C_a تعطى بالعلاقة :

$$C_a = f\lambda = 4fL$$

وعليه إذا كان تردد الشوكة الرنانة معلوماً يمكن حساب سرعة الصوت في الهواء في درجة حرارة الغرفة .

ولكن هنا يجب أن نشير أننا في هذه الحسابات افترضنا أن بطん الموجة الواقفة تقع تماماً عند الطرف المفتوح للأنبوبة . ولكن هذا الافتراض غير صحيح بالضبط . وفي الحقيقة فإن البطن تقع خارج فتحة الأنابيب وعليه يجب أن نجري تصحيحاً مناسباً بأخذ بالاعتبار هذا الخطأ ومثل هذا التصحيح يدعى بالتصحيح الطرفي .

ولقد أمكن تحديد مقدار هذا التصحيح بطريقة تجريبية ، ووجد أن البطن تقع على بعد من الطرف المفتوح يساوي تقرباً $10/3$ من قطر الأنابيب . فإذا رمزنا لمقدار التصحيح الطرفي بالرمز e ولقطر أنبوبة الرنين D فإن :

$$e = 0.3D$$

وعليه يصبح الطول الفعلي (L') لعمود الهواء المقابل للتردد الأساسي هو :

$$L' = L + e = L + 0.3D$$

وفي الواقع يمكن بسهولة التخلص كلياً من التصحيح الطرفي في حساباتنا ، وذلك بإيجاد موقع الرنين الثاني في الأنبوة وهذا يقابل التردد التوافقي الأول . وبذلك نحصل في موقع الرنين الأول على :

$$L_1 + e = \frac{\lambda}{4} \quad (5-50)$$

بينما في موقع الرنين الثاني نحصل على :

$$L_2 + e = \frac{3}{4}\lambda \quad (5-51)$$

وبطرح المعادلة (5-51) من (5-50) نجد أن :

$$L_2 - L_1 = \frac{\lambda}{2} \quad (5-52)$$

وهكذا نحصل على الطول الموجي للصوت الناتج من الشوكة الرنانة وإذا علمنا مقدار ترددتها أمكن حساب سرعة الصوت في الهواء في درجة حرارة الغرفة :

$$C_a = 2(L_2 - L_1)f \quad (5-53)$$

ومن الواضح أنه يمكن الحصول على موقع عديدة للرنين عندما يكون الطول الفعال لعمود الهواء داخل الأنبوة مساوياً لـ $\frac{5\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{\lambda}{4}, \dots$ الخ وهذه تقابل على الترتيب التردد الأساسي والترددات التوافقية الأخرى .

18-5 الخواص الموجية للصوت :

إن الخواص الموجية للصوت مألوفة ويسهل ملاحظتها في حياتنا اليومية بينما الخواص الموجية للضوء تحتاج إلى تجارب في غاية الدقة لإظهارها . وأهم الخواص الموجية للصوت هي :

- 1- الانكسار .

- الانعكاس .
- التداخل .
- الانزراخ .
- الاستطارة .

وستنعرض باختصار شديد كل خاصية من هذه الخواص .

انكسار الصوت :

إن الموجات الصوتية تكسر عندما تنتقل من وسط إلى آخر بنفس أسلوب انكسار الموجات الضوئية . وهذا ناتج من اختلاف سرعة الصوت في الوسطين المختلفين .

وفي الحقيقة عندما تتحرك موجة صوتية في وسط وتقابل وسط آخر فإن جزءاً من الطاقة ينكسر في الوسط الثاني وجزء يمتصه الوسط ويتحول من طاقة صوتية إلى طاقة حرارية والجزء الآخر ينعكس عائداً إلى نفس الوسط الأول . ومقدار الجزء المنكسر يعتمد على الكثافة النسبية للوسطين وزاوية السقوط .

انعكاس الصوت :

عندما تقابل الموجات الصوتية وسطاً أكثر كثافة من الوسط الذي كانت تتحرك فيه فإنها ترتد في اتجاهها وتتعكس إلى الوسط الأول الذي كانت به وبينس الوقت فإنها تعاني تغيراً في الطور . وتتبع الموجات الصوتية عندما تتعكس نفس القوانين الاعتيادية للانعكاس التي تخضع لها الموجات الضوئية . وشدة الموجة المنعكسة تعتمد على شدة الموجة ال ساقطة وزاوية السقوط وطبيعة السطح العاكس .

إن خاصية انعكاس الصوت تلعب دوراً هاماً في العديد من الظواهر المألوفة مثل :

الصدى والتردید في الأبنية والنغمة الموسيقية المسموعة عند وضع محارة قرب الأذن . وما الموجات الواقفة في أي جسم مهتر إلا إحدى نتائج الانعکاس .

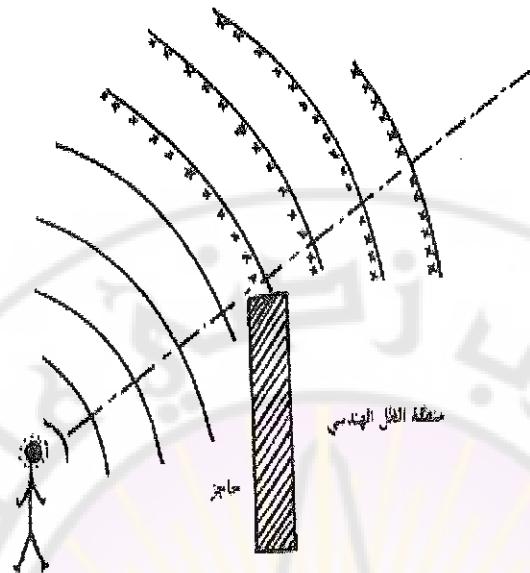
تدخل الموجات الصوتية :

هو التعبير العلمي الذي يشير إلى التأثيرات الفيزيائية الناتجة عند تراكب موجتين أو أكثر .

ظاهرة الانعراج:

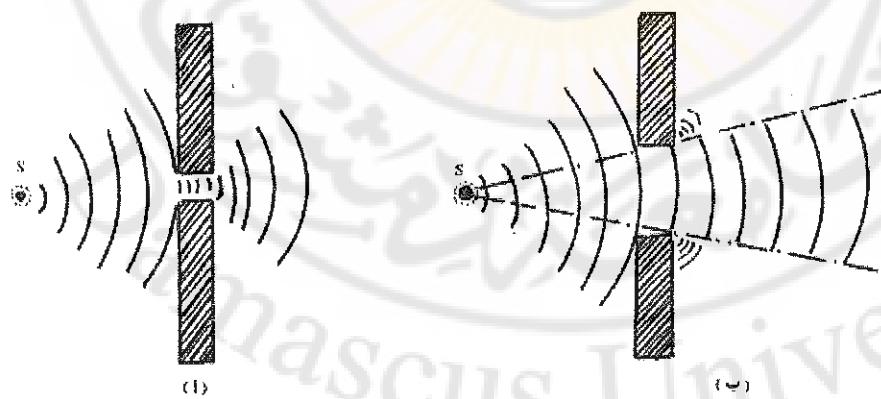
إن ظاهرة الانعراج تعني أن الموجات الصوتية تتحنى حول العوائق التي تعرّضها وتدخل منطقة الظل الهندسي . وخير مثال على ذلك أنه تسمع صوت شخص يناديك من وراء حاجز دون أن تراه وهذا يعني أن الموجات الصوتية تحيد عن مسارها عند حافة الحاجز وتدخل منطقة الظل الهندسي كما هو مبين في الشكل (9) وهكذا يتضح أن الموجات الصوتية تغير اتجاه تقدمها عندما تجده عائقاً في طريقها ، وظاهرة الحيوانات مألوفة واضحة في الصوت بينما هي ليست كذلك في الضوء بسبب أن طول الموجة الصوتية كبير جداً بالمقارنة مع طول الموجة الضوئية . وأن مقدار الانعراج (أو الانعطاف) حول العائق يزداد مع ازدياد الطول الموجي وعليه فإن الصوت العالي التردد يعطي ظلاً أكثر حدة من الصوت المنخفض التردد وظاهرة الحيوانات يمكن تفسيرها على أساس قاعدة هويكنز التي تنص على أن أي نقطة في جبهة الموجة يمكن عدها مصدراً جديداً لموجات ثانوية .

ويمكن توضيح ذلك بوضع مصدر 5 أمام حاجز فيه فتحة صغيرة ذات أبعاد صغيرة بالمقارنة مع الطول الموجي للصوت الصادر من المصدر . فنلاحظ أن الثقب الصغير يصبح مركز لموجات كروية كما هو مبين في الشكل (10 - أ) . أما إذا كانت الفتحة كبيرة كما في الشكل (10 - ب) فإن الموجة تمر خاللها دون أن يعاني الجزء الأكبر



الشكل (9) يبين ظاهرة الحيوذ حول حافة حاجز

من جبهة الموجة أي تغير إلا عند الحافات حيث يحد جزء من الموجة نحو الظل الهندسي بمقدار يتناسب على إبعاد الفتحة والطول الموجي . وقد وجد أن تأثير الحيوذ يقل كلما ازدادت أبعاد الفتحة بالمقارنة مع الطول الموجي . إن موجات الصوت تحيد عن مسارها ولا تتعكس تماماً عندما تسقط على جسم عاكس أبعاده مقاربة للطول الموجي .



الشكل (10)

ظاهرة الاستطارة :

إن الموجات الصوتية تنتشر في جميع الاتجاهات عندما تسقط على حاجز ذات أبعاد صغيرة بالمقارنة مع الأطوال الموجية وسعة الموجات المنتشرة على مسافات بعيدة من الحاجز تتناسب طرداً مع حجم الحاجز وعكسياً مع مربع الطول الموجي . وعلى هذا الأساس فإن الموجات القصيرة يكون انتشارها أكبر من الموجات الطويلة .

5- ظاهرة دوبлер :

لقد اكتشف العالم النمساوي كريستيان جون دوبлер (1803-1853) في عام 1842 أن لون أي جسم مضيء يجب أن يتغير إذا كانت هناك حركة نسبية بين الجسم والمشاهد ، وقد تبين أن تردد الصوت يتغير إذا كانت هناك حركة نسبية بين المصدر والمستمع وتسمى هذه الظاهرة ، التي تعرف باسم ظاهرة دوبлер ، على جميع الموجات بصورة عامة .

و قبل أن نطبق هذه الظاهرة على الموجات الصوتية دعنا نعطي مثالاً صوتياً ملوفاً . إذا كنت واقفاً في محطة وكانت هناك قاطرة سريعة قادمة من بعيد نحو المحطة مطلقة صفيرًا مستمراً فإنك سوف تلاحظ ظاهرة غريبة وهي عدم ثبوت درجة صوت صفارة القاطرة . فتردد الصفارة أثناء اقترابها يبدو أعلى من ترددتها عندما تكون قد مررت بك وأخذت بالابتعاد .

وهكذا يتضح أن درجة الصوت تتغير عندما تكون هناك حركة نسبية بين المصدر والمستمع . فعندما يقترب المصدر من المستمع أو عندما يقترب المستمع من المصدر أو عندما يقترب كل منهما من الآخر فإن درجة الصوت المسموع تبدو أعلى من درجة الصوت الفعلية التي يولدها المصدر .

وبالمثل عندما يبتعد المصدر عن المستمع أو عندما يبتعد المستمع عن المصدر ، أو عندما يبتعد كل منهما عن الآخر فإن درجة الصوت المسموع تبدو

أخفض من درجة الصوت الفعلية التي يولدها المصدر أن تأثير دوبлер في الصوت غير متماثل . فعندما يقترب المصدر من السامع بسرعة معينة فإن درجة الصوت تبدو مختلفة عن الحالة التي يقترب فيها السامع من المصدر فإن درجة الصوت تبدو مختلفة عن الحالة التي يقترب فيها السامع . أما في حالة الضوء فإن تأثير دوبлер متماثل .

وبصورة عامة فإن تأثير (أو ظاهرة) دوبлер في الصوت تحدث عندما يكون هناك حركة نسبية بين كل من :

- (أ) مصدر الموجة الصوتية .
- (ب) الوسط الناقل للموجة .
- (ج) المستقبل الذي يستلم الموجة .

و سنحاول الآن إيجاد الصيغة العامة التي تحدد مقدار هذا التأثير في الصوت . و قبل البدء في العملية التحليلية للاشتغال يجدر بنا أن نوضح هذا التأثير وصفياً . لهذا الغرض نأخذ حالتين بسيطتين تماماً .

في الحالة الأولى نفرض أن كلاً من المصدر والوسط والمستقبل في حالة سكون تامة . ونفرض أن المصدر الصوتي صغير جداً ويهتز بتردد ثابت ويبعث موجات كروية كما هو مبين في الشكل (11) .

وبما أن الوسط الناقل للموجة الصوتية (الهواء عادة) متجلانس وساكن فإن الموجات المنبعثة من المصدر تنتقل بسرعة واحدة في جميع الجهات . ففي كل هزة للمصدر تتولد موجة ذات جبهة كروية يطابق مركزها موقع المصدر ذاته .

وبتكرار الاهتزاز تتولد موجات كروية متتالية تفصلها مسافات متساوية وذات مركز مشترك . وفي هذه الحالة فإن المستقبل A (أي السامع A) يستلم

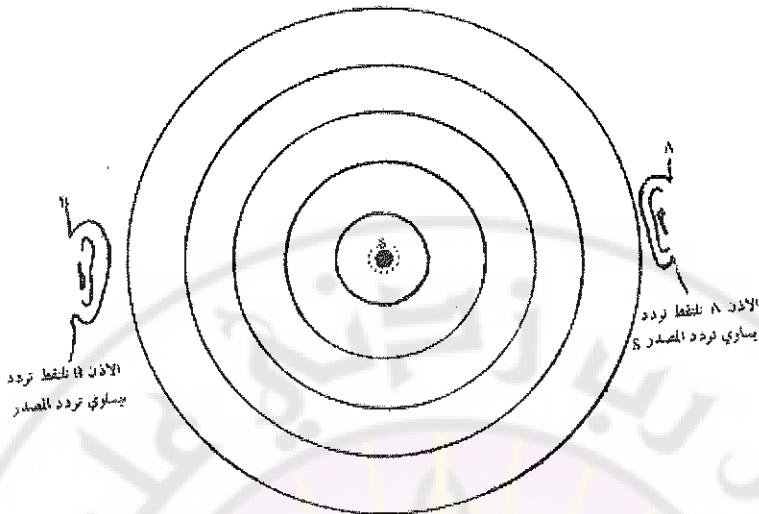
موجات صوتية بتردد يساوي التردد الحقيقي للمصدر S وكذلك المستقبل B (أي السامع B) يستلم موجات صوتية بتردد يساوي التردد الحقيقي للمصدر S .

وباختصار فإن تردد الصوت المسموع يساوي التردد الحقيقي للمصدر ومن ثم فإنه لا وجود لتأثير دوبلر في هذه الحالة.

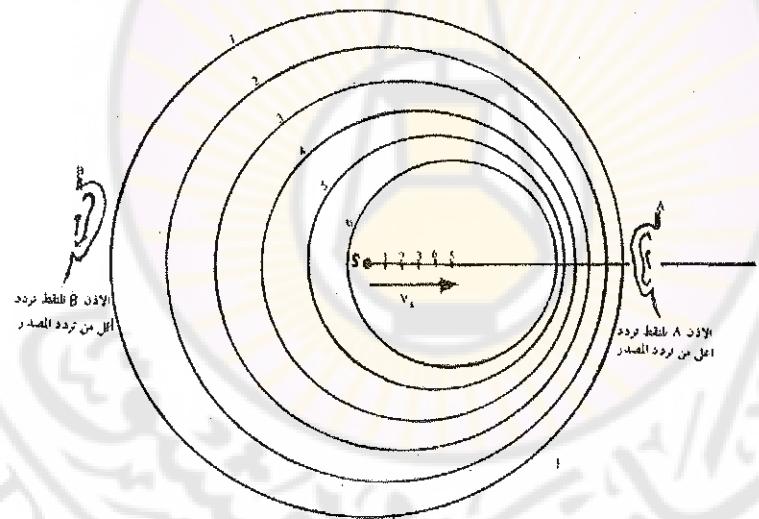
وفي الحالة الثانية نفرض أن المصدر S فقط يتحرك بسرعة منتظمة v إلى اليمين بينما الوسط والمستقبل في حالة سكون كما هو مبين في الشكل (12).

ويمكن تقسيم هذا الشكل على النحو التالي : عندما يكون المصدر في لحظة ما في الموقع (1) فإنه يبث موجة ذات جبهة كروية هي الجبهة (1) ، وفي اللحظة التالية بعد أن يتحرك المصدر إلى الموقع الجديد (2) فإنه يبث موجة كروية هي الجبهة (2) وهكذا تتولد جبهات كروية متتالية . وكل جبهة موجة هي عبارة عن كرة مركزها موقع المصدر الصوتي في لحظة انبعاث الموجة . ولما كان المصدر يتحرك نحو اليمين فإن مراكز الجبهات الكروية المتتالية التي يولدها المصدر تتحرك أيضاً .

وهكذا يظهر أن جبهات الموجة المتحركة نحو اليمين يتقارب بعضها من بعض ، بينما جبهات الموجة المتقدمة نحو اليسار يتبعض بعضها عن بعض وبذلك فإن السامع A الذي يقترب منه المصدر S يستلم موجات بتردد أعلى من التردد الحقيقي للمصدر ، بينما السامع B الذي يبتعد عنه المصدر S يستلم موجات بتردد أقل من التردد الحقيقي للمصدر .



الشكل (11) يبين مصدر صوتي S في وسط ساكن ويبيّث موجات صوتية بتردد ثابت الشخصان الثابتان B, A يسْتَلِمان الصوت المنبعث من المصدر وبالتردد نفسه



الشكل (12) يبيّن المصدر (S) يتحرك بسرعة منتظمة V_s نحو اليمين ويلاحظ أن مركز جبهة أي موجة كروية يطابق موقع المصدر في لحظة ابتعاث تلك الموجة فالموقع (1) هو مركز الجبهة الكروية (1) والموقع (2) هو مركز الجبهة الكروية (2) وهكذا ...

ولإيجاد العلاقة الكمية لتأثير دوبلر يجب أن نأخذ بالحسبان جميع الحركات . حركة المصدر وحركة الوسط وحركة المستقبل . ولسهولة الاشتغال فقط سنفرض أن جميع هذه الحركات منتظمة وفي اتجاه واحد وتقع على امتداد خط مشترك مواز للمحور السيني كما هو مبين في الشكل (13) .

نفرض أن :

$$V_s = \text{سرعة مصدر الصوت } S \text{ بالنسبة لمرجع ثابت (ولتكن الأرض)}$$

$$W = \text{سرعة الوسط الناقل للموجة (أي سرعة الهواء) بالنسبة للأرض}$$

$$C = \text{سرعة الصوت بالنسبة للهواء}$$

V_0 = سرعة السامع (0) أي سرعة المستقبل للموجة بالنسبة للأرض
والآن سنفترض فقط أجزاء من جبهات الموجة القريبة من الخط المشترك للحركة .

نفرض أن تردد المصدر (أي التردد الحقيقي للصوت الصادر من المصدر) هو f_s وأن الزمن الدوري لاهتزاز المصدر هو T حيث $T = \frac{1}{f_s}$ بعد مرور فترة زمنية T من إرسال جبهة الموجة (1) فإن المصدر يرسل جبهة الموجة (2) .
وخلال هذه الفترة الزمنية T فإن جبهة الموجة (1) تزاح بالنسبة للوسط بإزاحة مقدارها CT . ولكن الوسط ذاته يتحرك أيضاً بالنسبة للأرض بسرعة W لذلك فإن هذا يؤدي في الوقت نفسه إلى إزاحة جبهة الموجة (1) بالنسبة للأرض بإزاحة إضافية مقدارها WT .

وعليه فإن جبهة الموجة (1) تزاح بالنسبة للأرض بمقدار $(C + W) T$ خلال الفترة الزمنية T . وفي الوقت نفسه فإن المصدر يزاح عن موضعه الأول خلال الفترة الزمنية بإزاحة مقدارها $V_s T$ إلى الموضع الثاني حيث يرسل جبهة الموجة (2)
وعليه فإن المسافة الفاصلة بين الجبهتين (1) و (2) هي :

$$(C + W) T - V_s T = (C + W - V_s) T$$

ولكن هذه المسافة تمثل بالضبط الطول الموجي λ أي أن :

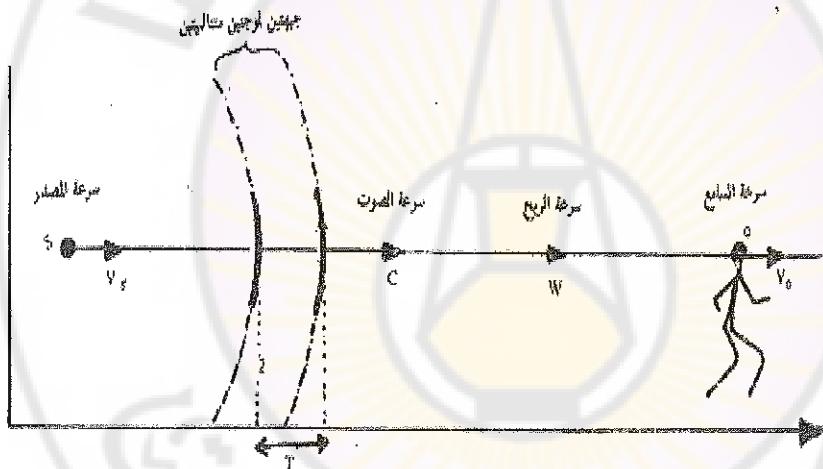
$$\lambda = (C + W - V_s)T \quad (5-54)$$

ولكن لدينا :

$$T = \frac{1}{f} \quad (5-55)$$

لذلك فإن :

$$\lambda = \frac{(C + W - V_s)}{f_s} \quad (5-56)$$



الشكل (13)

إن أجزاء جبهات الموجة المتحركة في الاتجاه الموجب على امتداد المحور السيني x والمقاسة بالنسبة للأرض تتحرك بسرعة $(C + W)$, ولكن سرعة المستقبل (أي السامع (o)) بالنسبة للأرض هي (V_0) لذلك فإن سرعة جبهات الموجة بالنسبة للسامع هي :

$$(C + W) - V_0 = C - (V_0 + W)$$

وينبغي أن نلاحظ هنا انه يجب أن تكون سرعة الصوت C بالنسبة للوسط (الهواء) أكبر من سرعة السامع بالنسبة للوسط ($V_0 - W$) وبذلك فإن سرعة جبهات الموجة $[C - (V_0 - W)]$ بالنسبة للسامع ستكون موجبة القيمة دائماً . وهذا يعني أن جبهات الموجة ستصل السامع وتتحرك بالنسبة له بقيمة مقدارها $[C - (V_0 - W)]$ وبعد أن تصل جبهة الموجة (1) للسامع فإن الزمن اللازم لوصول جبهة الموجة (2) للسامع هو T' . وهذا الزمن الفاصل بين وصول جبهتين متتاليتين المسافة بينهما λ . وهذا الزمن يمكن الحصول عليه من تقسيم λ من المعادلة (5-54) على السرعة $[C - (V_0 - W)]$ أي أن :

$$T' = \frac{1}{f_s} \left[\frac{C - (V_s - W)}{C - (V_0 - W)} \right] \quad (5-57)$$

فإذا افترضنا التردد الذي يستلمه السامع هو f_0 فإن :

$$f_0 = \frac{1}{T'} \quad (5-58)$$

وبذلك فإن تردد الموجة الذي يصل أدنى السامع هو :

$$f_0 = f_s \left[\frac{C - (V_0 - W)}{C - (V_s - W)} \right] \quad (5-59)$$

وهذه هي العلاقة العامة لتأثير دوبلر في حالة أخذ جميع السرع في اتجاه واحد . ولكي تكون هذه العلاقة صحيحة يجب أن تكون سرعة الصوت C أكبر من سرعة المصدر بالنسبة للوسط ($V_s - W$) . وعندئذ لا يمكن أن يكون المقام صفرأً وبذلك فإن f_0 لا يمكن أن تكون ما لانهاية . وكذلك لا يمكن أن يكون المقام سالباً وبذلك فإن f_0 لا يمكن أن تكون سالبة .

أما إذا كانت سرعة الوسط (أي سرعة الريح W) باتجاه معاكس فإن إشارتها تعكس وبذلك تصبح المعادلة الأخيرة كالتالي :

$$f_0 = f_s \left[\frac{C - (V_0 + W)}{C - (V_s + W)} \right] \quad (5-60)$$

وإذا كان الوسط ساكناً أي أن ($W = 0$) يصبح شكل المعادلتين الآخرين كالتالي :

$$f_0 = f_s \left[\frac{C - V_0}{C - V_s} \right] \quad (5-61)$$

وطبيعي أن هذه المعادلة صحيحة إذا كانت جميع السرع في اتجاه واحد . إن هذه المعادلات المعتبرة عن ظاهرة دوببلر تعد صحيحة في الصوت ولكنها ليست كذلك في الضوء .

ففي الصوت لا تكون الحركة النسبية للمصدر والمستمع هي التي تحدد التغير في التردد . فمن المعلوم أنه عندما تكون الحركة النسبية واحدة ، أي في حالة حركة المصدر فقط أو المستمع فقط بسرعة معينة فإننا نحصل على نتائج وصفية مختلفة تتوقف على ما إذا كان المصدر أو المستمع هو الذي يتحرك .

ويتتج هذا الفرق من أن V_0 وقد قيسنا بالنسبة إلى الوسط الذي تنتشر فيه الموجات الصوتية . كما أن الوسط يحدد سرعة هذه الموجات في حين لا يحتاج الضوء إلى وسط مادي ينتقل فيه ، كما أن سرعة الضوء بالنسبة إلى المصدر أو المشاهد هي دائماً مقدار ثابت ، بغض النظر عن حركة هذه الأجسام بعضها بالنسبة إلى بعض . وهذا هو الفرض الأساسي في النظرية النسبية الخاصة .

من هذا نجد أنه في حالة الضوء ليس هناك ما يؤدي إلى تغيرات فيزيائية سوى السرعة النسبية للمصدر بالنسبة للمشاهد ، إذ أنه ليس هناك وسط مادي يستخدم كمرجع ثابت .

وأخيراً يجب الإشارة أن هناك حالات كثيرة يتحرك فيها المصدر في الوسط بسرعة تزيد عن سرعة طور الموجة في هذا الوسط . في هذه الحالات تتخذ جبهة الموجة شكل مخروط رأسه عند الجسم المتحرك . ومن الأمثلة المألوفة هو موجة المقدمة لقارب سباق في الماء ، والموجة الراجحة (موجة الصدم) الناتجة من حركة طائرة أو قذيفة تتطلق في الهواء بسرعة تزيد عن سرعة الصوت في هذا الوسط .

أمثلة محلولة :

مثال (١) :

وجد أن منسوب الشدة لمصدر صوتي قدرته W واط في نقطة قياس على بعد معين من المصدر هي L ديسيل فإذا وضع مصدر صوتي آخر له القدرة نفسها ويجاور المصدر الأول فما هو منسوب الشدة الناتج من المصادر في نفس نقطة القياس ؟

الحل :

نفرض أن شدة الصوت في نقطة القياس الناتجة من تشغيل المصدر الأول = I لذلك فإن منسوب الشدة هو :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

حيث I_0 هي شدة الصوت المرجعية .

وفي حالة تشغيل المصدر الثاني المماثل للمصدر الأول فإن شدة الصوت في نقطة القياس الناتجة نفسها من تشغيل المصادر معاً = $2I$ ، وإذا فرضنا أن منسوب شدة الصوت في هذه الحالة = L' فعندئذ ينتج :

$$L' = 10 \log \frac{2I}{I_0} = 10 \log 2 + 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

ومنها نجد أن :

$$L' = L + 3$$

وهذه النتيجة تشير إلى أن هناك ارتفاعاً مقداره 3 ديسيل في حالة مضاعفة الشدة .

مثال (2) :

احسب مقدار التغير في منسوب شدة الصوت عندما تزداد شدة الصوت 10^6 مرة بقدر شدته الأصلية ؟

الحل :

نفرض أن الشدة الأصلية للصوت I_0 وأن الشدة النهائية للصوت $I = I_0 \cdot 10^6$ وعليه فإن الزيادة في منسوب الشدة

$$\text{الزيادة في منسوب الشدة} = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log_{10} 10^6 = 60 \text{ ديسيل}$$

مثال (3) :

موجتان صوتيتان لهما التردد نفسه وشديتهما 10^{-16} و 10^{-12} واط لكل سم مربع .
فما هو الفرق بين منسوبي شديتهما ؟

الحل :

الشذتان المطلقتان للصوتين هما :

$$10^{-16} \text{ واط لكل سم مربع} = I_1$$

$$10^{-12} \text{ واط لكل سم مربع} = I_2$$

$$\text{منسوب شدة الصوت الأول} = 10 \log_{10} \frac{10^{-16}}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_0} = 10 \text{ ديسيل}$$

$$\text{منسوب شدة الصوت الثاني} = 10 \log_{10} \frac{10^{-12}}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_0} = 10 \text{ ديسيل}$$

$$\begin{aligned} \text{الفرق بين المنسوبين} &= 10 \log_{10} \frac{10^{-12}}{10^{-16}} - 10 \log_{10} \frac{10^{-16}}{I_0} \\ &= 40 = 10 \log_{10} 10^4 \end{aligned}$$

أسئلة الفصل الخامس

- 1- ميز بين التعريف الفيزيولوجي والتعريف الفيزيائي للصوت ؟
- 2- ما هو مدى الترددات المسموعة ؟ وهل هذا المدى ثابت لجميع الأشخاص ؟
- 3- ما اسم الأمواج التي ترددتها (أ) أقل من 20 هرتز (ب) أعلى من 20000 هرتز ثم بين كيف تحصل على مثل هذه الترددات .
- 4- هل يستطيع السامع أن يشخص ويحدد اتجاه أي مصدر صوتي بين مجموعة من المصادر تعمل سوية بالقرب من بعضها ؟
- 5- عرف قانون ويبير - فيختر ، ثم بين أهميته العملية .
- 6- ما الفرق بين الشدة والعلو ؟ وما هي العلاقة بينهما ؟
- 7- ما الفرق بين التردد والدرجة ؟ وهل هناك علاقة بينهما ؟
- 8- ما المقصود بنوعية الصوت ؟ وما هي العوامل التي تحدد نوعية الصوت ؟
- 9- ما مدى شدة الصوت المسموع ؟ وهل يتوقف ذلك على التردد ؟
- 10- ما هي الخواص التي تميز بين أصوات المرأة والرجل والطفل ؟
- 11- هل الأذن البشرية أكثر حساسية للتغيرات في التردد أم في الشدة ؟ ناقش كيف تتغير حساسية الأذن مع التردد ومع الشدة ضمن المدى المسموع ؟
- 12- وضح السبب الفيزيائي الذي يجعل درجة صوت النساء أعلى من درجة صوت الرجال .
- 13- هل تعتمد درجة الصوت على (أ) علو الصوت (ب) نوعية الصوت .
- 14- وضح لماذا تعد النغمة الموسيقية المسموعة التي يصاحبها توافقيات متعددة أغنى وأذب من النغمة النقية الأحادية التردد ؟

- 15- ما هو تأثير دوبلر ؟ ووضح على وجه الدقة هل يعني هذا التأثير تغيير في تردد المصدر المسموت أم تغيير في تردد الصوت المسموع ؟ ثم بين كيف يحدث هذا التغيير في التردد .
- 16- هل لقاعدة دوبلر تأثير على درجة الصوت المسموع ؟
- 17- كيف تميز بين صوتين لهما نفس العلو والدرجة وصادران من مصدرين مختلفين ؟
- 18- ما هي الصفات التي تمكنا من التمييز بين النغمات المنبعثة من الآلات الموسيقية المختلفة ؟ وإذا كانت هذه النغمات لها نفس الشدة والتردد فهل يمكن أن نميز بين هذه النغمات ؟ ووضح بالتفصيل .
- 19- ناقش تأثير كل من حركة (أ) السامع (ب) المصدر (ج) الوسط في إحداث ظاهرة دوبلر .
- 20- بين كيف يمكن أن تحدد قيمة كل مما يأتي :
- الشدة .
 - العلو .
 - الدرجة .
 - التردد .
 - النوعية .

ثم وضح فيما إذا كانت القيمة تحدد بالقياس الفيزيائي أم بالتقدير الذائي (أي التقدير الشخصي للسامع ذاته) .

- 21- عرف البيل ، الديسيbel ؟
- 22- ما هي الأسباب المسوجة لاستخدام الديسيbel كوحدة لقياس في الصوتيات ؟

23- هل الديسيبل وحدة قياس مطلقة أم نسبية ؟ اذكر ذلك ، ثم بين عند أي تردد تؤخذ القيمة المرجعية لضغط الصوت أو شدة الصوت . ثموضح لماذا .

24- ما هو الضجيج ؟ هل يمكن عد الصوت الموسيقي ضجيجاً ؟ متى يمكن ذلك ؟

25- وضح لماذا يسمع الشخص لضربات عندما يركض بين صافرتين تثثان نغمات لها نفس التردد ؟

26- ما هو التصحيح الطرفي في أنبوبة الرئتين ؟ وما هي العوامل التي تحدد مقداره ؟

27- ما هو التردد الأساسي في عمود الهواء المحصور داخل أنبوبة رئتين
(أ) مفتوحة الطرفين (ب) مسدودة الطرفين (ج) أحد الطرفين مفتوح والآخر مسدود .

28- عدد أنواع المصادر الصوتية في الفيزياء .

29- وضح بالتفصيل كيف تميز بين صوتين أحدهما ينبع من البيانو والآخر ينبع من العود في حالة عزف الآلتين نفس النغم ؟

30- ما هي العوامل التي تؤثر في سرعة الصوت في الهواء ؟

31- عدد طرق إيجاد سرعة الصوت في الجوامد والسوائل والغازات ، ثم اشرح هذه الطرق بالتفصيل .

32- هل تتوقف سرعة الصوت في الجوامد على إبعاد الجسم الصلب . ووضح ذلك .

33- وضح بالتفصيل مفهوم :

- سرعة الطور .
- سرعة المجموعة .
- سرعة الجسم .

وما هي العلاقة بين هذه السرع ؟

- 34- عرف الوسط المشتت للموجة . وبين أهميته بالنسبة لسرعة المجموعة .
- 35- وضح مفهوم كل من ظاهرتي الحيوان والاستمارة .
- 36- ما هي الموجة الراجحة ؟ ووضح كيف تحدث .
- 37- علل لما يستمع المشاهد إلى نغمتين بترددتين مختلفتين عند تحريك شوكة رنانة مهترئة ومثبتة في صندوق الرنين بسرعة نحو حائط ثابت .
- 38- ما هو تردد الصوت الذي يلقطه السامع في الحالات التالية :
 - (آ)- إذا كان المصدر فقط يتحرك مرة مقرباً من المستمع ومرة مبتعداً عن المستمع .
 - (ب)- إذا كان المستمع فقط يتحرك مرة مقرباً من المصدر ومرة مبتعداً عن المصدر .
 - (ج)- إذا كان كل من المصدر والمستمع يتحركان مرة يقتربان من بعضهما ومرة يبتعدان عن بعضهما .
- 39- شخص واقف ينتظر في موقف سيارات الأجرة لاحظ أن تردد النغمة المنبعثة من جهاز تتبعه سيارة متحركة بسرعة يهبط من 286 هرتز إلى 266 هرتز عندما تمر بالقرب منه ، من هذه الملاحظة تمكن الشخص من حساب سرعة السيارة . علماً أن سرعة الصوت في الهواء هي 340 متر / ثانية . ما هي القيمة التي يحصل عليها الشخص لسرعة السيارة ؟
- 40- قطاران يتحركان باتجاهين متوازيين على سكتين متوازيتين ويقتربان من راصد ساكن ويطلق كل منهما صافرته بتردد 350 هرتز أحد القطارين

يتحرك بسرعة 40 متر/ثا . فما هي السرعة التي يجب أن يتحرك بها القطار الآخر لكي يسمع الراسد 5 ضربات في الثانية ؟ علماً أن سرعة الصوت في الهواء 340 متر/ثانية .

41- التردد الظاهري للصوت الذي يسمعه راسد ثابت هو ضعف التردد الحقيقي للمصدر الصوتي المتحرك نحو الراسد . احسب سرعة المصدر .

42- سيارتان A و B تتحركان بسرعة واحدة مقدارها 100 كم/ساعة فإذا أطلقت السيارة A جهاز التببيه بتردد قدره 1000 هرتز . احسب التردد الظاهري الذي يسمعه ركاب السيارة B في :

- أ)- حالة اقتراب السياراتين من بعضهما على نفس الخط المستقيم .
- ب)- حالة ابعاد السياراتين عن بعضهما على نفس الخط المستقيم الوacial بينهما ؟



الفصل السادس

العين والضوء

1-6 معلومات موجزة عن طبيعة الضوء :

الضوء نوع من الطاقة كالطاقة الحرارية والكهربائية والأجسام المضيئة ، فالشمس مثلاً - ترسل إشعاعها لتأثير به العين مباشرة ، أو عن طريق انعكاس تلك الأشعة على الأجسام .

ويكون الضوء جزءاً من الطيف الكهرومطيسي ويقع في منطقة بين الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء . كما هو مبين بالجدول (1) .

(1) الجدول

1,4701	الثاليزرين	1,0003	الماء
1,5014	البنزين	1,3330	الماء
1,6277	كبريت الفحم	1,3614	النحيل
2,36	كبريت الراتك	1,3726	حixin الخصل
2,4173	الناس	1,4338	الفلورين

ويستهدف علم الضوء دراسة انتشار الضوء في الخلاء والأوساط المادية . والمادة هي منبع الضوء . وتدل التجربة على أن أي تغيير كهرومطيسي يطرأ على ذرة من ذرات المادة يجعل الذرة منبع أشعاع .

أما بخصوص طبيعة الضوء فقد أمكن تفسير جميع الظواهر والتجارب الضوئية بالنظريات القائلة بأن المنبع الضوئي يرسل فيما حوله " جسيمات " من الطاقة يطلق على كل منها اسم الفوتون ، ويواكتب الفوتون في حركته موجة كهرطيسية بسيطة يتناسب تواترها v مع طاقته W :

$$W = hv \quad (6-1)$$

حيث ترمز h إلى ثابت يسمى ثابت بلانك $planck$ وتعلق قيمته بالوحدات المستعملة للتعبير عن E ، v وهو يساوي في الجملة السعوية :

$$h = 6,62 \cdot 10^{-27}$$

وبتعبير آخر نقول إن للضوء مظاهر متكاملين :

المظاهر الجسيمي : ويتمثل بالفوتونات وهو يؤدي الدور الرئيسي في التفاعل العميق بين المادة والإشعاع .

المظاهر الموجي : ويتمثل بالموجة الكهرطيسية المواكبة للفوتون ، ويعود الدور الرئيسي في التفاعل بين الإشعاع والمادة .

إن أكثرية المنابع الضوئية ترسل أمواجاً كهرطيسية من تواترات مختلفة في أن واحد ، نقول عندئذ عن الضوء الصادر إنه مركب أو متعدد الألوان . وهذا مثلاً شأن الضوء الصادر عن الشمس والمصابيح الكهربائية .

أما إذا كانت جميع الأمواج الصادرة عن المنبع ذات تواتر واحد فنقول عن الضوء أنه بسيط أو وحيد اللون والسبب في هذه التسمية هو أن اختلاف اللون من ضوء لآخر هو في حقيقته اختلاف في قيمة التواتر .

6-2 سرعة انتشار الأمواج الضوئية . قرينة الانكسار المطلقة :

تدل القياسات وجميع التجارب على أن الأمواج الكهرومغناطيسية ، مهما كانت قيمة تواترها ، تنتشر في الخلاء بسرعة واحدة يرمز لها بـ C وقيمتها ، حسب أحدث القياسات تساوي (بالسنتيمتر في الثانية) :

$$C = 2,99793 \cdot 10^{10} \cong 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/sec}$$

أما في الأوساط المادية الشفافة فإن سرعة انتشار الضوء أصغر دوماً من سرعة انتشاره في الخلاء . فإذا رمزنا بـ V لسرعة انتشار الضوء في نقطة من نقاط وسط شفاف فإن النسبة :

$$n = \frac{C}{V} > 1 \quad (6-2)$$

هي دوماً أكبر من الواحد ، ونسميها قرينة الانكسار المطلقة للوسط المعتبر في النقطة المعتبرة .

وتتعلق قرينة الانكسار بعوامل عديدة ، منها ما يخص المادة ككتافتها ، بنيةها البلورية ، تركيبها الكيميائي (ومنها ما يخص الضوء نفسه) (التواتر) .

فمن ناحية الكثافة ρ تتغير قرينة الانكسار حسب دستور غلاستون .

$$\frac{n-1}{\rho} = K \quad (6-3)$$

حيث يمثل K كمية ثابتة تتعلق بالوسط . فإذا اختلفت كثافة الوسط من نقطة لأخرى فإن n تختلف تبعاً لذلك . ويمكن الاستفاده من هذا الدستور في معرفة علاقة n بدرجة حرارة الوسط t وعامل تمدد الحجمي K وذلك

$$\text{بإيدال } \rho \text{ بالعبارة } (\rho_0 \text{ الكثافة في الدرجة صفر مئوية}) \quad \rho_t = \frac{\rho_0}{1 + Kt}$$

فجده :

$$(n_t - 1)(1 + Kt) = \text{ثابت} \quad (6-4)$$

لأن الجداء Kt ثابت . ونرى أن قرينة الانكسار المطلقة تتناقص بتسخين المادة وتترافق بتبريدها .

ونذكر بهذه المناسبة أننا نقول عن الوسط أنه متجانس إذا كانت خواصه الفيزيائية لا تتغير كمياً من نقطة لأخرى فيه ، فسرعة الضوء ، وبالتالي قرينة الانكسار ، في وسط متجانس لها قيمة واحدة في جميع النقاط . وكثيراً ما تتعلق سرعة الضوء في الأوساط المتبلورة بمنحي الانتشار ، فتتغير تبعاً لذلك قرينة الانكسار من منحي لأخر . ونقول عن الوسط أنه متناوح إذا كان لسرعة الضوء فيه وبالتالي لقرينة الانكسار ، القيمة نفسها مهما كان منحي الانتشار .

وتدل التجربة على أن الموجة الكهرطيسية تحتفظ بقيمة توافرها N ، ومن

ثم بقيمة دورها :

$$T = \frac{1}{N}$$

عندما تمر من وسط آخر . فإذا رمزنا بـ λ_0 لطول الموجة في الخلاء وبـ λ لطولها في الوسط الشفاف كان لنا :

$$\lambda_0 = CT$$

$$\lambda = VT$$

وإذا قسمنا هاتين العلاقاتين طرفاً على طرف واستخدمنا من العلاقة (6-2) نجد :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (6-5)$$

وإذا تذكرنا أن $n < 1$ نرى أن طول الموجة في المادة أصغر من طولها في الخلاء وأنه يتناقص كلما كانت المادة أشد كسرًا أي كلما كانت n كبيرة.

وتدل التجربة فوق ذلك أن سرعة الضوء في المادة ، ومن ثم قرينة انكسارها ، تتعلق بتوانتر الموجة المنتشرة N (أو بتعبير آخر ، بطول الموجة في الخلاء

$$\lambda_0 = \frac{C}{N}$$

تسمى هذه الظاهرة تبديد الضوء المركب بمعنى أن الأمواج المختلفة الداخلة في تركيب الضوء تنتشر في الأوساط المادية بسرعات مختلفة .

ونورد فيما يلي قرائن انكسار بعض المواد المستعملة ، في درجة الحرارة 20 مئوية ومن أجل إشعاع الخط الأصفر D لعنصر الصوديوم ($\lambda_0 = 0,589\mu$)

الجدول (2) .

الجدول (2) قرائن انكسار بعض المركبات الكيميائية عند الطول الموجي

$$\lambda_a = 589nm$$

1.4701	الغليسرين	1.0003	الهواء
1.5014	البنزين	1.3330	الماء
1.6277	كبريت الفحم	1.3614	الغول
2.36	كبريت الزنك	1.3726	حمض الخل
2.4173	الМАس	1.4338	الفلورين

3-6 سطح الموجة . الشعاع الضوئي . الحزم الضوئية :

ينتج مما نقدم أن دراسة علم الضوء يجب أن تتم في إطار دراسة الحركات الموجية .

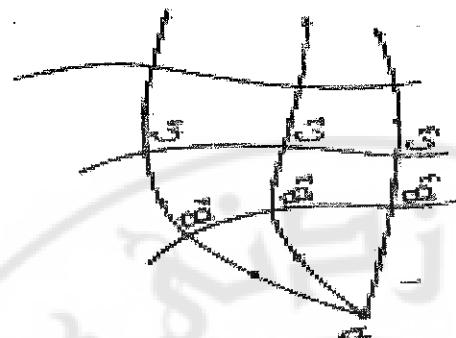
ومن أجل ذلك تعتبر منبعاً ضوئياً نقطياً يرسل في الفراغ المحيط به أمواجاً كهروطيسية تمثل كل واحدة منها لدى انطلاقها من المنبع بالتتابع الجيبى للزمن ،

$$E = E_0 \cos 2\pi Nt \quad (6-6)$$

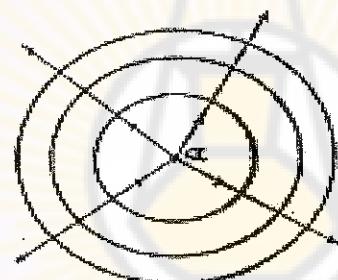
حيث يرمز E إلى قيمة المركبة الكهربائية للحقل الكهروطيسى . فنطلق اسم سطح الموجة على المحل الهندسي للنقاط التي يكون فيها للحقل الكهربائي قيمة واحدة في لحظة ما . ومن الواضح أنه لا يمر من نقطة معينة من الوسط سوى سطح موجة واحد ، وذلك لكي لا يكون للحقل في هذه النقطة أكثر من قيمة واحدة في لحظة معينة .

ونطلق اسم الشعاع الضوئي على الخط العمودي في كل نقطة من نقاطه على سطح الموجة المار بتلك النقطة . ومن الواضح أن كل الأشعة الضوئية تمر من نقطة المنبع ، المنبع هو سطح موج لا متناه في الصغر قيمة الحقل فيه تساوي E_0 في بدء الزمن ، حسب العلاقة (6-6) . ويمثل الشعاع الضوئي عادة بخط يحمل سهماً في جهة الانتشار .

إن الشكل الهندسي لسطح الموجة ، ومن ثم للشعاع الضوئي (شكل 1) ،



شكل 1- سطوح الموجة والأشعة الضوئية الصادرة عن منبع نقطي A في وسط غير متجانس



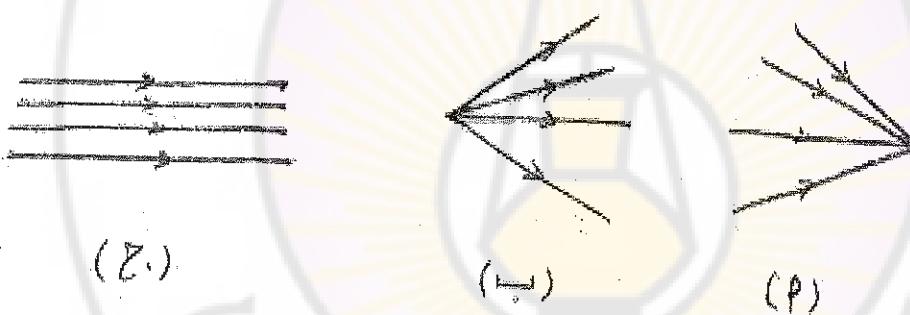
شكل 2- سطوح الموجة والأشعة الضوئية الصادرة عن منبع نقطي A في وسط متجانس ومتناه .

في وسط غير متجانس وغير متناه هو شكل معقد ، لأن سرعة انتشار الحقل E تختلف فيه من نقطة لأخرى ومن منحى لآخر ، بيد أن استعمال أمثال هذه الأوساط نادر جداً إن لم يكن معدوماً وذلك لقلة فائدتها العملية . ولهذا السبب لا نهتم إلا بالأوساط المتتجانسة و الممتداة حيث يكون لسرعة الضوء v قيمة ثابتة . وعلى هذا الأساس فإن اهتزاز الحقل E في نقطة تبعد عن المنبع

بالمسافة l يكون متأخراً عن اهتزاز المنبع بالزمن $\Delta t = \frac{l}{V}$ ، أي أن قيمة الحقل بدلاًة الزمن في هذه النقطة تحسب من الصيغة (بإهمال امتصاص الوسط للطاقة الضوئية) :

$$E = E_0 \cos 2\pi N \left(t + \frac{l}{V} \right)$$

حيث نرى أن للحقل قيمة واحدة على جميع نقاط سطح الكرة التي مركزها المنبع A ونصف قطرها l (شكل 2) ، أي أن سطوح الموجة الصادرة عن منبع نقطي في وسط متجانس ومتناه هي سطوح كرات متمركزة على المنبع . ومن مفهوم الشعاع الضوئي يدخل مفهوم الحزمة الضوئية ، ونطلق هذه العبارة

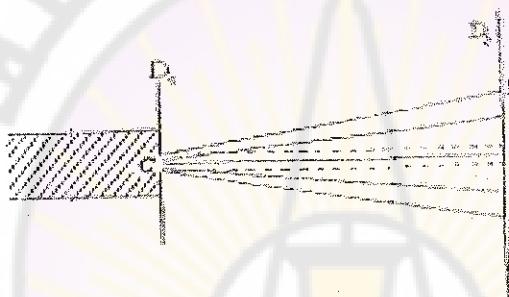


شكل 3- أنواع الحزم الضوئية (أ) متقاربة ، (ب) متبااعدة ، (ج) متوازية

على مجموعة من الأشعة الضوئية المنطلقة من نقطة واحدة (حزمة مخروطة متبااعدة) أو متجمعة في نقطة واحدة (حزمة مخروطية متقاربة) ، ونقول عن الحزمة أنها متوازية أو اسطوانية إذا كانت نقطة انطلاق الأشعة أو نقطة تلاقيها موجودة في اللانهاية ، وفي هذه الحالة تقلب سطوح الموجة إلى مستويات متوازية عمودية على منحى الأشعة .

هذا وتعين فتحة الحزمة بزاويتها الصلبة (أي بمساحة السطح الذي تقطعه الحزمة على سطح الكرة التي مركزها نقطة التقاء الأشعة ونصف قطرها يساوي واحدة الطول أو بنصف زاويتها الرأسية إذا كانت مخروطية منتظمة .

ملاحظة هامة : أن تعريف الشعاع الضوئي بالنص الذي أعطيناها هو تعريف هندسي ومن المفيد أن نذكر انه ليس للشعاع الضوئي وجود فيزيائي (واقعي تجريبي) ذلك لأن الحصول عليه يستوجب ، مثلاً أن نقطع حزمة اسطوانية (آتية من الشمس مثلاً)



شكل 4 - ظاهرة الانبعاث

بحاجز D_1 (شكل 4) ذي كوة دائيرية صغيرة جداً C . بيد أن تحقيق هذه التجربة يدل على أن الحزمة النافذة من الكوة تصبح مخروطية بدلاً من أن تكون اسطوانية رقيقة جداً ، وتزداد فتحة الحزمة المخروطية بتناقص مساحة الكوة ، يطلق على هذه الظاهرة اسم انبعاث (حيود) الضوء ، وهي تتدخل في جميع التراكييب التجريبية التي تستهدف عزل شعاع ضوئي وحيد ، وسبب هذه الظاهرة هو الطبيعة الموجية للضوء ، ويمكن مثلاً تحقيق تجربة مماثلة لتجربة الشكل (4) على الأمواج المنتشرة على سطح الماء وذلك بان نضع على طريق هذه الأمواج حاجزاً ذاكوة صغيرة ، فنشاهد عندئذ أن الأمواج النافذة من الكوة أوسع زاوية من الأمواج الواردة عليها .

هذا وتتدخل حوادث الانتعاج أيضاً عندما نبدل الحاجز D_1 بقرص قاتم (لا ينفذ منه الضوء) يأخذ مكان الكوة C فلا نرى عندئذ لهذا القرص على اللوحة D_2 ظلاً واضحاً .

6-4 علم الضوء :

يستهدف علم الضوء الهندسي إيجاد القوانين التي يخضع لها انتشار الضوء عبر سلسلة من الأوساط الشفافة المتباينة وذلك في سبيل تطبيق هذه القوانين على صنع وتحسين بعض الآلات الضوئية كالمجهر وألات التصوير والنظارات الفلكية . فإذا استبعدنا وجود كوى ضيقة أو حاجز صغيرة على طريق الحزمة المنتشرة ، فإن حوادث انتشار الضوء يمكن عندئذ دراستها وتفسيرها دون اللجوء إلى أية فرضية فيما يخص طبيعة الضوء . وعلم الضوء الهندسي يتناول بالتعريف دراسة الظواهر التي تفسر بالمبادئ الثلاثة التي نسوقها فيما يلي والتي يجب اعتبارها فرضيات أساسية برهانها الوحيد تصديق التجارب المخبرية لنتائجها الحسابية :

-1 مبدأ الانتشار المستقيم .

-2 مبدأ استقلال الأشعة الضوئية .

-3 قوانين ديكارت .

و سنتكلّم عن كل منها في فقرة خاصة .

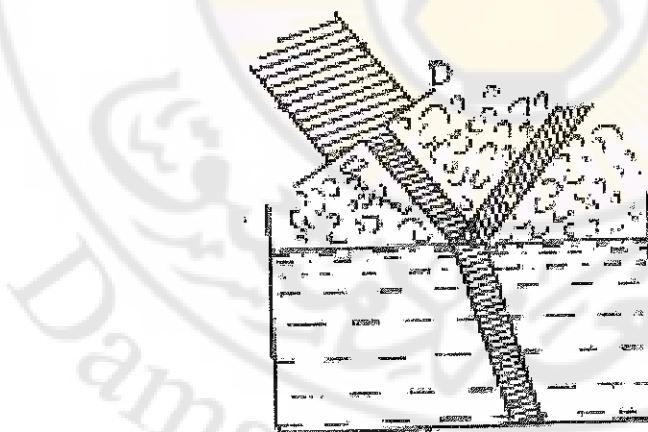
6-5 : مبدأ الانتشار المستقيم :

يحيّب هذا المبدأ على السؤال التالي : إذا كانا إزاء نقطتين A و B من وسط متباين يمر منهما شعاع ضوئي ، فما هو الشكل الهندسي للشعاع الضوئي بين هاتين النقطتين ؟ .

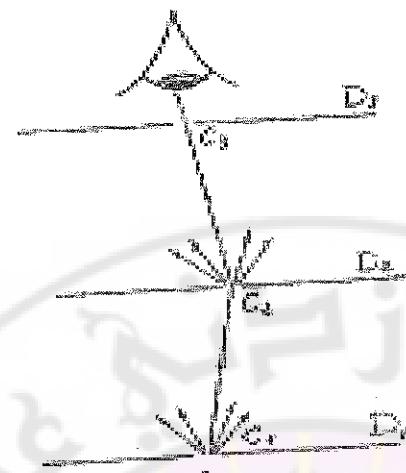
أن الشعاع الضوئي بين نقطتين من وسط متباين هو خط مستقيم .

تؤيد هذا المبدأ أكثر الملاحظات الشائعة كظلال الأجسام وحوادث الخسوف والكسوف ، ويمكن أن نورد التجربة المخبرية المرسومة في الشكل (5) حيث تسقط الحزمة الضوئية الواردة من الشمس ، بعد خروجها من كوة الحاجز D ، على سطح ماء أضيف إليه قليل من الفلورسين (مادة تتألق عندما يسقط عليها الضوء) فنرى عندئذ أن الحزمة المتوجلة في الماء (ونسميها الحزمة المنكسرة) ترسم قضيبياً ضوئياً مستقيماً ، كما ترسم الحزمة المنعكسة قضيبياً آخر نراه مستقيماً بفضل الدخان المستعمل .

ولنلاحظ هنا أيضاً أن هذا المبدأ يصبح باطلأً عندما يصادف الضوء في طريقه حاجز أو كوى صغيرة ، كما ندل على ذلك تجربة الشكل (6) حيث تستطيع العين بفضل انعراج الضوء أن ترى المنبع S من خلال التقوب الثلاثة رغم أن الثقب C_2 محروم قليلاً عن الخط المستقيم الذي يصل بين الثقوب C_3 و C_1 . وهكذا نرى أن استبعاد أمثل هذه التقوب وال الحاجز الصغيرة شرط أساسى لصحة قوانين الضوء الهندسى .



شكل 5- تجربة تبرهن على الانشار المستقيم .



شكل 6 - حوادث الانعراج تبطل مبدأ الانتشار المستقيم .

6-6 مبدأ استقلال الأشعة الضوئية :

إذا افترضنا جملة ضوئية ذات أبعاد نستطيع معها إهمال حوادث الانعراج فإن التجربة تدل على صحة المبدأ التالي :

أن كل شعاع من الحزمة الضوئية مستقل في سلوكه عن الأشعة الأخرى، أي أن الشعاع لا يتأثر ، في انتشاره ولا في انعكاسه ولا في انكساره ، بما يحدث للأشعة الأخرى جملة أو تفصيلاً .

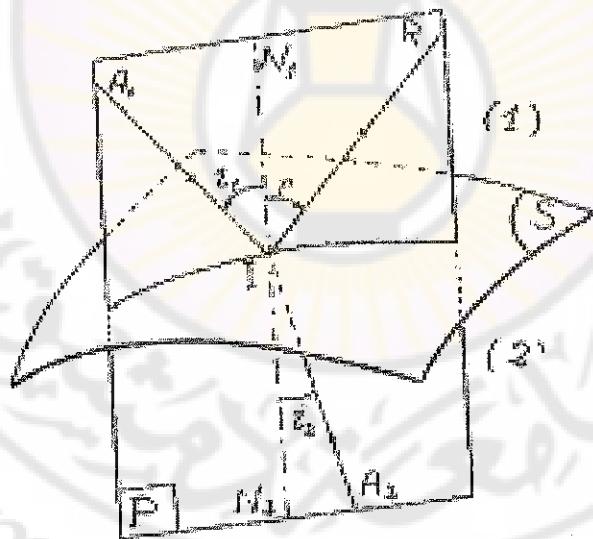
7-6 قوانين ديكارت :

سوف نفترض أن الأوساط المادية المفترضة شفافة (لا تمتص سوى جزء مهم من الطاقة الضوئية المنتشرة فيها) ومتجانسة ومتاحية وأن الظروف التجريبية خالية من الانعراج . ونضيف هنا فرضية أخيرة هي أن الضوء المستعمل وحيد اللون ، رغم أن هذا الشرط غير ضروري في حوادث الانعكاس .

لنفترض الآن شعاعاً ضوئياً وارداً A_1I على سطح مصقول S (شكل 7) يفصل بين وسطين شفافين ، (1) و (2) ، فرينتا انكسارهما المطلقتان ويقطعه في النقطة I التي نسميها نقطة الورود . ولنرسم من هذه النقطة مستقيماً N_1IN_2 عمودياً على S ونسميه الناظم ، نسمى المستوى P الذي يحوي الناظم والشعاع الوارد مستوى ورود الشعاع A_1I .

تدل التجربة أن الشعاع الوارد ينقسم في غالب الأحيان ، عند نقطة الورود إلى شعاعين ، أحدهما IR يرتد في الوسط الذي أتى منه ونسميه الشعاع المنعكس ، الآخر IA_2 يتوجل في الوسط الثاني ونسميه الشعاع المنكسر .

نطلق اسم زاوية الورود على الزاوية الحادة i_1 التي يجب أن يدورها الناظم حول نقطة الورود لكي ينطبق على المستقيم IA_1 . و بالطريقة نفسها نعرف زاوية الانعكاس i_2 وزاوية الانكسار i_3



الشكل (7)

تستهدف قوانين ديكارت تعين منحى الشعاعين المنعكس والمنكسر وذلك بالنصوص الثلاثة التالية :

أولاً : يقع الشعاعان المنعكس والمنكسر ، كلاهما في مستوى الورود .

ثانياً : زاوية الانعكاس تساوي زاوية الورود وتعاكسها في الإشارة ، أي أن i_2 تعين بالمساواة :

$$r = -i_1 \quad (6-7)$$

ثالثاً : من أجل ضوء وحيد اللون يكون للجاء $n \sin i$ قيمة واحدة في الوسطين ، أي أن زاوية الانكسار i_2 تعين بالمساواة :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (6-8)$$

التي تسمح بحساب i_2 إذا علمنا قيم الأقدار الثلاثة الأخرى .

ولنذكر أخيراً أن الدستور (6-8) كثيراً ما يعطي على الشكل :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (6-9)$$

الذي يجعلنا نلفظ دستور ديكارت الثالث على الشكل : أن نسبة حبيبي زاويتي الورود والانكسار ثابتة مهما كانت قيمة زاوية الورود ، وهي مثل n_1 و n_2 ، موجبة دوماً . ويطلق عادة على هذه النسبة n_{21} اسم قرينة انكسار الوسط (2) بالنسبة للوسط (1) ويمكن أن تكون أكبر أو أصغر من واحد .

8-6 ملاحظات حول قوانين ديكارت :

-1 إذا جعلنا $n_1 = -n_2$ في العلاقة (8) وبدلنا i_2 بـ r فإننا نحصل على المساواة (6-7) مما يدل على أن الانعكاس يمكن اعتباره انكساراً في

وسط قرينته تساوي قرينة وسط الورود وتعاكسها بالإشارة . وعلى أساس هذا الاصطلاح يمكن الاستغناء عن قانون ديكارت الثاني لأنه يصبح نتيجة للثالث .

-2 تدل العلاقة (6-8) على أن الشعاع الذاهب من وسط إلى آخر أشد كسراً (أي عندما يكون $n_1 > n_2$ فنجد $i_1 < i_2$) ، ينكسر مقترباً من الناظم والعكس بالعكس ، فنقول : إن الشعاع المنكسر يقترب من الناظم أو يبتعد عنه حسبما يكو الوسط الذاهب إليه أشد أو أضعف كسرًا من الوسط الوارد منه .

-3 يمكن أن نستنتج بسهولة أن الشعاعين ، المنعكس والمنكسر ، يقعان في طرف واحد بالنسبة للناظم وهو الطرف الذي لا يحوي الشعاع الوارد ، وأن الشعاع الوارد عمودياً ينعكس على نفسه أو ينفذ في الوسط الآخر دون انحراف .

-4 لما كانت قرائن انكسار معظم المواد تتراوح بين 1 و 3 فإن الدستور (6-8) يدل على أن i_2 تكون صغيرة عندما تكون i_1 كبيرة ، ويمكن عندئذ إلباس جيوب الزوايا بأقواسها وكتابة الدستور (6-8) على الشكل :

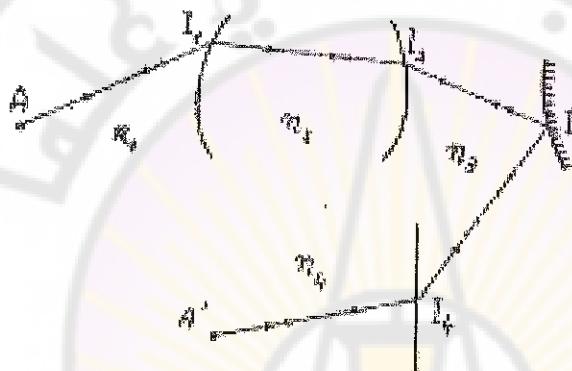
$$n_1 i_1 = n_2 i_2 \quad (6-10) \quad (i_1 \text{ كبيرة})$$

الذي يسمى دستور كبلر . kepler

-5 أن قرينة الانكسار المطلقة للهواء الغازي قلما تتجاوز 1.0005 فإنه يمكن إلباسها بالواحد والباس قرائن انكسار المواد بالنسبة للهواء بقرائتها المطلقة .

-6 ينتج من المساواة (6-7) أنه إذا ورد على النقطة A (شكل 7) شعاع وفق RI فإنه ينعكس حتماً وفق IA_1 . كما ينتج من المساواة (8) أنه إذا ورد شعاع وفق I_2A_2 فإنه ينكسر وفق IA_1 . وعلى هذا الأساس يمكن أن نقول :

أن الطريق الذي يسلكه الضوء لا يتعلق بجهة انتشاره .



شكل 8 - مبدأ الرجوع المعكوس

يطلق عادة على هذه النتيجة اسم مبدأ الرجوع المعكوس ، وهو يدل على انه إذا انطلق من النقطة A (شكل 8) شعاع AI_1 وسلك للوصول إلى A' عبر سلسلة أوساط وسطوح عاكسة ، الطريق $A \rightarrow A_1A_2A_3A_4 \rightarrow A'$ فإن الشعاع الذي ينطلق من A' وفق $A'I_4$ يسلك الطريق المعكوس $A' \rightarrow A_4A_3A_2A_1A$.

أن تطبيق هذا المبدأ يسهل حل كثير من المسائل في علم الضوء ويجنب المرء من ارتكاب الأخطاء ، وينتاج منه مباشرة أنه إذا كان إزاء شعاعين ينتشران في اتجاهين متعاكسين عبر سلسلة من الأوساط وكان لهما قسم مشترك فإنهما يكونان حتماً منطبقين على طول الطريق .

9-6 دراسة تفصيلية للاكسار . الانعكاس الكلي .

ندرس في هذا الفقرة تغيرات زاوية الانكسار بدلالة زاوية الورود ، ومن أجل ذلك نفترض أننا إزاء سطح فاصل بين وسطين يحقان دوماً المترابطة $n_2 < n_1$ ، فنميز بهذا الصدد حالتين :

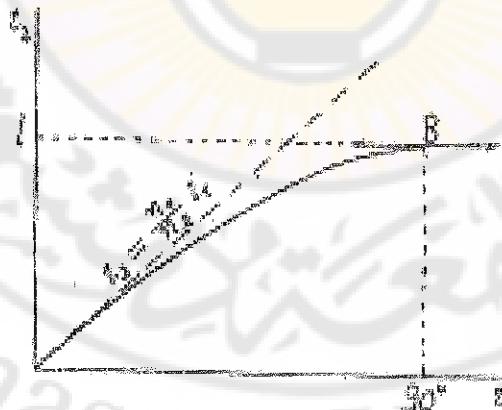
- 1- الضوء يتوجه نحو الوسط الأشد كثراً : أي أن الشعاع الضوئي يذهب الوسط (1) إلى الوسط (2) . نلاحظ عندئذ أنه مهما كانت قيمة i_1 يوجد دوماً قيمة i_2 معطاة بالدستور :

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 < I$$

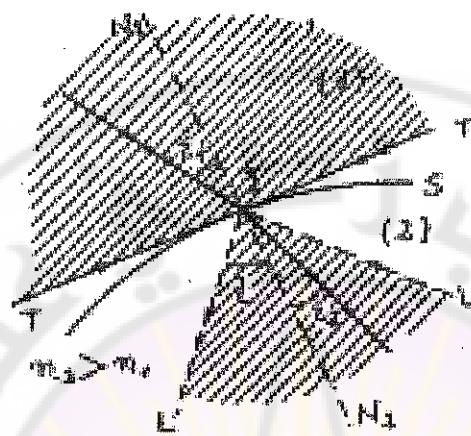
لأن كلاً من $\frac{n_1}{n_2}$ و $\sin i_1$ أصغر من الواحد ، وهذا يدل على وجود شعاع منكسر مهما كان منحى الورود ، فنDMAUSUNIVERSITY

منكسر مهما كان منحى الورود ، فنDMAUSUNIVERSITY

إلى 90°



شكل (9)



شكل 10 - زاوية الانكسار الحدي 1

(ورد مماسي) تتراءد i_2 من الصفر إلى قيمة 1 نحصل عليها من العلاقة السابقة بمحاجة أن $\sin 90 = 1$ فنجد :

$$\sin I = \frac{n_1}{n_2} \quad (6-11)$$

ونرسم منحني الشكل (9) الذي ينطلق من نقطة الأصل O مماساً لل المستقيم (لأن هذا المستقيم يمثل تغيرات i_2 صغيرة عندما تكون i_1 صغيرة، دستور كلار) وينتهي بالنقطة B مماساً لل المستقيم $i_2 = 1$ لأن المشتق :

$$\frac{di_2}{di_1} = \frac{n_1}{n_2} \frac{\cos i_1}{\cos i_2}$$

ينعدم في هذه النقطة $\cos 90^\circ = 0$. وهكذا ينبع أن زاوية الانكسار هي دوماً أصغر من 1 المعطاة بالدستور (6-11) فنقول : إذا ورد على نقطة من السطح الكاسر حزمة مخروطية ذاهبة نحو الوسط الأشد كسرأ فإن جميع الأشعة المنكسرة تتحصر داخل مخروط ذروته نقطة الورود وزاويته تساوي 1 أي أن المنطقة البيضاء من الشكل (10) لا تحوي شعاع منكسر ينطلق من 1 وذلك مهما كانت فتحة الحزمة الواردة على 1 .

تسمى الزاوية 1 المعطاة بالدستور (6-11) زاوية الانكسار الحدي .

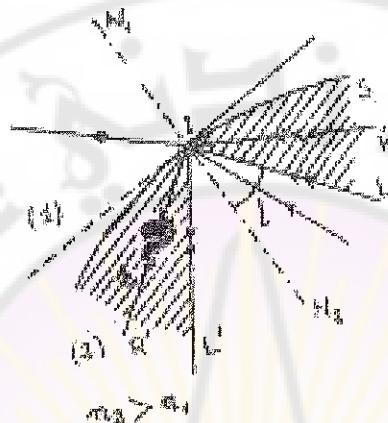
ولنلاحظ أخيراً على الشكل (9) أن i_2 تقترب من 1 ببطء شديد عندما تقترب i_1 من 90° .

2- الضوء يتجه نحو الوسط الأضعف كسرأ : أي أن الشعاع الضوئي يذهب من الوسط (2) إلى الوسط (1) وتكون عندئذ i_2 هي زاوية الورود ، ويدل مبدأ الرجوع المعكوس أن جميع الأشعة الواردة على 1 ضمن الزاوية 1 تتكسر في الوسط الآخر خاضعة لقانون ديكارت . وبصورة خاصة أن الشعاع 11 الذي يرد بالزاوية 1 ينفذ في الوسط (1) مماساً للسطح الكاسر وفق 1A ، أما عندما تكون زاوية الورود $i_2 > i_1$ فإن دستور ديكارت لا يعطي حلاً مقبولاً ، لأننا نحصل عندئذ على $1 < \sin i_1$ وهذا مستحيل .

فما يحدث إذن للشعاع الذي يرد بزاوية أكبر من 1 ؟

تدل التجربة فعلاً أن هذا الشعاع لا يعطي أي شعاع منكسر في الوسط الآخر وإنما ينعكس بкамله في الوسط الذي أتى منه حسب قانون ديكارت في الانعكاس ، أي أن جميع الأشعة التي ترد على 1 ضمن المنطقة المخططة من الشكل 11 تعاني انعكاساً كلياً في الطرف الآخر من النظام حاملة معها جميع الطاقة الضوئية التي تملكها فنقول :

أن الأشعة الذاهبة نحو الوسط الأضعف كسرًا إما أن تنكسر جزئياً في هذا الوسط أو أن تتعكس كلياً وذلك حسبما تكون زاوية ورودها أصغر أو أكبر من زاوية الانكسار الحدي 1 التي تحسب من العلاقة (6-11) .



شكل 11- الانعكاس الكلي

وقد يكون من المفيد أخيراً أن نذكر أن الانكسار هو دوماً انكسار جزئي مصحوب بانعكاس جزئي وذلك مهما كانت جهة انتشار الضوء .

6-10 معلومات إضافية عن الانعكاس .

نعطي في هذه الفقرة بعض المعلومات عن كمية الطاقة المنعكسة وكمية الطاقة النافذة (المنكسرة) في وسط شفاف بالنسبة للطاقة التي تجرفها الحزمة الواردة .

لنرمز إذن بـ W_t للطاقة التي تصل إلى نقطة الورود وبـ W_r و W_i للطاقتين اللتين تحملهما الحزمتان المنعكسة والنافذة في النقطة نفسها ، فيكون لدينا بموجب مبدأ انتظام الطاقة :

$$W_i = W_r + W_t$$

شكل 12 - تغيرات المقدرة العاكسة لسطح يغصل بين وسطين شفافين بدلالة زاوية الورود ، (ا) الضوء يذهب نحو الوسط الأشد كسراً ، (ب) الضوء يذهب نحو الوسط الأضعف كسراً .

نطلق اسم المقدرة العاكسة للسطح S على النسبة :

$$R = \frac{W_r}{W_i}$$

واسم عامل النفاذية على النسبة :

$$T = \frac{W_i}{W_r} = 1 - R$$

تدل التجربة أن قيمة R تتعلق بطبيعة الوسطين المفصولين بالسطح S وأن تغيراتها بدلالة زاوية الورود θ تتمثل بمنحنيات من الشكل 12 حيث نرى أنها ثابتة من أجل زوايا ورود صغيرة لا تتجاوز 10 درجات وهي تخضع في هذا المجال للدستور :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (\text{من أجل ورود شبه نظامي})$$

وذلك مهما كانت جهة انتشار الضوء ، فلدينا مثلاً «من أجل السطح الفاصل بين الهواء والزجاج العادي ، $R = 0.04$ $T = 0.96$ » ، أي انه لا ينعكس عن الزجاج سوى 4 في المائة من الضوء الوارد على الزجاج وروداً شبه نظامي . أما القسم الأكبر الباقى فيمر إلى الوسط الآخر .

ونرى أيضاً على الشكل 12 (منحني (ب)) أن R تقترب من الواحد عندما يذهب الضوء نحو الوسط الأضعف كسراً بزاوية قريبة من 1 حيث يحدث

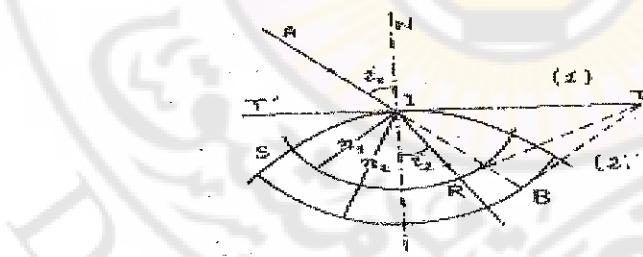
الانعكاس الكلي الذي يحمل جميع الطاقة الواردة ويختفي الشعاع المنكسر كما نرى على المنحني A أن الورود شبه المماسي يصبحه انعكاس شبه كلي مما يدل على أن الطاقة التي يحملها الشعاع II (شكل 10) معدومة ، أي أن الشعاع I يتبع عملياً طريقه ، فإذا استقبلنا الحزمة المخروطية 'II' على لوحة عمودية على الناظم فإننا نرى عليها دائرة تتناقص إناراتها من المركز حتى تندم في المحيط .

6-11 إنشاء الهندسي للشعاع المنكسر :

تسمح قوانين ديكارت بإنشاء الشعاعين ، المنعكس والمنكسر دون صعوبة ، فمن أجل الشعاع المنعكس يكفي إنشاء المستقيم المناظر للشعاع الوارد بالنسبة للناظم . أما بقصد الشعاع المنكسر فنكتفي بشرح الطريقتين التاليتين :

طريقة هايجنز HUYGENS

نفرض أن مستوى الورود هو مستوى الورقة (شكل 13) . لرسم دائرتين مركزهما نقطة الورود ونصف قطريهما n_1, n_2 ، ثم لنمد الشعاع الوارد A1



شكل 13 - إنشاء هايجنز

حتى يقطع دائرة الوسط الذاهب إليه (أي دائرة n_2 في هذه الحالة) في النقطة B لرسم عندئذ من B مماساً لهذه الدائرة فيقطع المستقيم $T''IT$ (المماس

لسطح الكاسر S في نقطة الورود) في النقطة T التي نرسم منها المماس TR للدائرة الأخرى n_1 فنرى بسهولة أن IR هو الشعاع المنكسر المطلوب ، إذ لو رمزنا بـ i_2 للزاوية التي

يصنعها هذا المستقيم مع النظام لوجدنا بسهولة أن :

$$\sin i_1 = \frac{IB}{IT} = \frac{n_2}{IT}$$

$$\sin i_2 = \frac{IR}{IT} = \frac{n_1}{IT}$$

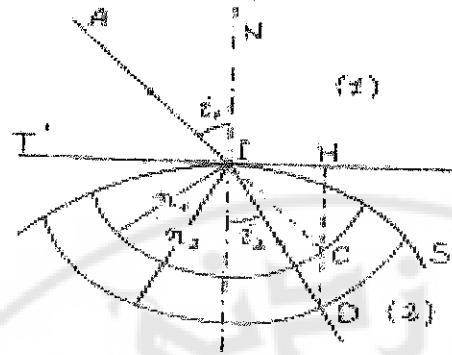
ولحصلنا بتقسيم هاتين المساواتين ، طرفا على طرف ، على قانون ديكارت في الانكسار .

طريقة سطوح القرينة

نشئ الدائرتين السابقتين ونرسم (شكل 14) من C ، نقطة تقاطع الشعاع الوارد مع دائرة قرنية الوسط الذي أتى منه (أي n_1 في هذه الحالة) ، المستقيم العمودي على المماس TI فيقطع الدائرة الأخرى في النقطة D فنرى أن DI هو الشعاع المنكسر المطلوب ، إذ لو قسمنا المساواتين :

$$\sin i_2 = \frac{IH}{ID} = \frac{IH}{n_2} \quad \sin i_1 = \frac{IH}{IC} = \frac{IH}{n_1}$$

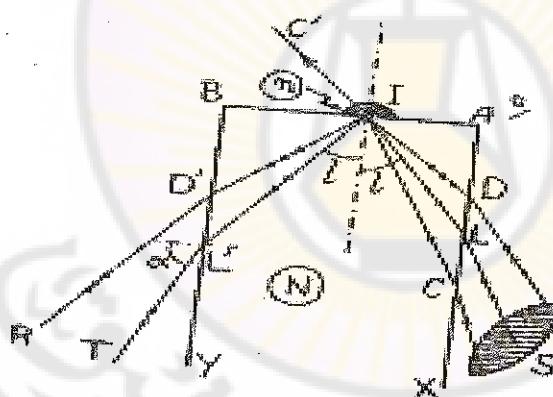
طرفا على طرف لحصلنا على القانون ديكارت في الانكسار .



شكل 14 - طرقة سطوح القرنية

12-6 تطبيقات على الانعكاس الكلي :

إن للانعكاس الكلي تطبيقات عديدة نكتفي هنا بذكر ثلاثة منها .



شكل 15 - قياس قرينة الانكسار بالانعكاس الكلي .

1- قياس قرينة الانكسار : ويتم ذلك باستعمال قطعة من الزجاج شكل متوازي المستطيلات (شكل 15) و قرينة انكسارها n ، يوضع على أحد جوهرها قطرة من سائل قرينة انكسارها $n > N$ فمن بين الأشعة الواردة من المنبع AD

الضوئي S على سطح التماس بين الزجاج والسائل توجد أشعة ، مثل LI ، ترد تحت زاوية الانكسار الحدي 1 وتشكل مخروطاً ذروته A وزاويته الرأسية 21 .

وكل الأشعة الواردة خارج هذا المخروط ، مثل DI تعكس وتخرج من الوجه

BY

أما الأشعة الواردة ضمن هذا المخروط ، مثل CI ، فتفند في السائل لخروج وفق IC و تكون النتيجة ذلك أن الشعاع L'T البارز عن LIL يقسم مستوى الورقة إلى منطقتين ، أحدهما مضيئة وتقع على يمين جهة انتشاره والأخرى مظلمة وتقع على يساره . فإذا رمنا بـ α لزاوية بروز هذا الشعاع كان لنا (بتطبيق قانون ديكارت في النقطة L') :

$$\sin \alpha = N \sin(90^\circ - I) = N \cos I = N \sqrt{1 - \sin^2 I}$$

$$\text{وبالاستفادة من أن } \sin I = \frac{n}{N} \quad \text{نجد العلاقة :}$$

$$\sin \alpha = \sqrt{N^2 - n^2}$$

التي تسمح ، بعد قياس α بوسيلة ما ، بحساب إحدى القرینتين بدلاً من الأخرى .

ونلاحظ أن الشرط $I \leq \sin \alpha \leq 0$ يستوجب أن تتحقق المتراجحتان $N \geq n$

(شرط الانعكاس الكلي) و $n > \sqrt{N^2 - 1}$. ويلجأ عادة إلى استعمال زجاج

قرینة انكساره كبيرة ومعلومة . فمن أجل $N = 1.626$ مثلاً نجد أن هذه الطريقة

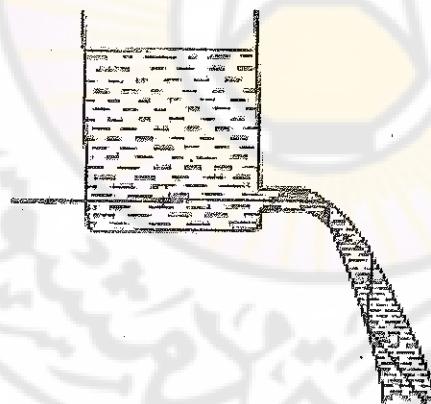
تسمح بقياس قرائن انكسار السوائل المحصورة في المجال $n > 1,202$.

هذا ويمكن استعمال هذه الطريقة من أجل قطعة صلبة صغيرة ذات وجه مستو

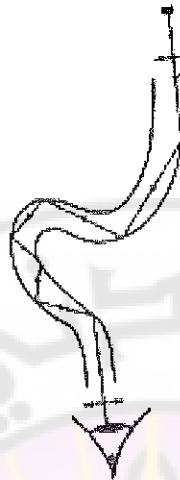
مصقول وتوضع بدلاً من القطرة .

النوافير الضوئية : ومبدأ عملها واضح في الشكل 16 حيث يمثل الشعاع الضوئي حزمة متوازية ضيقة من ضوء أحمر مثلاً ، فتعانق ، على جوانب أنبوب الماء المتذبذب من ثقب الإناء ، انعكاسات كلية متواالية نتيجتها أن مسیر الضوء يصاحب تيار الماء الذي يبدو لنا عندئذ أحمر اللون .

دليل الضوء : ويطلق هذه الاسم على سلك غليظ من مادة شفافة مرنة (شكل 17) تعمل بموجب مبدأ النافورة الضوئية فيسير الضوء فيها متبعاً تعرجاً السلك . ودليل الضوء كثير الاستعمال في التقطير الطبي لفحص أعضاء الجسم الداخلية كالقصبات أو المعدة ويجهز لهذا الغرض في طرفه بعد ستين أو أكثر تولفان مجهاً بشكل للمنطقة المفحوصة خيالاً مكمراً تراها العين ، كما يستعاوض عن السلك الغليظ ، للنقاط أكبر كمية من الضوء ، بجموعة أسلاك شفافة دقيقة تشكل حبلأً طويلاً يدخل من فم المريض مثلاً نحو العضو المدروس .



شكل 16 - نافورة ضوئية



شكل 17 - دليل الضوء

6- دراسة موجزة عن العين :

العين هي العضو من جسم الإنسان الذي يقوم بنقل الصور والمرئيات إلى المخ ، فيتم الإحساس بها . تسكن العين داخل جوف الحاج في الجمجمة ويفصلها عنه وسادة شحمية تحمي العين انظر الشكل 18 ، والعين حساسة للطاقة الفوتونية في منطقة الطيف الكهروطيفي تسمى بمنطقة الطيف المنظور .

وت تكون العين من قسمين هما :

ملحقات العين .

كرة العين .

ملحقات العين :

ال حاجبان : يمنعان وصل عرق الجبهة إلى العينين .

الجفنان والأهداب : لتخفييف شدة الضوء الوارد إلى العينين ، وإعاقة دخول الغبار إلى العين .

الغتان الدمعيتن : تفرزان الدموع التي تدفأ ، وترتبط كرة العين وتغسلها من الغبار ، وتقودها إلى القناة الدمعية ، ثم إلى الحرفتين الأنفيتين .

المتحمة : غشاء جلدي رقيق شفاف ، يلتصل على الوجه الأمامي للعين .

العضلات المحركة : ست عضلات أربع مستقيمة وعضلتان منحرفتان ترتكز هذه العضلات من جهة على كرة العين ، ومن جهة أخرى على جدران الحاج، وتقوم هذه العضلات بتحريك كرتى العينين بكافة الجهات .

بـ - كرة العين :

تشمل كرة العين :

1° - جدران العين .

2° - الأوساط الشفافة .

1° - الطبقات المكونة لجدران كرة العين :

وهي من الأمام إلى الخلف :

الصلبة أو البيضاء : واقية تتحدب من الأمام قليلاً لتشكل القرنية الشفافة ، وهي غشاء صلب ، ومقاومة سماكته 1mm ، وقرنية انكساره تختلف قليلاً عن 1.35

بـ-المشيمية : طبقة غنية بالأوعية الدموية ، وجهها الداخلي أسود يجعل جوف كرة العين مظلاً ، ووجهها الأمامي مسطح يدعى الفزحية ، وهو ملون بحسب الأشخاص ، وفي وسطها الحدقة وهي فتحة متغيرة القطر ، كما نجد خلف الفزحية الجسم الهندي المكون من ألياف عضلية لا إرادية ، وأوعية دموية وفي مركز طبقة الفزحية هناك ثقب يسمى الحدقة ، أو البؤبؤ وبالتالي فإن الفزحية تقوم بدور حجاب الفتحة في منظومة العين الضوئية .

حيث أن هذه الفتحة يمكن أن يتغير اتساعها بواسطة عضلات موجودة في الفزحية ، وتخضع لتأثير الجملة العصبية المركزية ، فتفاصل هذه العضلات وانبساطها يغير فتحة الحدقة من 2-3 mm في حالة الإضاعة القوية ومن

6-8 mm في حالة الإضاءة الضعيفة ، وبذلك يتم التحكم بمقدار التدفق الضوئي الساقط على العين .

ج - **الشبكية** : تتألف شبكت عين الإنسان من عدة طبقات تحميها بشرة سطحية ، وتضم المستقبلات الضوئية المؤلفة من المخاريط والعصيات . كما يخرج من الشبكة ألياف العصب البصري الذي يتصل بالمخ . تسمى منطقة خروج ألياف العصب البصري النقطة العمياء لخلوها من العصي ، والمخاريط ، وفي الشبكة انخفاض صغير مقابل للحدقة هو اللطخة الصفراء ، تبلغ قوة البصر شدتها .

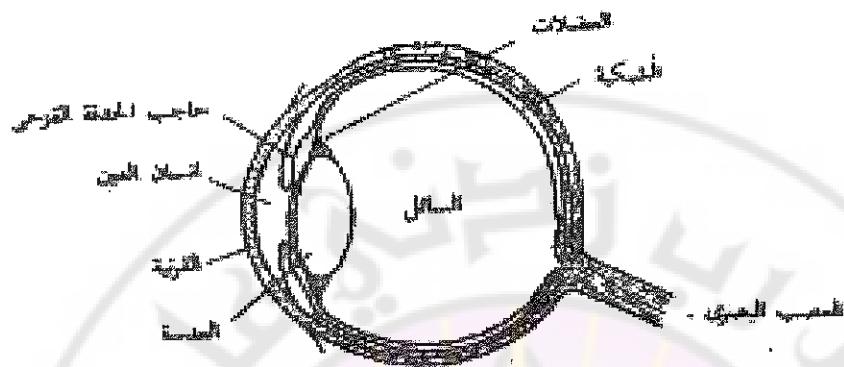
2 - **الأوساط الشفافة** : تتوضع من الأمام إلى الخلف :
القرنية الشفافة .

الخلط المائي :

سائل شفاف كالماء يملأ حجرة العين الأمامية بين القرنية والقزحية .
الجسم البلوري (عدسة العين) : عدسة محدبة الوجهين ، ووجهها الخلفي أكثر تحديداً من وجهها الأمامي ، يثبتها في مكانها أربطة معلقة متصلة بالجسم الهبني .
4- **الخلط الزجاجي** : إن حجرة العين الخلفية مملوءة بمادة هلامية شفافة تسمى الخلط الزجاجي ، حيث تلتصق هذه المادة عند قعر العين بطبقة الشبكة ، التي تحتوي على مستقبلات الضوء العضوية .

وأخيراً فإن مقلة العين بكمالها ، مملوءة في الفراغات بين الأجزاء المذكورة سابقاً بسائل شفاف يقع تحت ضغط يزيد عن الضغط الجوي بمقدار من 18 / إلى 20 / مم زئبقي .

وهذه الزيادة في الضغط تسمى ضغط العين الداخلي وهو يساعد على احتفاظ العين بشكلها الكروي .



(18) شکل

٦- دور وبنية الشبکیة :

هي الطبقة المستقبلة للضوء ، وتحتوي المستقبلات الضوئية على أصبغة حساسة ، يزول لونها بتأثير الضوء وتولد كمكونات فعل تسرى في ألياف العصب البصري .

وتمتاز هذه الاستجابة بسرعة حدوثها الفائقة ، الأمر الذي يسمح للعين بالقيام بحركاتها المستمرة التي تنقل الخيال المتشكل على الشبكة باستمرار ، من منطقة إلى أخرى مجاورة بما يؤمن استمرارية الرؤية .

ونميز في الشبكية نوعين من الخلايا الحساسة للضوء هي العصي والمخاريط ، ويكون عمل المخاريط ، إدراك البيئة المحيطة بظروف الإضاءة الجيدة (الرؤية النهارية) ، وهي حساسة لونياً وتكون بكثافة عالية في اللطخة الصفراء .

بينما يكون عمل العصي إدراك البيئة المحيطة في ظروف الإضاءة الضعيفة (الرؤية الليلية) ، وهي غير حساسة لونياً .

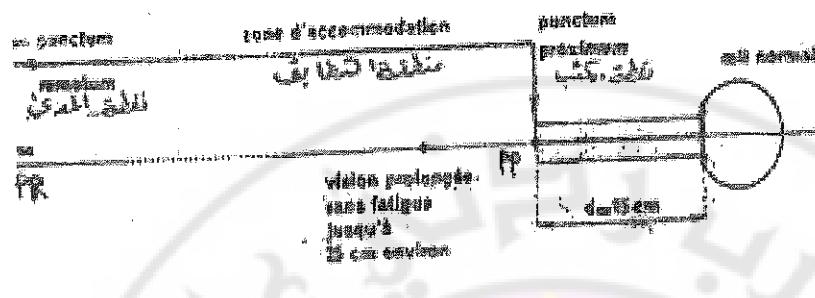
ويبدو أن هناك ثلاثة أنماط من المخاريط ، يحوي كل نمط منها صباغاً ضوئياً له مجاله امتصاصه الضوئي الانتقائي الخاص به فهناك النمط الأزرق الذي تقع عصابة امتصاصه عند الموجة 440 نانومتر . والنمط الأخضر عند الموجة 530 نانومتراً ، وأخيراً النمط الأحمر عند الموجة 575 نانومتراً .

6-15 المطابقة :

وهي عملية ضبط وإحكام آلي لتوضع الخيال على الشبكية وهي فعل انعكاسي ، وتنتمي المطابقة بواسطة الجسم البلوري الذي يتمتع بمرпонة طبيعية ، بتأثير الجسم الهدبى .

وبدراسة العمل الوظيفي للعين تبين أنه أثناء عملية المطابقة فإن المسافة ما بين المركز البصري ، والشبكية تبقى ثابتة ، والذي يتغير هو تحدب وجوه الجسم البلوري ، لذا فإن الجسم البلوري قادر على تغيير بعده المحرقي بحيث يستطيع إعادة الترافقات الضوئية للمستوى الجبهي الملاحظ (الجسم) ، ومستوى الشبكية (الخيال) .

عملية المطابقة تتلخص في أن العين تقاص بعدها المحرقي لدى اقتراب الجسم منها وتمدده لدى ابعاده عنها بحيث يرسم الخيال دوماً على الشبكية . والشكل (19) يوضح لنا حدود مطابقة العين السليمة .



الشكل (19)

يوجد على المحور البصري منطقة تطابق ، ولكي تتم رؤية الأجسام بشكل واضح ، يجب أن تقع هذه الأجسام ضمن هذه المنطقة . إن أبعد نقطة عن العين في هذه المنطقة تسمى نقطة المدى ، ومن ثم فإن العين السليمة تستطيع رؤية هذه النقطة ، والنقط المجاورة دون تعب لأنها تشك أختيلة تقع على الشبكية ، وذلك دون الحاجة لعملية المطابقة . وأقرب نقطة للعين من منطقة المطابقة تسمى نقطة الكثب ، وأنه لتمييز هذه النقطة يجب على العين أن تقوم بعملية مطابقة عظمى ، وهذا ما يتطلب العين عند النظر المطول إلى هذه النقطة .

فعندما تكون العين سليمة (ضوئيا) نلاحظ أن نقطة المدى تقع في اللانهاية بينما تقع نقطة الكثب على بعد A تترواح قيمتها ما بين 15-20 سنتيمتر في سن العشرين ، هذا البعد يسمى البعد الأصغرى للرؤية الواضحة ويتزايد عموماً بتقدم السن لأن العين تضعف عندئذ قدرتها العضلية على المطابقة .

كما أن قدرة العين على المطابقة تختلف باختلاف الأشخاص ، وتناقص مع تقدم الإنسان بالعمر ، وترتبط بكمية الإضاءة ونوعيتها .

تعد حساسية العين في أعلى درجاتها من أجل ضوء وحيد اللون ، وإضاءة مقدارها 10000 لوكس .

٦-١٦ شذوذ البصر وإصلاحه :

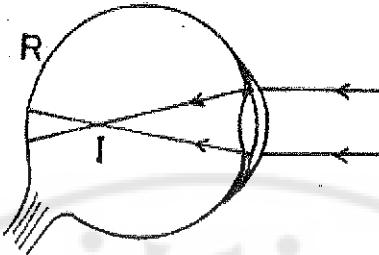
نقول عن العين أنها شاذة إذا كان محرقها الخيال ' F' وهي في حالة الراحة غير واقع على الشبكية والشذوذ نوعان :

العين الحسيرة (قصر النظر)

نطلق هذه الصيغة على عين يقع محرقها الخيال ، وهي مرئاة أمام الشبكية (شكل 20) أي أن العين الحسيرة أشد تقريباً من السليمة فهي في حالة الراحة لا ترى أجسام اللانهائية بوضوح ولو طابت لاستفحلاً الأمر .

ولكن إذا اقترب الجسم تدريجياً اقترب خياله من الشبكة حتى يرتسن عليها ، دون مطابقة ، عندما يصبح الجسم في نقطة المدى .

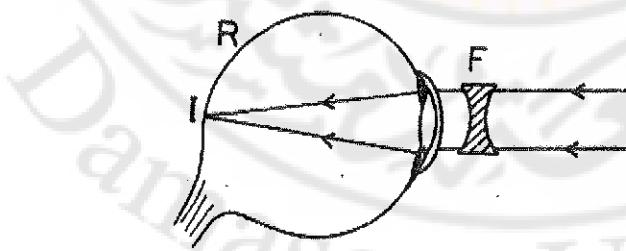
فنقطة المدى في العين الحسيرة واقعة إذن على مسافة محددة أمام العين، ويُنتج من ثبات سعة المطابقة أن نقطة الكثب أقرب أيضاً إلى العين الحسيرة منها إلى العين السليمة



شكل (20)

أي أن النقطة البعيدة لمثل هذه العين المصابة بقصر النظر تكون أقل من اللانهاية ، وكذلك تكون النقطة قريبة لها أقل من 25cm ولإصلاح التقريب الكبير للجسم البلوري ، يجب وضع عدسة مبعدة على بعد من 1 إلى 2 سنتيمتر من قرنية العين (نظارات عاديّة) ، الشكل (21) يهدف الرؤية الواضحة ابتداء من نقطة المدى .

ونشير هنا إلى أن العدسة المبعدة تشكل للجسم البعيد والمرئي خيالاً وهمياً وأصغر من الجسم ومقرب ، هذا الخيال يقوم بدور جسم بالنسبة للعين التي تشكل له خيالاً على الشبكية . ونلاحظ أن المصاب بقصر النظر لا يكون بحاجة لأي تصحيح عند النظر إلى الأشياء القريبة .



شكل (21)

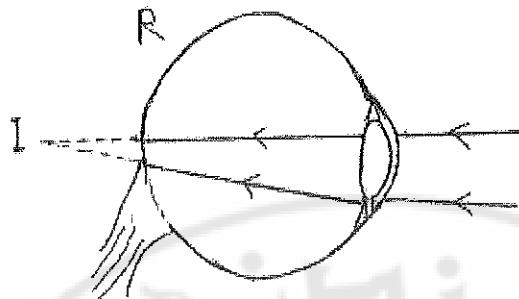
العين الطامسة (بعد النظر)

نطلق هذه الصفة على عين يقع محرقها الخيال وهي مرتاحة ، وراء الشبكية شكل (22) أي أن العين الطامسة أقل تقريراً من السليمة ، ويجب عليها أن تطابق لكي يعود F' إلى الشبكية ولكي نرى أجسام الlanهية بوضوح . أما في حالة الراحة ، ولكي يتشكل خيال حقيقي على الشبكية يجب أن يكون الجسم وهمياً وواقعاً وراء F' في نقطة معينة هي نقطة المدى حسب تعريف هذه النقطة أي أن نقطة المدى في العين الطامسة هي نقطة وهمية واقعة على مسافة محددة وراء المحرق الخيال . وينتج أيضاً من ثبات سعة المطابقة أن نقطة الكثب أبعد عن العين الطامسة منها عن العين السليمة .

أما إصلاح الشذوذ فيستهدف جعل العين شبيهة بالعين السليمة وهذا يتم وضوحاً بوضع عدسة رقيقة ، قريبة جداً من العين ، تعطي لأجسام الlanهية خيالات واقعة في نقطة المدى .

إصلاح الحسر أو الطمس يتم إذن باستعمال عدسة ينطبق محرقها الخيال على نقطة مدى العين .

أي أن تقريب العدسة المصلحة يساوي $\frac{1}{d}$ (حيث d البعد الأعظمي للرؤبة الواضحة) . فمن أجل عين حسيرة (d سالب) يجب استعمال عدسة مبعدة فتخفف من شدة تقريب العين وغالباً ما يستعمل هلال مبعد أما من أجل عين طامسة (d موجب) فيجب استعمال عدسة مقربة . فتعدل ضعف تقريب العين و غالباً ما يستعمل هلال مقرب .



شكل (22).

ـ - مد البصر الشيفي (القدع)

يصاب به الإنسان بعد سن (45-50) سنة حيث تقل مرونة الجسم البلوري تدريجياً مع تقدم العمر، وتفقد العضلات التي تتحكم في تحدب الجسم البلوري قوتها ، لذا فإن العين تفقد تدريجياً قدرتها في المطابقة ، ويعود سبب ذلك بأن نقطة المدى ثابتة ، بينما نقطة الكثب تتبعن تدريجياً .

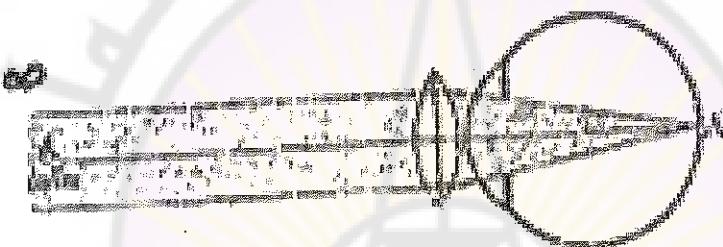
وبالتالي فإن التقدم في السن يتسبب في جميع أنواع العيوب ، أي توجد عيون سليمة قادعة ، وعيون حسيرة قادعة ، وعيون طامسة قادعة . فعندما تكون العين سليمة يجب أن نبعد الكتاب أثناء القراءة ، وذلك بغية الرؤيا الواضحة . وحسير البصر إذا فدعت عينيه ، يستعمل نظارات معددة لرؤية الأجسام البعيدة، ونظارات مقربة للقراءة .

ـ- العين المصابة بالساد .

عندما تشيخ العين تفقد الأوساط المكونة للجسم البلوري شفافيتها ، فتبدو عاتمة ، ومن ثم فإن الضوء لا يستطيع اختراقها ، والوصول إلى الشبكية فتعمى العين لذا يتم استئصال الجسم البلوري ، وبالتالي فإن العين التي تخضع لمثل هذه العملية هي عين مصابة بالساد .

وبما أن الجسم البلوري ، والشبكية يعتبران أحد العناصر المقربة للعين ، فإن العين في هذه الحالة هي عين طامسة ، وفي نفس الوقت فإنها لا تستطيع القيام بالمطابقة ، لأن المطابقة من خصائص الجسم البلوري ، إذا فهي قادعة ولما كان محرق هذه العين المصابة بالساد يقع على بعد 5 أو 6 سنتيمتر خلف الشبكة ، فإنها تصلح بوساطة عدسة مقربة تشكل لنقطة بعيدة B خيالاً يقع على بعد 5 أو 6 سنتيمتر خلف العين ومن ثم تقوم القرنية بكسر الأشعة المتقاربة خلف العين ، وتجمعها في B الواقع على الشبكة ، فترى العين النقطة B بوضوح تام

انظر الشكل (23)



الشكل (23)

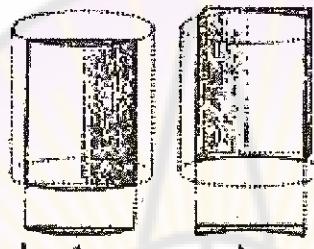
هـ- العين المتصفة باللانتقنية (العين الشوشاء)

اللانتقنية هي إحدى عيوب العين ، وهي العين التي لا تشكل خيال نقطي واقع على المحور لجسم نقطي ، وسبب اللانتقنية أن العين المصابة بها لا تؤلف جملة دورانية حول محورها ، أي أن السطوح التي تحدد أو ساط العين المختلفة ليست كروية كما فرضناها في العين السليمة ، بل أن تحدب القرنية الشفافة أو الجسم البلوري يكون غير منتظم ، ويختلف من شخص لآخر ، ويمر بقيمتين إحداهما عظمى والأخرى صغرى .

فالجملة الضوئية التي تتتألف منها العين المصابة باللانتقنية ، تكون متاظرة بالنسبة لمستويي تناظر يمران بخط البصر ويكونا متعمدين فيما بينهما .

يتم تقويم عيب التناظر للعين وتحديد العدسة المصححة التي تسمح بإعادة التناظر الدوراني للعين ، وغالباً ما يتم التصحيح بعدسات اسطوانية ، أو كروية اسطوانية مناسبة ، وهي نفسها غير نقطية ، ولكن في اتجاه معاكس (الشكل 24)

العدسات الكروية الاسطوانية وتستخدم عندما تكون العين حسيرة وغير نقطية ، أو طامسة وغير نقطية ، والوجه الكروي إما مبعد أو مقرب .



عدسة مستوية اسطوانية محدبة (a) عدسة م-curva اسطوانية محدبة
عدسات اسطوانية :

الشكل (24)

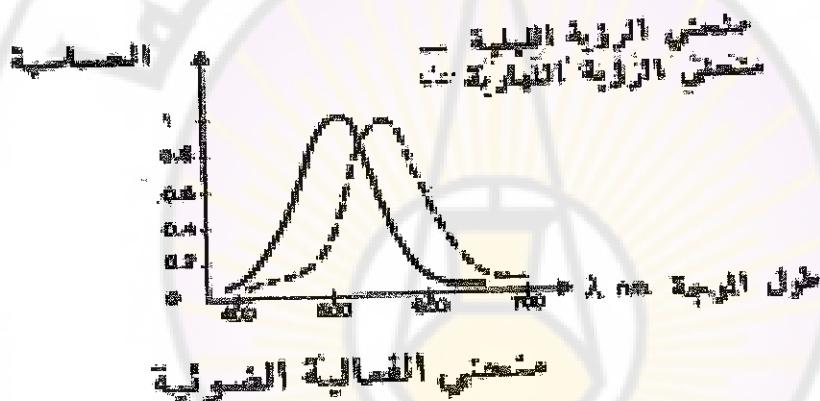
17-6 منحنى الفعالية الضوئية .

إن العين غير حساسة للأشعة فوق البنفسجية ، وتحت الحمراء ، بينما تمتلك حداً أعلى من الحساسية من أجل الأشعة الخضراء ، ذات الأطوال الموجية 555 نانومتراً .

ونطلق على العلاقة ما بين الأضواء التي تعطي الحساسية نفسها من أجل الأشعة ذات الأطوال λ والأشعة λ_m اسم معامل الفعالية الضوئية .

ويتبادر هذا المعامل عندما تتبدل λ من 400 انغستروم إلى 800 انغستروم ونلاحظ في الشكل (25) أنه يأخذ القيمة (1) عندما تكون $\lambda_m = \lambda$ ، بينما يعطي الرقم (0.5) من أجل طول موجة 500 انغستروم (الأزرق) ، وطول موجة مساوٍ 600 انغستروم (الأصفر) .

والحصول على الحساسية الضوئية نفسها تجاه الضوئين الأزرق والأصفر ، يلزمنا ضعف الشدة الضوئية بالمقارنة مع شدة اللون الأخضر ذي الطول الموجة $\lambda = 555$ انغستروم؟



شكل (25)

6-18-تصنيف الآلات الضوئية ومميزاتها :

الآلات الضوئية جمل ضوئية تتتألف من كواسر ومرابيا (مستوية أو كروية غالباً) تستعمل للتصوير أو لفحص الأشياء الصغيرة أو الأجرام البعيدة ، وهي في معظم الأحيان جمل محورية تشكل للجسم المدروس خيالاً حقيقياً أو وهمياً تتخذ جميع الاحتياطات لتخلصه من الزيوغ حتى يكون محاكيًّا للجسم بقدر الإمكان . وتنتمي هذه الآلات إلى أحد الصنفين الرئيسيين التاليين :

١ - الآلات البصرية :

وتهدف إلى مساعدة العين البشرية في فحص الأشياء فتعطي للجسم المدروس خيالاً وهمياً تشكل له العين خيالاً حقيقياً على شبكتها . وعلى هذا الأساس تتعلق مزايا هذه الآلات بخواص العين الفاحصة . وينتمي لهذا الصنف المكروة والمجهر والنظارة الفلكية .

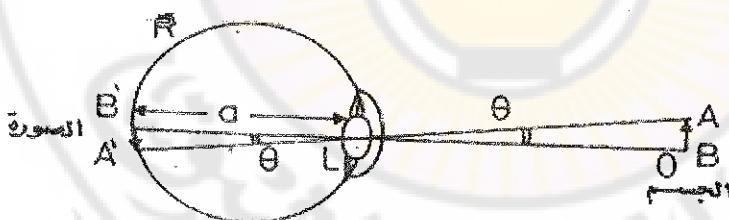
٢ - آلات الإسقاط :

وتعطي للجسم المدروس خيالاً حقيقياً يستقبل على لوحة أو فلم تصويري . وينتمي لهذا الصنف آلة التصوير وألات الإسقاط السينمائية .

١ الآلات البصرية

أ- الزاوية البصرية .

الآلات البصرية هي أجهزة تستهدف عادة مساعدة العين في الرؤية الواضحة للأجسام ، وتعتمد وضوح الرؤية على الزاوية البصرية ، وهي الزاوية التي يرى ضمنها الجسم من العين (شكل 26) .



شكل (26)

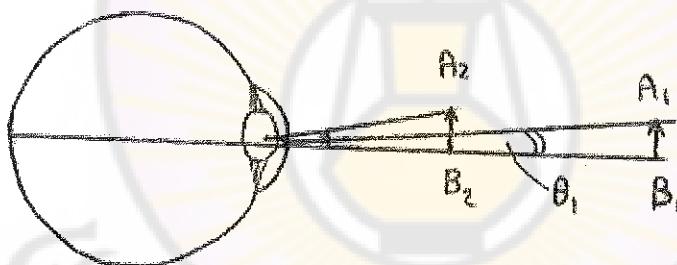
نفرض جسماً ab موضوعاً عند نقطة (O) أمام العين ، يتكون للجسم خيال a'b' على شبكة العين . نفرض أن θ هي الزاوية التي يصنعها الجسم عند العين .

إذا كان قطر كرة العين A ، من الشكل (26) نجد أن :

$$\theta = \frac{a'b'}{A} \quad (6-12)$$

حيث θ تفاس بالراديان .

أي أن طول الخيال $a'b'$ على شبكة العين يتناسب مع الزاوية البصرية θ مع العلم أن قطر كرة العين مقدار ثابت . وواضح أنه كلما ازدادت الزاوية البصرية .. كلما ازداد حجم الخيال ، المكون على الشبكة وبالتالي ازداد وضوح رؤيه الجسم . وذلك ما يحدث عندما نقترب من الجسم لزيادة وضوح رؤيته ، حيث أن الزاوية البصرية تزداد . وبالرغم من عدم تغير حجمه (شكل 27) .



(شكل 27)

ويعتمد عمل المجهر والمنظار على زيادة إبصار الجسم المراد رؤيته ، باستخدام مجموعة من عدسات تكون للجسم خيالاً أمام العين ، بحيث تكون الزاوية البصرية كبيرة فتراه العين بوضوح (شكل 28) .

ب - تكبير الجهاز البصري ، العدسة المكبرة

إن تكبير الجهاز البصري هو العدد الذي يبين كم مرة تزيد الزاوية φ التي ترى بها العين خيال الجسم في الجهاز ، على زاوية النظر φ_0 التي ترى بها العين الجسم بدون الجهاز :

$$E = \frac{\varphi}{\varphi_0} \quad (6-13)$$

بما أن الزاويتين φ و φ_0 صغيرتان عادة ، لذا غالباً ما نجد تكبير الجهاز البصري من العلاقة التقريبية :

$$E \approx \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi_0} \quad (6-14)$$

ج - العدسة المكبرة :

هي أحد أبسط الأجهزة البصرية ، وهي عدسة مقربة مخصصة للنظر إلى الأختيلة المكبرة لأجسام صغيرة ، يوضع الجسم المنظور بالعدسة المكبرة عادة في المستوى المحرقى للعدسة أو أقرب من ذلك إلى العدسة بقليل والشكل (28 ، أ) يبين جسماً صغيراً AB وخياله في العين A_1B_1 . فإذا وضع الجسم AB على مسافة أفضل رؤيا (L) عن العين ، يرى عندئذ بالزاوية البصرية φ_0 . نضع الآن عدسة مكبرة أمام العين ، ونحرك الجسم AB بحيث يصبح في مستوى المحرقى شكل (28 - ب) تقع عندئذ من كل نقطة من الجسم AB على العين بعد العدسة المكبرة حزمة من الأشعة المتوازية .

فتجمعها المجموعة البصرية للعين على الشبكية حيث يتكون الخيال A_2B_2 ، وبما أن الجسم يرى في هذه الحالة بزاوية φ أكبر من الزاوية φ_0 ، لذا يكون الخيال A_2B_2 أكبر من A_1B_1 ويستطيع الإنسان رؤية تفاصيل للجسم AB

لم يكن باستطاعته رؤيتها عند النظر إليه بالعين المجردة يمكن التعبير عن تكبير العدسة المكبرة في هذه الحالة بالعلاقة (6-14) :

$$E = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_0} = \frac{AB}{F} / \frac{AB}{L} = \frac{L}{F}$$

نلاحظ عند الإنسان السليم النظر $L = 0.25 \text{ m}$ لذا تكون لدينا الصيغة النهائية لتكبير العدسة المكبرة :

$$E = \frac{L}{F} = \frac{0.25}{F} \quad (6-15)$$

نلاحظ أنه في هذه الحالة تكون العين مكيفة على الالانهائية ، لذا يرى الإنسان الجسم AB خلال العدسة المكبرة بدون توتر ولا يتعب لمدة طويلة.

إذا نقل الجسم AB من المستوى المحرقى وقرب للعدسة المكبرة شكل (28-حـ) يمكن عند الحصول على خياله $A'B'$ على مسافة أفضل رؤيا (L). وبما أن زاوية النظر تكون في هذه الحالة أكبر بشيء مما كانت عليه في الحالة السابقة ، لذا يكون التكبير أيضاً أكبر :

$$E = \frac{L}{F} + 1 \quad (6-16)$$

من الشكل (27 ، حـ) نجد:

$$\operatorname{tg}\varphi = AB/d$$

$$E = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi_0} = \frac{AB}{d} / \frac{AB}{L} = \frac{L}{d} = \frac{1}{d} L$$

بما أن الخيال $A'B'$ وهمي ، لذا ينبغي وضع إشارة (-) أمام f في المعادلة :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

وذلك تصبح على الشكل التالي :

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{L} = \frac{1}{F}$$

ومن العلاقة :

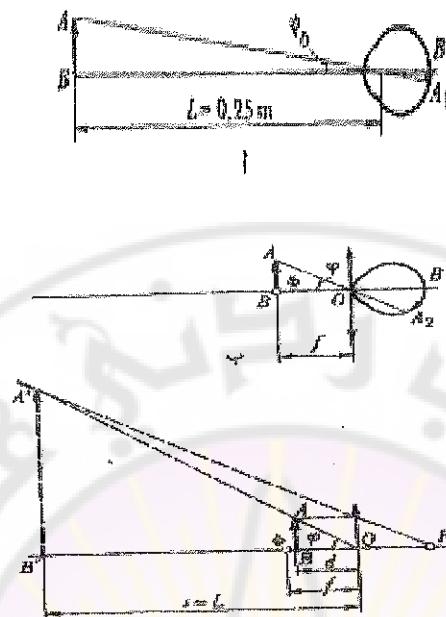
$$\frac{1}{d} = \frac{L+F}{LF}$$

نجد :

$$E = \frac{(L+F)L}{LF} = \frac{L+F}{F} = \frac{L}{F} + 1$$

وهكذا فإنه إذا كانت العين مكيفة على مسافة أفضل رؤيا يكون تكبير العدسة المكيرة أكبر بواحد من التكبير عند تكيف العين على اللانهاية ، ولكن في الحالة الأولى تكون العين في وضع توتر وتعب.

لذا فإنه عندما ينظر الإنسان خلال العدسة المكيرة تتكيف العين ذاتها بسرعة على اللانهاية وهذا يعني أن تكبير العدسة المكيرة يتحدد عملياً بالمعادلة . (6-15)



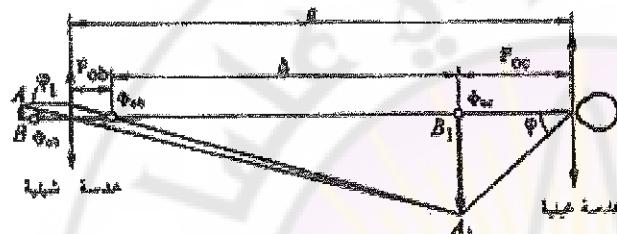
(شكل 28 أ,ب,جـ)

٤ - المجهر :

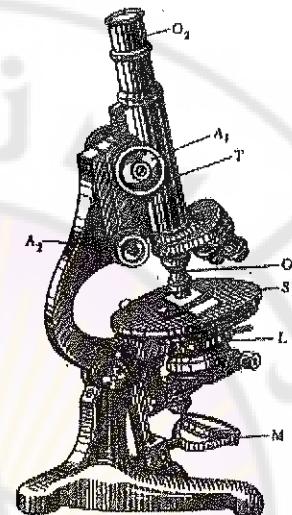
إن الجهاز الذي يمكن من الحصول على تكبير كبير عند النظر إلى أجسام صغيرة يدعى المجهر (شكل 29) ، وهو يتكون من عدستين مجمعتين بقوة بصريّة عالية . والعدسة التي يوضع أمامها الجسم تسمى عدسة جسيمية (O_1)، والعدسة التي ينظر خلالها بالعين تسمى عدسة عينية (O_2) .

العدسة الجسيمية والعدسة العينية للمجهر هما عبارة عن مجموعتين بصريتين مستقلتين محصورتين في إطارين منفردين مركبين داخل أنبوبة معدنية تسمى أنبوبة المجهر (T) . يوضع الجسم المنظور على المنضدة (S) ، ويضاء من الأسفل بواسطة المرأة (M) ، ومجموعة العدسات (L) وللحصول على خيال واضح تحرك الأنبوبة بواسطة لوبيي A_1 أو A_2 يبين (الشكل 30) ، مسیر الأشعة داخل المجهر يوضع الجسم AB خلف المحرق الأساسي للعدسة

الجسيمية ، في المحرق الأساسي تقرباً . وتركب العدسة العينية بحيث يقع الخيال المقلوب وال حقيقي للجسم في محرقها الأساسي ، وتعمل كعدسة مكبرة (انظر الشكل 28 - ب)



شكل (30)



شكل (29)

لوضوح الآن كيف يحدد تكبير المجهر . فالشخص الذي ينظر في العدسة العينية يرى الخيال A_1B_1 بزاوية φ الشكل (30)

نجد :

$$\tan \varphi = \frac{A_1 B_1}{F_{oc}}$$

$$A_1 B_1 = ((a - F_{oc}) \tan \varphi_1$$

وبما أن :

$$\tan \varphi_1 \approx AB / F_{ob}$$

$$A_1 B_1 = (a - F_{oc}) AB / F_{ob}$$

لذا فإن

$$\tan \varphi = \frac{A_1 B_1}{F_{oc}} = \frac{(a - F_{oc})AB}{F_{oc} \cdot F_{ob}}$$

بما أن $\tan \varphi_0 \approx AB/L$ (حيث L مسافة أفضل رؤيا) . لذا فإن تكبير المجهر :

$$E = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_0} = \frac{(a - F_{oc})AB \cdot L}{F_{oc} \cdot F_{ob} \cdot AB} = \frac{(a - F_{oc})L}{F_{oc} \cdot F_{ob}}$$

وعند الأخذ بعين الاعتبار أن البعد المحرقي للعدسة الجسيمية صغير يمكن اعتبار المقدار $(a - F_{oc})$ مساوياً تقريباً للمسافة بين محرقي العدستين الجسيمية والعينية التي يرمز لها بـ Δ ، وتسمى طول أنبوبة المجهر ويمكن عندها التعبير عن تكبير المجهر بالعلاقة :

$$E = \frac{0.25}{F_{oc}} \cdot \frac{\Delta}{F_{ob}} \quad (6-17)$$

وبما أن : $E_{oc} = \frac{0.25}{F_{oc}}$ هو تكبير العدسة العينية ، فإن :

$$E_{\text{un}} = \frac{\Delta}{F_{ob}}$$

هو تكبير العدسة الجسيمية ، لذا يمكن القول بأن تكبير المجهر يساوي حاصل ضرب تكبيري العدستين الجسيمية والعينية :

$$E = E_{ob} \cdot E_{oc} \quad (6-18)$$

نلاحظ أن الإنسان يرى من خلال المجهر خيالاً وهمياً ومكبراً ومقلوباً للجسم المنظور ، وتعطي المجاهر البصرية تكبيراً لا يزيد على 1000 مرة .

هـ - نظارة كيلر .

إن الجهاز المخصص لرصد الأجسام البعيدة التي لا يمكن تقريرها للعين يسمى النظارة الفلكية وقد صنعت أول نظارة فلكية عام 1609 م من قبل العالم الإيطالي غاليليو والعالم الألماني كيلر .

تسمى النظارة الفلكية التي يتم فيها تكبير الزاوية البصرية بواسطة عدسات نظارة كاسرة والنظارات التي يمكن فيها إدراك هذه الظاهرة نفسها بواسطة مرايا كروية ، تسمى بنظارات عاكسة .

ت تكون نظارة كيلر من عدستين مقربتين ، عدسة جسيمية وعدسة عينية والشكل (31) يبين مسیر الأشعة في نظارة كيلر ، يكون للعدسة الجسيمية عادة حجم كبير ، وقوة بصرية صغيرة ، بينما تعمل العدسة العينية كعدسة مكبرة ، ينظر من خلالها إلى الخيال الذي تكونه العدسة الجسيمية ، ويكون خيال الجسم AB عملياً في المحرق الأساسي للعدسة الجسيمية مثقب بينما تركب العدسة العينية بحيث يقع هذا الخيال في محرقها الأساسي ، كذلك ϕ_0 و بالتالي فإن المسافة بين العدستين الجسيمية والعينية تساوي مجموع المحرقين F_{oc}, F_{ob} ، أي أن طول نظارة كيلر (a) يساوي :

$$a = F_{oc} + F_{ob} \quad (6-19)$$

لنجد تكبير نظارة كيلر فالشكل (30) يبين أشعة آتية من جسم بعيد جداً ، يرى بالعين المجردة بزاوية φ_0 وعندما ينظر الإنسان إلى هذا الجسم ، خلال نظارة كيلر ، فإنه يرى في العدسة العينية خياله A_1B_1 بزاوية φ ، وبما أن

$$\tan \varphi_0 = \frac{A_1 B_1}{F_{oc}}$$

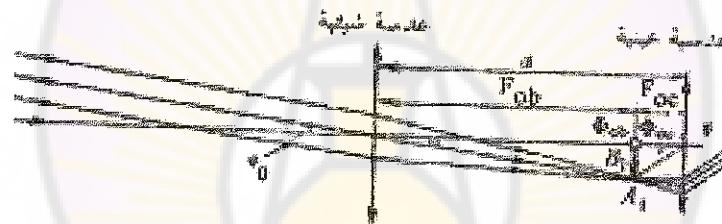
$$\tan \varphi = \frac{A_1 B_1}{F_{ob}}$$

لذا يكون تكبير نظارة كيلر :

$$E = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_0} = \frac{A_1 B_1}{F_{oc}} / \frac{A_1 B_1}{F_{ob}} = \frac{F_{ob}}{F_{oc}} \quad (6-20)$$

من العلاقة (6-20) ينبع أنه للحصول على تكبيرات عظيمة يجب أخذ العدسة الجسيمية لنظار كيلر بمحرق بعيد ، والعدسة العينية بمحرق قريب .

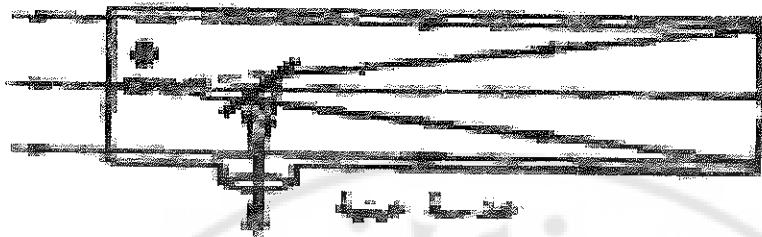
والنظارة الفلكية المخصصة لرصد الأجرام السماوية تسمى المرقب والعدسات الجسيمية في النظارات الكاسرة الحديثة قطر أكبر من المتر ، وبعد محرق يقارب لـ 20m .



شكل (31)

وفي الشكل (32) رسم مخطط لجهاز النظارة العاكسة حيث يقع محرقها في النقطة O ، والعدسة العينية مركبة في موضع جانبي ، وتسقط عليها الأشعة بعد انعكاسها عن مرآة مستوية . وتبلغ فتحة مرآة المرقب 5m .

إن المرقب لا يساعد فقط على تمييز الأجسام الواقعة على مسافة زاوية قريبة من بعضها بعضاً فحسب ، بل إنه يمكن من رصد المصادر الضوئية الضعيفة جداً ، نظراً لأن العدسة الجسيمية تجمع حزمة واسعة من الأشعة (أوسع بكثير من تلك التي تجمعها حدقة العين المجردة) .



شكل (32)

هـ - منظار غاليليو

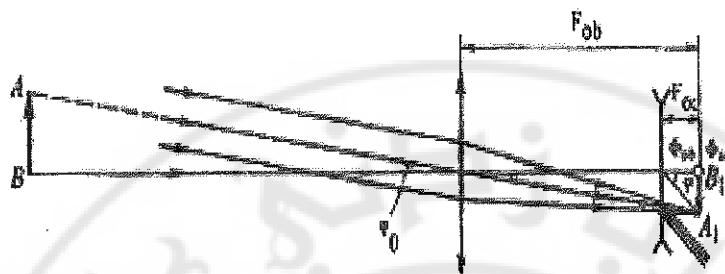
يكون خيال الجسم في نظارة كيلر مقلوب وليس لذلك أهمية في رصد الأجرام السماوية ، ولكنه غير ملائم لرصد الأجسام الواقعة على سطح الأرض لذا توضع في النظارات البصرية المخصصة للرصد على الأرض بين العدسة الجسيمية والعدسة العينية عدسة إضافية ، تحصر مهمتها في قلب الخيال .

ويزداد طول النظارة عند ذلك بـ $4F$ حيث F هو البعد المحرقي للعدسة الإضافية . ونظراً لضخامة هذه النظارة تستبدل بنظارة غاليليو التي تتكون من عدسة مقربة (عدسة جسيمية) ، وعدسة مبعدة (عدسة عينية) ، كما في الشكل (33) وترتكب فيها العدستان الجسيمية والعينية بحيث ينطبق محرقاها ، كما ورد في الفقرة السابقة ، وتبقى عند ذلك العلاقة $a = F_{oc} + F_{ob}$ صحيحة مع الأخذ بعين الاعتبار الإشارة السالبة لـ F_{oc} نوجد تكبير نظارة غاليليو من العلاقة (20) وهو أصغر من تكبير نظارة كيلر .

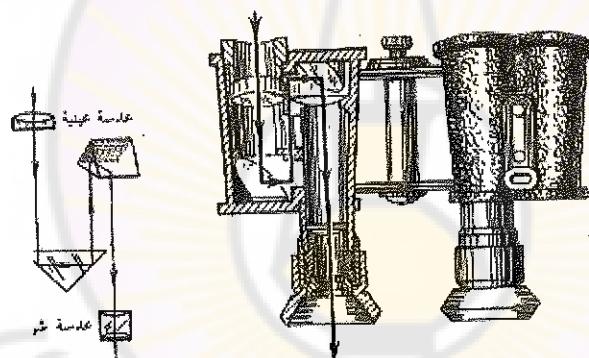
أما المنظار المسرحي فيتكون من اتحاد نظارتي غاليليو ، وهو ملائم لكونه صغير الحجم ، ويعطي المنظار المنشورى تكبيراً أكثر قوة

(شكل 34) ، وهو عبارة عن اتحاد نظارتي كيلر . ويقلب الخيال في هذا المنظار ليس بواسطة عدسة ، بل بواسطة منشورين بانعكاس كلی موجودين في

كل نظارة وبضمن هذا حجماً صغيراً للمناظر المنشوري مع تكبير عظيم للأجسام المنظورة .



شكل (33)



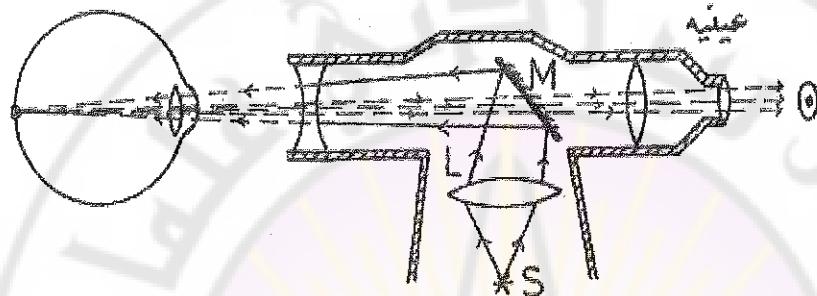
شكل (34)

ي- منظار فحص العين :

هو منظار يستخدمه أطباء العيون ، لفحص قاع العين ، والكشف عن حالة الرؤيا وتصحيح عيوبها .

ويتكون من مصدر ضوء S موضوع أمام عدسة مقربة (L) ، على بعد أكبر قليلاً من بعدها المحرقي ، فتتجمع الأشعة لتسقط على مرآة M جزءاً منها الأوسط نصف مفചض وذلك ليسمح بالرؤية خلالها . تعكس الأشعة على

المرأة M لتسقط على عدسة العين ، وتتجمع في نقطة داخل العين إذا كانت هذه النقطة على شبكة العين ترتد عليها الأشعة ، وترجع من العين على شكل حزمة متوازية ، وتتفذ من الجزء غير المفاضن ، من وسط المرأة إلى عين الطبيب ، فيرى خيال الشبكة واضحاً ومكبراً، الشكل (35) .



شكل (35)

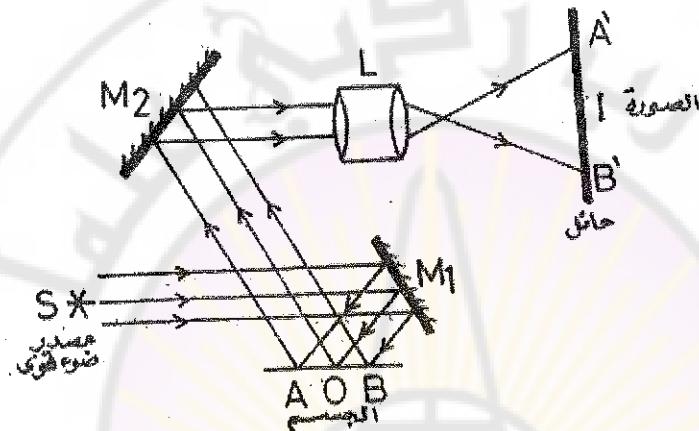
وإذا كانت العين غير سليمة ، تتشكل في نقطة قبل الشبكة في حالة قصر النظر ، وتتشكل في نقطة بعد الشبكة في حالة بعد النظر ، وفي كلتا الحالتين لا يرى خيال الشبكة واضحاً لعين الطبيب

والإصلاح عيوب النظر (الرؤيا) ، يضع الطبيب ما يلزم من عدسات أمام عين المريض ، حتى يرى أن الأشعة قد تجمعت تماماً على الشبكة ، وبديل ذلك على أن خيال المرئيات سوف يتكون عليها أيضاً ، إذا استخدم المريض هذه العدسات ، وبذلك نرى المرئيات واضحة

ت - الإبدياسكوب (جهاز الإسقاط)

يستخدم هذا الجهاز للحصول على خيال مكبر لأجسام غير شفافة ، مثل صورة مطبوعة أو ورقة في كتاب ، وتعتمد نظرية الجهاز على إضاءة الجسم

إضاءة شديدة بواسطة مصدر ضوء (S) ، ومرآة عاكسة (M1) كما في الشكل (36) ثم يستقبل الضوء المنعكس من المرآة (M1) على مرآة ثانية M₂ ومنها ينعكس إلى عدسة (L) ، حيث يتكون بواسطتها خيال حقيقي للجسم (O) على حاجز بعيد (A') .



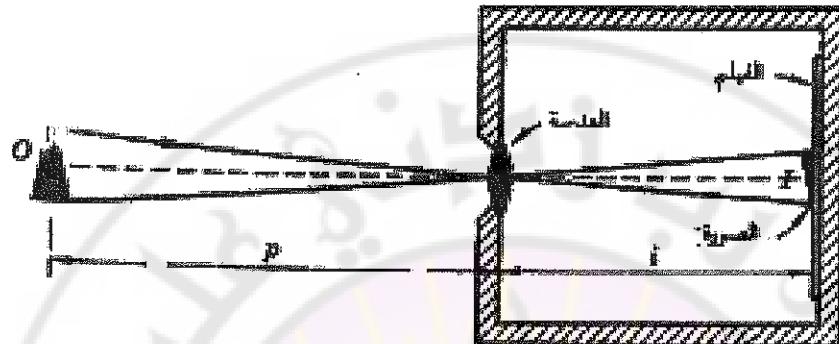
شكل (36)

2 - آلات الإسقاط

- آلة التصوير البسيطة .

تعمل آلة التصوير كالعين البشرية ، فهي تستخدم عدسة لتكوين خيال جسم ما على الفيلم والفيلم هنا يقوم مقام الشبكة في العين والشكل (37) يبين آلة تصوير بسيطة . يكون الخيال مقلوب و حقيقي على الفيلم وعلى عكس آلية العين فإن عدسة آلة التصوير لا يمكن جعل بعدها المحرقي متغيراً ولذا للحصول على خيال جيد على الفيلم فإن العدسة يجب أن تتحرك للأمام وللخلف حين تتغير مسافة الجسم . وآلات التصوير التي لا تمتلك عدسات متحركة يكون لديها ثقب

صغير مفتوح أمام العدسة ، أي أنها تعمل كآلية التصوير ذات النقب التي لا عدسات لديها مطلقاً ، فهي تستعمل فقط ثقب يسمح لضوء بالسقوط على الفيلم



أسئلة الفصل السادس

1- عرف كلاً مما يأتي :

أ- سطح الموجة

ب- الشعاع الضوئي

ج- علم الضوء الهندسي

د- ظاهرة انعراج الضوء

2- احسب تواتر وطاقة الفوتون البنفسجي الذي طول موجته 0.4 ميكرون يدخل شعاع بسيط في كرة شفافة متGANسة ويغطي داخلها انعكاسان جزئيان قبل أن يبرز منها .

3- ادرس تغيرات زاوية الانحراف (بين الشعاع الوارد والشعاع البارز)
بدلالة زاوية الورود حيث أن : $n = 1,31$

4- ما لمقصود بكل مما يأتي :

أ- ملحقات العين

ب- جدار العين .

ج- الأوساط الشفافة .

د- الخلط الزجاجي .

هـ - الجسم البلوري .

5- تكلم عن بنية الشبكية .

6- اشرح آلية المطابقة .

- 7- عدد عيوب العين .
- 8- ما المقصود بقصر النظر وكيف يعالج .
- 9- ما المقصود ببعد النظر وكيف يعالج .
- 10- اشرح عيب مد البصر الشيفي (القدع)
- 11- اشرح ما المقصود بالعين المتصفة باللانقطية .
- 12- عرف زاوية الإبصار .
- 13- صف المجهر ، وكيف يحدد تكبير المجهر .
- 14- اكتب ما تعرفه عن أنبوبة كيلر ، وكيف نحدد تكبير أنبوبة كيلر .
- 15- صف أنبوبة غاليليو .
- 16- صف منظار فحص العين ، وكيف يصلح الطبيب بواسطته عيوب النظر .

الفصل السابع

الإشعاعات المؤينة وغير المؤينة وتأثيراتها البيولوجية

تقسم الإشعاعات من حيث تأثيرها البيولوجي - حسب طاقتها - إلى إشعاعات مؤينة وغير مؤينة . أما الإشعاعات غير المؤينة فهي إشعاعات ذات طاقة محدودة لاتكفي لتأثين الوسط المحيط بها ، وهي طاقات منخفضة لا تسبب تلفاً مباشراً للمواد البيولوجية ، وإن كانت الابحاث قد بينت أنها تؤثر في صحة الإنسان والحيوان على السواء .

1-7-الإشعاع غير المؤين:

يمكن تصنيف الإشعاعات غير المؤينة حسب طاقاتها المتزايدة أو استطاعاتها على النحو التالي :

الأمواج الراديوية - الأمواج الميكروية - الأشعة تحت الحمراء - الضوء المرئي - الأشعة فوق البنفسجية - الأمواج الليزرية

تبعد ترددات الأمواج الميكروية وأمواج الراديو ν من القيمة $K \text{ Hz}$ 100 وحتى التردد $G \text{ Hz}$ 300 تقريباً وتناسبها طردي مع الطاقة - وفق العلاقة $E = h\nu$ -

إن مصادر الأمواج السابقة ، هي إما طبيعية ، أتية من الشمس والنجوم والعواصف الرعدية ، أو صناعية تصدر عن الرادار ومرسلات الاتصالات (الأقمار الصناعية) وأفران الميكرويف .

تستخدم الأمواج الميكروية في تسخين الأنسجة العميقة لعلاجها من الآلام الروماتيزمية كما تستخدم أيضاً في التسخين الكبير للأورام السرطانية ، كونها أكثر أماناً ، وتكون طاقاتها عادة في حدود $watt$ 300 . وللأمواج الميكروية

والقصيرة استخدامات متعددة. في الصناعة مثلاً بالمسرعات الخطية ، وفي اللحام ، والتجفيف ، وإنتاج البوليمرات وغيره للأمواج الميكروية تأثيرات حرارية على المواد والأنسجة ويكون ذلك ، عن طريق رفع درجة حرارتها . أو تأثيرات أخرى غير حرارية عن طريق تفاعل المادة مع الحقل الكهربائي ، والمحنطيسى لتلك الأمواج

١-١-٧- التأثير البيولوجي للموجات الميكروية وموارد الراديو :

نتيجة للاستخدامات الواسعة لتلك الأمواج ، تبين أن لها تأثيرات بيولوجية في جسم الإنسان .

تؤثر الموجات الميكروية ، وموارد الراديو على جسم الإنسان نتيجة لا متضاد للجسم للطاقة المصاحبة تأثيراً حرارياً وتأثيراً ناتجاً عن المجال الكهربائي لتلك الموجات ، إذ أن الارتفاع في حرارة جسم الكائن الحي تتم عندما يكون المعدل في زيادة درجة حرارة الجسم أكبر من معدل فقدانها ، والنتيجة النهائية هي الوفاة إذا استمرت هذه الزيادة ، وهذا ما أثبتته التجربة التي أقيمت على أرنب .

ومن التأثيرات التي تسببها الموجات الميكروية والراديوية في الكائن الحي ، عتمة العين والتآثير على الجهاز التناسلي عند الرجل ، والتآثير في الأجنحة ، والخلايا ، والكروموسومات ، والغدد الصماء ، والجهاز العصبي الخ

١-٢-٧- الوقاية والأمان من الموجات الميكروية والراديوية

أوصت الجمعية الدولية للوقاية من الإشعاع ، بأن لا تزيد الطاقة النوعية الممتصة لترددات أعلى من 10MHz للعاملين عن 0.4W.Kg^{-1} لمدة ست دقائق لكل جسم ، أو 4W.Kg^{-1} لكل غرام من الأنسجة المعرضة ، ولكن لعامة

الجمهور ، تكون قيمة الطاقة النوعية العظمى الممتصة هي : $0,08W.Kg^{-1} \rightarrow 0,8W.kg^{-1}$ على التوالي لكل من الجسم ككل وواحد غرام من الأنسجة المعرضة للإشعاع من الجسم المدروس.

للوقاية من الإشعاعات الناتجة عن مصادر الموجات الميكروية والراديوية ينبغي قياس مستوى شدة الموجات وال المجالات الكهربائية والمغناطيسية المرافقة ، من قبل أشخاص متربين ، وعلى قدر من الفهم لخطورة تلك الإشعاعات .

في حالة استخدام تلك الإشعاعات في العلاج ، ينبغي أن لا تلامس الأقطاب المستخدمة مباشرة ، المنطقة المعالجة ، كما ينبغي توخي الحذر في تطبيق توصيات منظمة الصحة العالمية في هذا الخصوص ، من حيث عدم تسرب الأشعة ، وأن لا يتعرض لخطرها إلا أقل عدد ممكن من العاملين ، واستخدام الملابس الواقية ، ولبس نظارات خاصة تحد من دخول تلك الأشعة إلى العين ، سواء كانت للعاملين ، أم للمرضى المعالجين .

3-1-7- الأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي:

تكون مصادر تلك الأشعة طبيعية ناتجة عن الشمس ، أو تكون صناعية ، تنتج عن بعض المصانع ، كمصنع صهر الحديد أو صهر الزجاج .

تصنف الأشعة تحت الحمراء ضمن مجالات ثلاثة :

أ- الأشعة تحت الحمراء ذات المجال A تبدأ أطوال موجاتها من 780 nm وحتى 1400nm

ب- الأشعة تحت الحمراء ذات المجال B تتراوح أطوال موجاتها من 1,4 حتى 3 ميكرو متر

ج- الأشعة تحت الحمراء ذات المجال C وتتراوح أطوال موجاتها من 3 ميكرو متر وحتى 1 ملي متر ، بينما يتراوح طول موجة الأشعة المرئية من 400 نانومتر وحتى 780 نانو متر .

إن امتصاص الأشعة تحت الحمراء من النوع C يؤثر في قرنية العين ، ويكون التأثير أشد إذا كانت العين مصابة أصلاً ببعض الأمراض . ويكون التأثير هنا ، عن طريق أكسدة الدهون المكونة لأغشية طبقية الصبغيات .

لا توجد هنالك قواعد قياسية للحماية من مصادر الأشعة تحت الحمراء ، والأشعة المرئية ، ولكن التعرض للضوء المبهر لمدة طويلة ، يمثل خطورة على مكونات العين ، وخاصة عند فحصها ، باستخدام فاحص قاع العين ophthalmoscope . وذلك لأن مثل هذه الأجهزة تستخدم منبعاً ضوئياً ذات شدة عالية ، ويكون مركزاً على نقطة محددة على الشبكية ، ولهذا ينبغي أن تكون مدة فحص العين قصيرة جداً ، وأن لا يعطي المريض أي نوع من قطرات العين التي تسبب في زيادة اتساع حدة العين ، ومن ثم تعطل الأثر الانعكاسي لها في حماية ذاتها .

ومن الأخطر التي تسبب ضرراً في مكونات العين أيضاً ، التحديق في قرص الشمس عند الكسوف لفترة طويلة ، لأن ذلك يسبب حرقاً في الشبكية ، ومن ثم يكون ما يسمى بالنقطة العميماء blind spot . وقد وجد أن الضرر الذي يحدث في شبكية العين يكون عند الضوء المرئي ، ذو الشدة $10^4 \text{ W.Cm}^2 \times 2,8$ تقريباً.

U.V. radiation: 4-1-7- الأشعة فوق البنفسجية

تقسم الأشعة فوق البنفسجية وفقاً لـ الوكالة الدولية للإضاءة إلى ثلاثة مجالات حسب أطوال موجاتها على النحو التالي :

أ- 315—400 n.m

ب- 280—315 n.m

ج- 100—280 n.m

إن الأشعة التي طول موجتها أقل من 200 n.m ليس لها أي معنى بالنسبة للتأثير البيولوجي ، كونها لا تصل إلى الأرض بسبب امتصاصها الشديد ، بواسطة الغلاف الهوائي المحيط بها .

كما تتولد الأشعة فوق البنفسجية إضافة لأشعة الشمس ، من المصادر الأخرى التالية:

1- المصادر المتوجهة ، مثل لمبات الالواح الكوارتزية .

2- لمبات التفريغ الكهربائي الغازية ، وهي لمبات مفرغة من الهواء وتحوي على غازات معينة تحت ضغط معين . يوضع بين طرفيها جهد كهربائي عالي ، يسبب تأين لجزيئات الغاز ، ومن ثم ينبعث طيف ذراته الذي يشتمل على الأشعة فوق البنفسجية .

3- لمبات القوس الكهربائي وتعمل تحت ضغط مرتفع من الغاز الموجود في غلاف من الكوارتز ، والذي يحتوي على قوسين بينهما مسافة لا تتعدي عدة ميليمترات ، وهذه لمبات تتميز بالشدة المناسبة لأشعتها ، مما يجعلها مثالية للأغراض الطبية المختلفة .

4- اللامبات الفلوريسقية : وهي لمبات يطلى جدارها الداخلي بمادة فلوريسقية وتحتوي على بخار الزئبق ، الذي يصدر طيفا تحت تأثير جهد كهربائي وهذا الطيف يثير المادة الفلوريسقية الموجودة على جدار اللامبة ، مما يجعلها تولد الإشعاعات فوق البنفسجية.

5- اللعبات عديمة الأقطاب : وتحتوي هذه اللعبات على بخار الزئبق ، أو مزيج من غازات متعددة ، حيث يثار الغاز بواسطة الطاقة الممتصة من الموجات الميكروية الساقطة عليها .

لأشعة فوق البنفسجية فوائد كثيرة ، وتطبيقات طبية عديدة تعتمد على الطول الموجي ، وفي الوقت نفسه لها تأثير ضار في الكائنات الحية ، مما ينبغي أخذ الحبطة والحذر عند استخدامها

5-1-7- أشعة الليزر - توليدها - استخداماتها الطبية

عندما تثار مجموعة من الذرات أو الجزيئات ، عن طريق امتصاصها طاقة ضوئية ، فإن هذه الذرات أو الجزيئات تصبح قادرة على إصدار هذه الطاقة من جديد ، إذا ما سقط عليها فوتونات لها الطاقة الأولى نفسها ، ونكون النتيجة إصدار عدداً أكبر من الفوتونات ذات الطاقة نفسها ، وبذلك يتم التضخيم . وتميز أشعة الليزر بأنها أشعة ذات كثافة طاقية عالية - وحيدة اللون monochromatic ولا تعاني من الإنحراف ، وهي وحيدة الطور coherent . لذا فإن لأشعة الليزر تطبيقات عديدة في حياتنا اليومية .

تقسم أجهزة الليزر على أساس مادة إنتاجها ، إلى ليزرات غازية ، أو صلبة . كما تقسم على أساس أطوال موجاتها ، إلى ليزرات مرئية ، أو تحت الحمراء ، أو فوق البنفسجية .

يستخدم الليزر اليوم ، في جميع تخصصات الطب المختلفة ، وفي كثير من العمليات الجراحية كأداة قص ولحام . وتميز الجراحة الليزرية عن تلك التقليدية بالميزات التالية:

- 1- استخدام نقية عدم اللمس
- 2- تجري الجراحة بدون نزيف دموي

- 3 عدم حدوث تورم أو تليف لمنطقة الجرح
- 4 قصر فترة الجراحة بالليزر ، والإقلال من الألم
- 5 في حال استخدام الليزر باتفاق الأورام السرطانية ، يمكن القضاء على الخلايا السرطانية المجاورة للورم
- 6 الدقة اللامتناهية في الجراحة .

لكل نوع من الأمراض ، طول موجي ليزري خاص به، فمثلاً تستخدم ليزرات النيوديوم ياج ذات الطول الموجي 515nm في مجال جراحة العيون ، وبالرغم من أن أشعة الليزر غير مؤينة ، لكن بسبب ترابطها وتركيزها يمكن أن تسبب ضرراً كبيراً ، وخاصة للعين . فمثلاً درجة سطوع ليزر الهيليوم - نيون ذو الطاقة 1mW يعادل 1500 مرة سطوع لمبة الضوء العادي ذات الـ Watt 100 . وبمقدار 50 مرة سطوع الشمس .

ولأشعة الليزر تأثير كبير في شبکية العين التي يفقد فيها الإنسان نعمة البصر . وبسبب خطورة أشعة الليزر ، وضعت قواعد للحماية منها ، وعلى هذا الأساس تقسم أجهزة الليزر إلى أربعة أنواع كالتالي :

- 1- ليزرات ذات طاقة أقل من $0.4\mu\text{watt}$ وهي لا تمثل خطورة ، ولكن لا ينصح بتسلیتها على العين أو النظر إليها لفترة طويلة .
- 2- ليزرات ذات طاقة أقل من 1mwatt وهذا ينبغي أن تراعى القواعد الآتية ، للوقاية من خطر تلك الليزرات:
 - أ- عدم التحديق في مصادر إنتاج أشعة الليزر ..
 - ب- عدم توجيه الليزر إلى العين ، وفي حال الضرورة ، ينبغي أن تكون فترات التعرض قصيرة المدة .

- 3- ليزرات ذات طاقة متوسطة ، أكبر من $3m\text{watt}$ وهذه الليزرات تسبب ضرراً للعين ، لأن تأثيرها يكون أسرع من رد الفعل الانعكاسي للعين ، ولهذا ينبغي اتباع القواعد التالية :
- أ- عدم تسلیط الليزر إلى العين
 - ب- لا يتعامل مع تلك الليزرات إلا الأشخاص المدربون على تلك الأجهزة
 - ج- تحديد مسار الأشعة بحيث تكون بعيدة عن الرأس ، والمواد العاكسة
 - د- ينبغي استخدام مرشحات لإنقاص طاقة تلك الأشعة

4- ليزرات ذات طاقة أكبر من 0.5watt . يجب أن تستخدم هذه الليزرات عن بعد ، وأن يستخدم العاملون فيها ، نظارات خاصة لحماية العين . وفي حالة الليزرات ذات الطاقات الكبيرة ، المستخدمة في الليدار LIDAR (التحديد المسافات) ، والأقمار الصناعية ، يجب أن تزود بوسائل أمان خاصة بحيث لا يتعامل معها في الأماكن المأهولة بالسكان ، أو بالطائرات.

2-7- الإشعاع المؤين

إن الإشعاع المؤين ذو طاقة عالية ، ولديه القدرة على تأمين ذرات المادة عند التفاعل معها ، أي تحويلها إلى أيونات موجبة ، وأخرى سالبة .

أنواع الإشعاع المؤين :

يقسم الإشعاع المؤين إلى قسمين رئيسيين :

2-7-1- الإشعاع الكهرومغناطيسي الصادر عن:

- المستوى الذري للمواد ، مثل الأشعة السينية X-Ray
- المستوى النووي ، وذلك أثناء التفكك النووي Radioactive Decay مثل

أشعة γ

7-2-2 - جسيمات مشحونة ، وتشمل الالكترونات فائقة السرعة (جسيمات β السالبة والمؤجلة) بالإضافة إلى جسيمات α (نوى الهليوم) والبروتونات . بالإضافة إلى الجسيمات المشحونة ، هناك جسيمات أخرى غير مشحونة، أهمها النيترونات السريعة والبطيئة ، وكلها تتولد أثناء التفاعلات النووية .

سنتناول فيما يلي وبإيجاز ، وصفا مبسطا لكل من تلك الأنواع المذكورة أعلاه

الأشعة السينية:

إن مصدر الأشعة السينية هي الذرة . ويمكن تمييز نوعين من الأشعة السينية :

أ- الأشعة السينية المميزة للذرات:

ويصدر هذا النوع من الأشعة ، نتيجة لإعادة توزيع الالكترونات في مدارات الذرة المثارة . فعند انتقال الإلكترون من مدار ذي طاقة عالية إلى مدار ذي طاقة أخفض ، فإنه ينبعث منه فوتون (موجة كهرطيسية) طاقته تساوي فرق طاقتى المدارين . وبما أن طاقات مدارات الذرة تختلف من عنصر لآخر . فان ذرات العنصر الواحد تصدر أشعة

سينية بطاقة محددة القيمة ومميزة للعنصر . لهذا يطلق على هذه الأشعة السينية ، صفة المميزة وهي تعتبر بصمة من بصمات العنصر الذي انطلقت منه هذه الأشعة . وبدراسة طيف الأشعة السينية المميزة يمكن التعرف على العناصر التي أصدرتها .

ب- الأشعة السينية الانكباجية :

وتصدر هذه الأشعة نتيجة لحدوث انكباخ شديد للإلكترون عند تصادمه بذرة ما نتيجة لتأثير الحقل الكهربائي الخاص بتلك الذرة ، حيث يحدث للإلكترون انكباخ بسبب قوى التناقض بينه وبين باقي الكترونات الذرة وقوى

التجاذب بينه وبين النواة . وبالنتيجة تتناقص طاقة الإلكترون الصادم ، ويظهر ذلك على شكل موجة كهرومغناطيسية (فوتون) تحمل فرق طاقة الإلكترون قبل وبعد تصادمه . وتسمى هذه الأشعة ، بالأشعة السينية الانكابحية . وهذه الأشعة يتم توليدها عادة في أنابيب الأشعة السينية المستخدمة لأغراض التخدير الطبي وفي بعض أغراض الصناعية .

إن طاقة الأشعة السينية الانكابحية تختلف في قيمتها ، حيث إنها تتولد عن المصدر نفسه إشعارات تبدأ طاقتها من الصفر وحتى طاقة الإلكترون المسرع الوارد على الذرة (المادة) ، وهي أشعة تنتج عن تسارع أو تباطؤ الجسيمات المشحونة كلها لذا فإن طيف الأشعة السينية الانكابحية هو طيف مستمر ، لا يدل على العنصر الصادر منه ، وذلك بعكس الأشعة السينية المميزة .

جسيمات ألفا : تكون جسيمات α مشحونة كهربائيا ، بشحنة موجبة ، وتنتمي عن غيرها من الجسيمات المؤينة بغير كتلتها ، وما جسيم α إلا نواة ذرة الهيليوم التي تتكون من بروتونين ونترونين .

تصدر جسيمات α عند تفكك بعض النظائر الأثقل من الرصاص 208 . ويحمل جسيم α طاقة محددة تميز النظير الذي انطلقت منه ، فهي تعد بصمة من بصمات النظير الذي انطلقت منه .

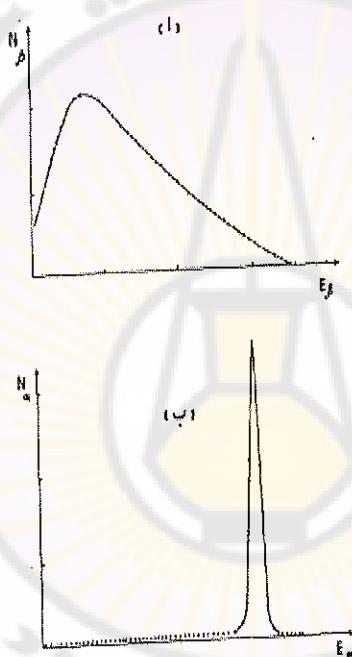
جسيمات β :

إن جسيمات β صغيرة الكتلة إذا ما قورنت بكتلة جسيمات α ويوجد منها نوعان :

- 1- جسيمات بيتا السالبة ${}^{-\beta}$ وهي عبارة عن الكترونات صادرة عن النواة .
- 2- جسيمات بيتا الموجبة ${}^{+\beta}$ وتسمى البوزيترونات ، وكتلتها تساوي كتلة الإلكترون أما شحنتها فموجبة .

تصدر جسيمات β بنوعيها عند التفكك التلقائي لنوى بعض النظائر ، سواء الأخف من الرصاص أو الأقل منه اذا اختلفت النسبة بين عدد النترونات والبروتونات في النواة عن نسبة معينة ، تعرف بنسبة الاستقرار ، هذه النسبة أكبر من واحد بالنسبة لنوى الخفيفة ، وتساوي 1,6 تقريباً بالنسبة لنوى العناصر الثقيلة .

تطلق جسيمات β الصادرة عن نظير مشع ، بطاقة مقاومة ، أي أنها تتميز بطيف مستمر للطاقة ، وهذا ما يميزها عن طيف جسيمات α . الشكل (6-1)



الشكل (7-1)

- أ- العلاقة بين عدد جسيمات بيتا وطاقتها
- ب- العلاقة بين جسيمات ألفا وطاقتها

7-2-3 إشعاعات جاما γ

هي عبارة عن إشعاعات ذات طاقة عالية ، صادرة عن النواة ، وتنطلق هذه الإشعاعات عادة بعد انطلاق إشعاعات α أو β من النواة . وبعد تفكك النواة الأصلية (الأم) وصدور جسيمات α أو β تكون النواة الوليدة في حالة مثارة (غير مستقرة) ، وفيها كمية من الطاقة التي تنطلق على شكل موجة كهرومغناطيسية يطلق عليها اسم إشعاعات γ . وعادة يعود مصدر إشعاعات γ إلى النواة الأصلية (الأم) وليس الوليدة . فعندما يقال أن مصدر إشعاعات γ هو السبيزيوم 137 ، فالمعنى أن السبيزيوم يتفكك مصدراً جسيمات β ومكوناً الباريوم 137 في حالة مثارة ، فيصدر عنده فوتون γ . وتعد إشعاعات γ بصمة من بصمات النظير الذي يصدرها . أي أنه بقياس طاقة إشعاعات γ ، يمكن التعرف بسهولة على النظير المشع الذي يصدرها .

7-2-4-النترونات :

إن النترونات ، هي أحد المكونات الرئيسية للنواة ، وهي جسيمات متعادلة الشحنة ، ولا يوجد في الطبيعة مواد مشعة تصدر نيترونات . ولكن يتم صناعيا تحضير مصادر تصدر نيترونات لاستخدامها في تطبيقات عدّة .

7-2-5-الآثار البيولوجية للإشعاعات المؤينة:

إن تأيين الخلايا الحية في جسم الإنسان ، إما أن يكون مباشراً ، وإما أن يكون غير مباشر . فمثلاً عند امتصاص النيترونات من قبل الجسم تنتقل الطاقة من تلك النيترونات إلى بروتونات الهيدروجين الموجودة بكثرة في الجسم وهذه البروتونات هي التي تؤين الجسم . أو عند امتصاص بعض النيترونات ، تكون نوى جديدة ، فتنطلق أشعة γ التي تؤدي إلى تأيين ذرات الجسم .

هذه الإشعاعات سواء كان مصدرها خارجياً أم داخلياً ، كان مصدرها عن طريق التلوث الداخلي للجسم بالمواد المشعة كلها تؤدي إلى تأثير بيولوجي يؤدي إلى حالات مرضية تتفاوت في خطورتها ، حسب كمية الإشعاعات الممتصة ، وكذلك معدل امتصاصها . وعلى هذا الأساس ، تقسم التأثيرات البيولوجية للإشعاعات في الكائنات الحية إلى نوعين :

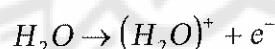
1- ذاتية somatic : وهي التأثيرات الناتجة في الكائن الحي نفسه، الذي يتعرض لجرعات إشعاعية كبيرة ، وعادة ما تكون هذه التأثيرات حتمية أو عشوائية .

2- وراثية genetic : وهي التأثيرات في ذرية الكائن الحي ، نتيجة للتلف الإشعاعي للخلايا الوراثية أو للأعضاء التناسلية .

6-2-7- التأثيرات الحتمية والعلوائية للإشعاع :

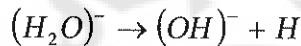
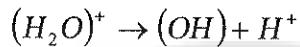
عند مرور الإشعاعات المؤينة خلال خلايا الأنسجة الحية ، فإنها تؤدي إلى إتلافها ، إما عن طريق تأمين مكوناتها مباشرة ، أو عن طريق تأمين جزيئات محتوياتها من الماء ، والذي تقوم نواتجه بعد ذلك ، بإتلاف المكونات الأخرى لها. وتتأمين جزيئات الماء بالخلية بواسطة الإشعاع ، يحدث من خلال عدة مراحل ، نوجزها بما يلي :

1- المرحلة الفيزيائية : في هذه المرحلة تنتقل طاقة الإشعاعات المؤينة إلى جزيئات الماء في الخلية حسب التفاعل التالي :

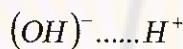


مدة هذه المرحلة لانتجاوز s^{-16}

2- المرحلة الفيزياكيميائية : في هذه المرحلة يتم تفاعل الايونات الموجبة والسلبية ، والناتجة في هذه المرحلة (أ) مع جزيئات الماء الأخرى ، فينتج عن هذا التفاعل مركبات جديدة ، حسب التفاعل التالي :



وهكذا تؤدي هذه التفاعلات الكيميائية إلى النواتج :



توجد الايونات H^+ و $(OH)^-$ بشكل واسع في الماء المعتمد ، وليس لها دور في التفاعلات التالية .

أما H و OH فهي معروفة بنشاطها الكيميائي ، فمثلا اتحاد جذرين من OH يؤدي إلى تكوين ثاني (فوق) أكسيد الهيدروجين :



وهذا المركب يعد عالماً مؤكسداً قوياً .

تحتاج هذه المرحلة إلى مدة لا تزيد عن $S^{-6} 10$ ثانية .

ج- المرحلة الكيميائية : ويتم في هذه المرحلة تفاعل النواتج في المراحل السابقة : H ، OH ، H_2O_2 مع جزيئات المكونات الرئيسية للخلايا ، من دهون وبروتين وأحماض نوية (والتي تمثل المادة الوراثية) وغيرها ، يؤدي

هذا التفاعل إلى تكسير تركيبها السلسلية الطويلة ، وأحداث بعض التغيرات في الجينات .

تحتاج هذه العملية لعدة ثوان .

د- المرحلة البيولوجية: يتراوح زمن هذه المرحلة ما بين عدة دقائق ، وعشرين سنة . وتكون نتيجة الآثار الإشعاعية ، أما موت الخلية ، أو منع ، أو تأخير انقسام الخلية ، أو زيادة معدل انقسام ، أو حدوث تغيرات مستديمة في الخلية ، تنتقل وراثياً إلى الخلايا الوليدة .

إن التأثيرات الحتمية للإشعاع على الإنسان ، يمكن أن تحدث خلال فترة تتراوح بين عدة أسابيع من التعرض لجرعة كبيرة من الإشعاعات ، خلال زمن قصير (المدة ساعات قليلة) وتدلي إلى إصابته بالعديد من الأمراض الإشعاعية . ويرجع السبب في ذلك إلى تلف خلايا النخاع العظمي ، أو الخلايا المعاوية ، أو الخلايا العصبية .

يزداد احتمال الوفاة المبكرة للإنسان بهذه الأمراض ، كلما زادت الجرعة الممتصة . فإذا كانت الجرعة الممتصة في حدود 2 جر أي . فإنه يمكن أن تحدث الوفاة خلال فترة تقدر بين أسبوع أو أسبوعين ، والتأثيرات العشوائية للإشعاعات ، هي تلك التأثيرات التي تنتج عن حدوث تغيرات مستديمة في الخلية بسبب الإشعاعات المختلفة ، والتي يمكن أن تحدث عند مختلف الجرعات، بدءاً بالجرعات الصغيرة ، ويترافق احتمال حدوثها بزيادة الجرعة .

يقصد بالتأثيرات العشوائية في أمراض السرطان بأنواعه ، وفي الأمراض الوراثية ، في أبناء ، وأحفاد المعرضين للإشعاع .

- التأثيرات الوراثية للإشعاع :

تؤدي التأثيرات الوراثية للإشعاعات إلى تلف الخلايا التناسلية ، وهذا التلف يصبحه مجموعة تغيرات ، تعرف باسم التغيرات (الطفرات) الوراثية في المادة الوراثية الخلية ، وعند وصول هذه التغيرات حد معين ، فإنه عند التزاوج ينشأ عنها أجنة مشوهة .

ونظراً لخطورة الإشعاع المؤين على الكائنات الحية ، ومنها الإنسان ، فإن اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاع ، أوصت في نشرتها رقم 60 عام 1991 أن تكون الجرعة الفعالة لعلوم الجمهور ، وفي العام الواحد ، في حدود 1m SV وأن لا تتجاوز 20m SV في السنة ، بالنسبة للعاملين في مجال إنتاج واستخدام المصادر المشعة بأنواعها المختلفة ، بشرط ألا تتجاوز الجرعة خلال (5) سنوات متتالية 100m SV .

وأخيراً ، على الرغم من أن الإشعاع المؤين له أخطاره الكبيرة ، والمهلكة أحياناً ، فله تطبيقات كثيرة جداً في الصناعة والزراعة والطب . والإشعاع المؤين مثل أي وسيلة يستخدمها الإنسان في حياته ، لها فوائد لها ومضارها . وبالتالي يجب تعظيم الفائدة من استخدامها ، وتقليل ما أمكن من مضارها .

الفصل الثامن

الكمون الكهربائي السكوني للخلايا والأنسجة الحية

تمهيد

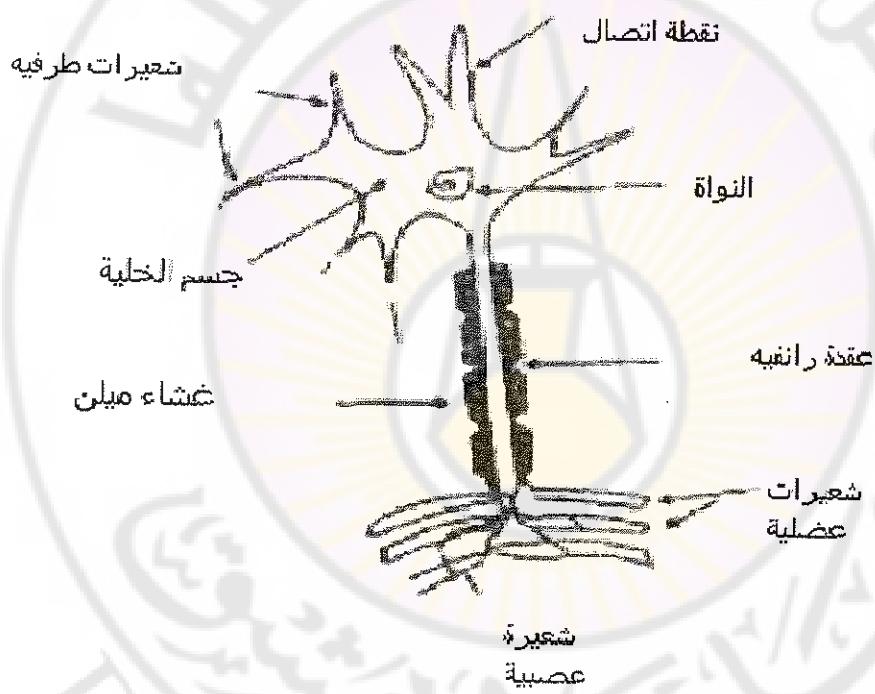
إن انتقال الإحساس في الأجسام الحية قد شغل العلماء والدارسين سنين طويلة وذلك لتفصير وتحليل ما يحدث من إحساس وتبييه في الأجسام الحية المختلفة ومن الظواهر التي تستحق الذكر هي ظاهرة سمكة ثعبان الماء التي تفتقد فريستها عن طريق الصعق الكهربائي بشحنة قد تصل إلى مئات الفولتات فمن أين لها هذه الشحنة وكيف تشكلت ، وهل يمتلك جسم الإنسان شحنات كهر بائية مشابهة .

أجريت الكثير من الدراسات على جسم الإنسان بغية تسجيل نشاطاته الكهربائية ، فوجد أن للقلب نشاطاً كهربائياً ، وكذلك للمخ والعضلات ، وتكون الكهرباء في هذه الحالة متحركة لأنها ترافق حركة الدم في الشرايين .

مادمنا نتحدث عن كهرباء متحركة في جسم الإنسان، فهذا يعني أنه يوجد أيضاً كهرباء ساكنة ، وتمثل تلك الكهرباء في استقطاب الخلايا العصبية ، نلاحظ هذا النوع من الكهربائية في خلايا مختلفة بجسم الإنسان :

- أ- خلايا الجهاز العصبي المركزي (الدماغ) .
- ب- خلايا الجهاز العصبي اللإرادي ونقصد به النخاع الشوكي .
يتكون الدماغ في الإنسان من خلايا عصبية بيضاء ورمادية يحيط به سائل يحميه من الصدمات ، تقوم الخلية العصبية في الدماغ أو النخاع الشوكي ، باستقبال وتحليل وإرسال الرسائل الكهربائية .

ت تكون الخلية العصبية من جسم يستقبل نبضات التبيه عن طريق نهايات توصيل تسمى نقطة الاتصال العصبي وهذه موجودة على سطح الخلية أو على أطرافها المختصة بتلقي المعلومات من الخلايا العصبية المجاورة ، كما هو موضح في الشكل رقم (8-1) فإذا كانت الإثارة كافية فان الخلية تنتج نبضة كهر بائية تصل إلى الخارج عن طريق الشعيرات العصبية المتصلة بها .



الشكل رقم (8-1) رسم تخطيطي للخلية العصبية الحركية

يمكن أن يصل طول المحوار العصبي إلى متر كامل، وهو ينقل النبضات الكهربائية (التببيهات) إلى العضلات، أو الغدد، أو الخلايا العصبية الأخرى، ولكي نفهم تشكل النبضة العصبية، والذي يسمى الكمون الكهربائي النشط يجب علينا فهم الكمون الكهربائي الساكن.

8-1 الكمون الساكن

حاول العلماء منذ زمن طويل قياس الشحنات الكهربائية التي تتكون على الخلايا العصبية وذلك بإدخال مجس داخل شعيرة عصبية بغية قياس فرق الكمون بين داخل وخارج شعيرة ليف عصبي لحيوان الحبار المائي، فوجد أن فرق الكمون هذا يساوي تقريباً 50 ملي فولط، أطلق على فرق الكمون هذا، الكمون السكوني، أو الجهد الساكن للخلية أو بالاً حرى كمون الغشاء، وذلك لأنّه ناتج عن توضع شحنات سالبة مرکزة حول الغشاء و من الجهة الداخلية له.

8-2 مبادئ تشكيل الكمون الحيوي

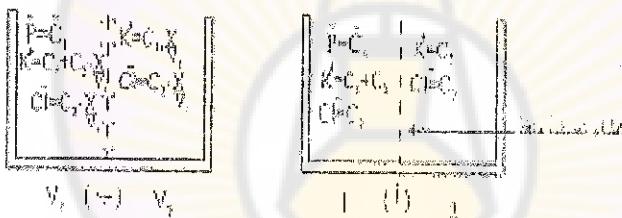
رأينا سابقاً أنّ الخلايا العصبية، عندما تكون في حالة السكون، تكون حاملة لكمون ساكن نتيجة تراكم الشحنات السالبة على السطح الداخلي لغشائها، وهذا الغشاء الذي يحمل هذه الشحنات، يؤدي دوراً أساسياً في تشكيلها لما يحمله من الموصفات التالية:

أ- إنّ الغشاء في هذه الحالة هو نصف نفودي، وذلك لسماته بمرور الشوارد باتجاهه وعدم سماحته بمرورها باتجاه معاكس، وذلك تبعاً لحالة الخلية، إنّ كانت في حالة السكون أو في حالة النشاط.

ب- تركيز الشوارد في داخل الخلية يختلف عن تركيزها خارجها.

3-8- توزع الشوارد على الغشاء نصف النفوذى للخلية :

في حالة الغشاء نصف النفوذى الفاصل بين وسطين مختلفين في التركيز ، فان التوازن يحدث بعد فترة زمنية ، ولفهم هذه الفكرة نفترض وجود غشاء نصف نفوذى ، وأن هذا الغشاء يسمح بمرور شوارد البوتاسيوم والكلور ولا يسمح بمرور شوارد البوتاسيوم المرتبطة بالبروتينات (أي شوارد البوتاسيوم المرتبطة بسلسل عضوية طويلة) . في الشكل رقم (2-2 ، أ) نرى أن تركيز شوارد البوتاسيوم من الناحية اليسرى أكبر منه في الناحية اليمنى ولهذا فإن الشوارد تبدأ في التحرك من الناحية اليسرى إلى اليمنى كما تتحرك شوارد الكلور أيضا في نفس الوقت ليحصل التوازن في النهاية على طرفي الغشاء كما في الشكل (2-2 ، ب) نتيجة تراكم الشحنات السالبة على سطح الغشاء .



الشكل(2-8-أب) أ- بداية تشكل غشاء شبه نفوذى يفصل بين وسطين مختلفي التركيز بـ الوصول إلى حالة التوازن

4- دراسة ترموديناميكية لكمون الغشاء السكוני :

إذا أردنا دراسة ظاهرة ظاهر الغشاء وكمونه السكوني من وجهة نظر ترموديناميكية فيجب علينا البدء بدراسة الطاقة الحرية ΔF اللازمة لتحريك كل من شاردة البوتاسيوم وشاردة الكلور والتي تعطى بالعلاقة :

$$\Delta F_K = RT \ln \frac{K_1}{K_2} \quad (8-1)$$

الطاقة الحرية اللازمة لتحرك شاردة البوتاسيوم

$$\Delta F_{cl} = RT \ln \frac{Cl_1}{Cl_2} \quad (8-2)$$

الطاقة الحرية اللازمة لتحرك شاردة الكلور

تكون الطاقة الحرية النهائية في حالة التوازن متساوية للصفر أي:

$$RT \ln \frac{K_1}{K_2} + RT \ln \frac{Cl_1}{Cl_2} = 0$$

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{Cl_1}{Cl_2} = r \quad (8-3) \quad \text{أو}$$

تمثل r نسبة الشوارد الموجبة إلى الشوارد السالبة الموجودة داخل الخلية، وكلما ازداد تركيز البروتين المرتبط بهذه الشوارد داخل الخلية، ازدادت قيمة النسبة (r) .

لقد وجد أن خاصية النفودية للغشاء الحي تعتمد على سماحية الانتقائية التي تعتمد دورها على تركيز الشوارد خارج غشاء الخلية، كما أن وجود شوارد (NH_4^+) و (COO^-) داخل الخلية يمكن أن تؤدي دورا هاما في سماحية الغشاء الانتقائية.

يمكن تعريف السماحية أو النفودية الاننقائية بالعلاقة :

$$S = \frac{n_K}{n_a} \quad (8-4)$$

n_K تمثل عدد الشوارد الموجبة المارة من خلال الغشاء خلال واحده الزمن

n_a وتمثل عدد الشوارد السالبة المارة من الغشاء خلال واحده الزمن

فإذا كان محلول كهربائيا يحتوي على كلور الصوديوم ، تركيزه (C) داخل وخارج الخلية ، أي أن

$$Na_1 = Cl_1 = C$$

وتركيز الشوارد السالبة المقيدة (A) أما الشوارد الحرة فهو (Y) فيكون تركيز الشوارد الموجبة مساويا :



وبتطبيق شروط التوازن داخل وخارج الخلية فإننا نحصل على :

$$\frac{Na_1}{Na_2} = \frac{Cl_2}{Cl_1} \quad (8-5)$$

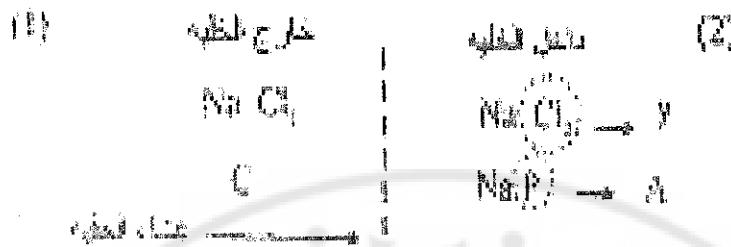
وبالتعبير عن المعادلة السابقة بالترانزistor يكون :

$$\frac{C}{Y + A} = \frac{Y}{C}$$

$$C^2 = Y(Y + A) \quad \text{أو :}$$

ويحل المعادلة السابقة عن طريق المميز نجد :

$$Y = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4C^2}}{2}$$



شكل رقم (3-8) يبين تركيز الشوارد المختلفة داخل وخارج الخلية

وبذلك يعبر عن علاقة السماحية أو النفوذية الانتقامية بأنها معدل حمل الشوارد وهذا المعدل يتاسب مع سرعة جريان هذه الشوارد (V) مضروباً بتركيزها . وبذلك تكتب العلاقة (4-8) على الشكل :

$$S = \frac{n_K}{n_a} = \frac{V_K(Y+A)}{V_a(Y)}$$

وإذا عوضنا عن γ قيمتها من المعادلة (8-6) نجد :

$$S = \frac{V_K \left[\frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4C^2}}{2} \right] + A}{V_a \left[\frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4C^2}}{2} \right]}$$

بالاختصار في المعادلة السابقة نجد :

$$S = \frac{V_k \left(\sqrt{A^2 + 4C^2} + A \right)}{V_a \sqrt{A^2 + 4C^2} - A} \quad \text{تبين المعادلة (7-8) أن}$$

السماحية أو النفوذية الانتقائية تعتمد على تركيز شوارد محلول الكهربائي خارج الخلية ، وعندما يكون هذا التركيز صغيراً أي $C \rightarrow 0$ فان قيمة (S) تؤول إلى الlanهية :

$$S = \frac{2A}{0} = \infty$$

أي أن النفوذية لهذه النوعية من الشوارد تصبح لانهائية ، وهذا يعني بالنسبة للنباتات ، عندما تكون بحاجة إلى نوع معين من الشوارد الموجودة بتركيز ضعيف في التربة ، فإنه بهذه الحالة ، يجب أن تكون نفوذية خلايا جذوره لهذا النوع من الشوارد كبيرة جداً لكي يستطيع النبات الحصول على حاجته من هذه الشاردة .

5-8- كمون الشوارد المتراكمة على الغشاء :

إن تراكم الشوارد على سطحي غشاء يؤدي إلى نشوء كمون يعبر عنه بالطاقة الحرية للانتقال ΔF في خلية كهربائية مكونة من مول واحد ، حيث تكون :

$$\Delta F = nFE \quad (8-8)$$

n = عدد المولات ، E = فرق الكمون الناجم عن انتقال الشوارد . أما F فتمثل ثابتة فراداي .

من جهة أخرى تعطى الطاقة الحرية لتفاعل كيميائي لمول واحد من الشوارد الموجبة C_a ، C_K بالعلاقة :

$$\Delta F = nEF = RTLnK - RTLnC_K C_a f^2 \quad (8-9)$$

تمثل R ثابتة الغازات العام ، T درجة الحرارة المطلقة ، K ثابتة التوازن f ثابتة التشيط .

يمكن إعادة كتابة العلاقة السابقة على الشكل :

$$E = \frac{RT}{nF} \ln K - \frac{RT}{nF} \ln C_K C_a f^2 \quad (8-10)$$

وبما أن الحد الأول في هذه المعادلة يمثل قيمة ثابتة هي E_0 . فتصبح المعادلة

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln C_K C_a f^2 \quad (8-11)$$

تعطي هذه المعادلة القوة المحركة لخلية غلافانية وإذا تصورنا أن هناك خلتين متصلتين بعضهما بحيث تكون الأقطاب المتشابهة متصلة ببعضها (وصل على التوازي) في هذه الحالة لا تنتقل الشوارد من خلية إلى أخرى ، أما إذا كان تركيز الشوارد ، C_1 ، C_2 داخل الخلتين مختلف ، فيكون هناك جريان للشوارد ، مما يؤدي إلى نشوء قوة محركة تعطى بالعلاقة :

$$\begin{aligned} E &= \frac{RT}{nF} \left[\ln C_1^2 f_1^2 - \ln C_2^2 f_2^2 \right] \\ &= \frac{2RT}{nF} \left[\ln \frac{C_1 f_1}{C_2 f_2} \right] \end{aligned} \quad (8-12)$$

وإذا تم وصل هاتين الخلتين بغضاء نفوذ ب بحيث يمكن انتقال الشوارد من خلية إلى أخرى ، فإن هذا النظام يسمى بالخلية الانتقالية . ويجب إضافة حد تصحيحي إلى المعادلة يسمى بالعدد الانتقالـي T_a والذي هو بدوره مرتبط بحركية الشوارد الموجبة U_a و الشوارد السالبة U_K بحيث يكون :

$$T_a = \frac{U_a}{U_a + U_K} \quad (8-13)$$

باستخدام هذا المعامل في المعادلة السابقة نجد :

$$E = \frac{2RT}{nF} T_a \ln \frac{C_1 f_1}{C_2 f_2} \quad (8-14)$$

فإذا كان :

$$T_a = 1 - T_K \dots, T_a + T_K = 1$$

فإن المعادلة (8-14) تأخذ الشكل:

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1 f_1}{C_2 f_2} - \frac{RT}{nF} \cdot \frac{U_K - U_a}{U_K + U_a} \ln \frac{C_1 f_1}{C_2 f_2} \quad (8-15)$$

يتعلق الحد الأول بكمون المسرى ، أما الحد الثاني فهو متعلق بانتقال الشوارد ، ولذا فهو يسمى بكمون الانتشار ، أو الالتصاق ، فإذا كانت $U_a = U_K$ (كما في حالة الاغشية الحية) فإن الحد الثاني في المعادلة يصبح مساوياً للصفر ، ونحو المعادلة السابقة إلى الشكل :

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1 f_1}{C_2 f_2} \quad (8-16)$$

8-6- كمون التوازن :

من الدراسة السابقة ، تبين لنا أن الكمون الناشئ في الخلية يرتبط بحركية الشوارد وتركيزها ، وخاصة في حالة الغشاء ، كما وجدنا أنه في حالة الغشاء نصف النفوذى ، الفاصل بين وسطين مختلفين في التركيز ، بحيث لا يمكن لأحدهما النفوذ عبر الغشاء ، فإنه بعد زمن معين يحدث توازن ، يدعى بتوازن

دونن، وقد درسنا أنه في حالة الخلايا الحية تكون نفوذية الغشاء لشوارد البوتاسيوم (K^+) متساوية تلك لشوارد الكلور (Cl^-) ، وبرهنا العلاقة :

$$\frac{K_h}{K_a} = \frac{Cl_a}{Cl_h} \quad (8-17)$$

وبالتعويض بالعلاقة السابقة، يمكن إيجاد الكمون حول الغشاء، ذلك المرتبط بتوافر دونن باستخدام تراكيز الكلور داخل الخلية (Cl_i) وخارجها (Cl_0) :

$$E_{Cl} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{(Cl)_0}{(Cl)_i} \quad (8-18)$$

أو باستخدام تراكيز البوتاسيوم (K) داخل الخلية و (K_0) خارج الخلية على الشكل :

$$E_K = \frac{RT}{nF} \ln \frac{(K)_i}{(K)_0} \quad (8-19)$$

بالتعويض بقيمة تراكيز شوارد البوتاسيوم ، داخل وخارج الخلية بالنسبة لليفة العصبية للحبار ، وجد أن قيمة هذا الكمون تساوي 50 ملي فولت تقريبا ، تلك القيمة المحسوبة نظريا وفق المعادلة ، هي على توافق مع القيمة المسجلة تجريبيا لذلك يمكن استخدام هذه المعادلة لقياس الكمون الساكن للخلايا الحية إذا عرف تراكيز البوتاسيوم داخل الخلية وخارجها .

إن الكمون الساكن للخلايا سالب القيمة دائما ، كما عرفنا سابقا .

إن المعادلة (8-19) تبقى صحيحة من أجل تراكيز (K_0) أكبر من 4 ملي مول / لتر ، أما من أجل تراكيز أقل ، فيكون الغشاء نافذاً لشوارد البوتاسيوم

، الكلور ، والصوديوم ومن ثم يمكن تصحيح المعادلة السابقة بإدخال تراكيز الشوارد الأخرى لتأخذ الشكل :

$$E_K = \frac{RT}{F} \ln \left[\frac{P_K(K)_i + P_{Na}(Na)_0 + P_{Cl}(Cl)_0}{P_K(K)_0 + P_{Na}(Na)_i + P_{Cl}(Cl)_i} \right] \quad (8-20)$$

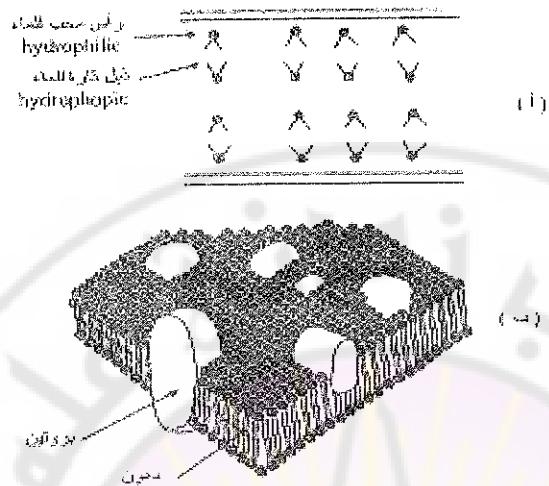
حيث، P_{Cl} ، P_{Na} ، P_K هي ثوابت النفوذية لكل من شوارد البوتاسيوم ، الصوديوم ، والكلور ، ولدى قياسها في الخيط العصبي لحبار ، وجدت القيم

P_{Cl}	P_{Na}	P_K
1	0,04	0,043

7-8- الخواص الكهربائية للخلايا والأنسجة الحية :

إن ثخانة الأغشية الحية تتراوح بين 10nm إلى 20 nm ، إن هذه الثخانة الضئيلة تجعل من الصعب دراستها ، ولذلك سنعتمد نماذج توضيحية على الشكل :

إن غشاء الخلية يتكون من طبقتين من الدهون يتخللها بروتين ، وهذا البروتين هو المسؤول عن مرور الشوارد ، داخل وخارج الخلية ، وذلك وفق الشكل (4-8-أ) الذي يبين كيفية تكون طبقي الدهون - أما الشكل (4-8-ب) فيمث



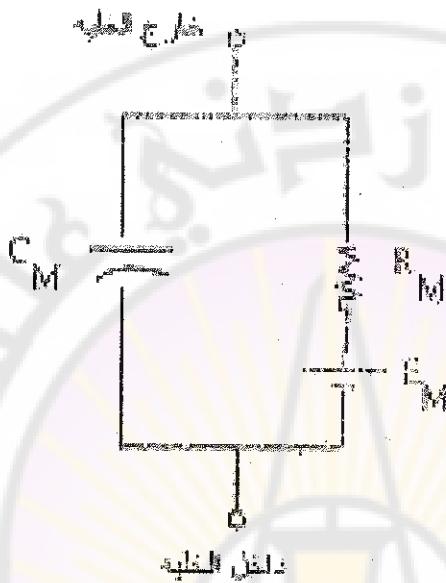
لـ نموذج (فسيفاسي) .

يبين الشكل (4-8 أ-ب) أـ رسمـاً تخطيطياً لتوـزـع طـبـقـتـي الـدـهـوـن فـي غـشـاءـ الـخـلـيـةـ

بـ شـكـلـ نـمـوذـجـ فـسـيفـاسـيـ وـالـذـيـ يـبـيـنـ كـيـفـيـةـ تـوـزـعـ البرـوتـينـ دـاخـلـ طـبـقـاتـ الـدـهـوـنـ .

من الإشكال السابقة ، ونظراً لوجود الدهون بنسبة كبيرة في غشاء الخلية ، فإن هذا الشيء يعطي مقاومة كبيرة (من رتبة الميكا أوم) وبما أن السطح الداخلي للغشاء يتراكم عليه شحنات سالبة ، مما يعطيه سعة كهربائية ، يمثل الغشاء في هذه الحالة المادة العازلة ، ولوحي المكثف هما الوسط الكهربائيي داخل الخلية وخارجها ، بذلك تكون قيمة السعة الكهربائية للغشاء تساوي 1 ميكرو فاراد / سم² تقريباً بالنسبة لأكثر الخلايا .

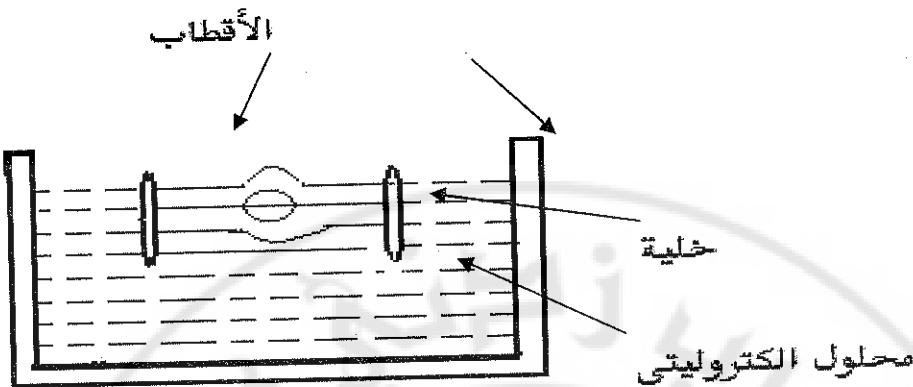
ما سبق يمكن نمذجة الخلايا على عنصرين فقط ، هما : المقاومة والسعة الكهربائية . ويمكن تمثيلها كهربائيا على شكل الدارة التالية :



الشكل (5-8) يمثل النموذج الكهربائي لغشاء الخلية الحية E_m الذي يمثل الكمون السكوني ، المقاومة R_M ، السعة C_M .

8-8- مقاومة الخلية

يتميز غشاء الخلية بمقاومة عالية ، لذلك فهو موصل رديء بالنسبة للمحلول الموجود داخل وخارج الخلية ، لذلك فمن المؤكد أنه إذا وضعنا خلية في محلول كهربائي محدد بلبوسي مكتفة فان هذا سيؤدي إلى مرور تيار بين اللبوسين ، يكون هذا كبيرا بين اللبوسين وضعيفا في الخلية وذلك حسب الشكل (8-6) .



الشكل (6-8) يمثل مسارات التيار الكهربائي المار في خلية محاطة بمحلول كهروليتي

هذه الفكرة تؤدي بنا إلى نموذج ماكسويل ، الذي درس معلقاً من البروتين والدهون في سائل كهروليتي ، وحسب المقاومة النوعية لهذا المعلق ، وذلك بافتراض الخلايا على شكل كرات موصولة معلقة في محلول كهروليتي ، والمعادلة المقترنة على الشكل

$$\frac{\frac{r_1}{r} - 1}{\frac{r_1}{r} + 2} = \Theta \frac{\frac{r_1}{r_2} - 1}{\frac{r_1}{r_2} + 2} \quad (8-21)$$

Θ = الحجم الكلي للمواد المعلقة (الخلايا)

r = المقاومة النوعية (خلايا + محلول كهروليتي)

r_1 = المقاومة النوعية للمحلول الكهروليتي

r_2 = المقاومة النوعية للمادة المعلقة (الخلايا)

قام بعض العلماء بتطوير هذا النموذج ، باقتراح معادلات أكثر واقعية ، على الشكل :

$$\Theta = \frac{\frac{r}{r_1} - 1}{\frac{r}{r_1} - 1 + F}$$

$$r = \frac{r_1 - \Theta r_1}{\Theta - 1} \quad (8-22)$$

حيث يدعى F بمعامل التشكيل ، وقيمه أكبر من 1,5 في حال الملعقات بيضاوية الشكل .

قام العالمان كيرش وكول بتعديل المعادلة السابقة ، وذلك بعد اعتبار أن الخلايا ، لا تكون موصولة ولا حتى عازلة تماما ، وبذلك عدلا نموذج ماكسويل ، مع إدخال عامل التشكيل F . لتصبح المعادلة من الشكل :

$$\frac{1 - \frac{r_1}{r}}{F + \frac{r_1}{r}} = \Theta \frac{1 - \frac{r_1}{r_2}}{F + \frac{r_1}{r_2}}$$

أو يمكن كتابتها على الشكل :

$$r = r_1 \frac{(1 - \Theta)r_1 + (r + \Theta)r_2}{(1 + F\Theta)r_1 + F(1 - \Theta)r_2} \quad (8-23)$$

وبما أن الغشاء ذا مقاومة عالية ، ومحظوظ الخلية الداخلي والخارجي ذو مقاومة منخفضة لذا فان المقدار r_2 يمكن أن ينقسم إلى قسمين ، الأول هو المقاومة النوعية للخلية (السيتوبلاسما) r_2^+ والقسم الآخر لغشاء الخلية r_3 وهو يتعلق بمقاومة واحدة المساحة ، فإذا كان نصف قطر الخلية يساوي a فان قيمة المقدار r_2 تصبح متساوية :

$$r_2 = r_2^+ + \frac{r_3}{a}$$

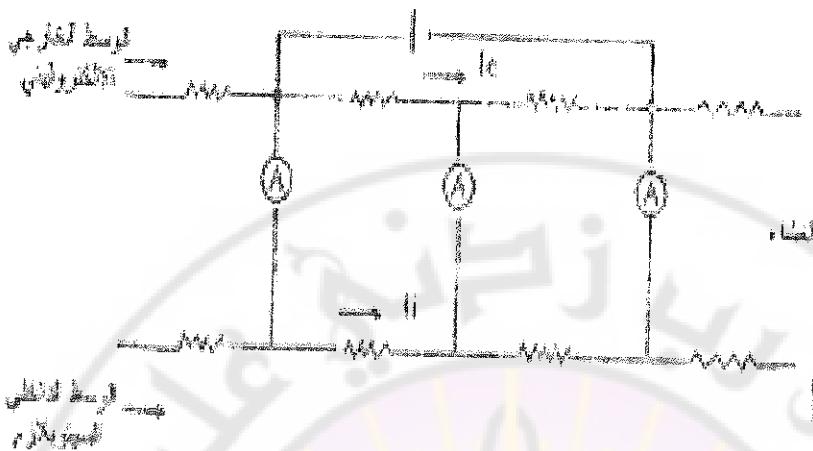
إذا أخذنا بالتعديلات السابقة ، فان المعادلة (8-23) تأخذ الشكل (8-24)

$$r = r_1 \frac{(1 - \Theta)r_1 + (F + \Theta) \left(r_2^+ + \frac{r_3}{a} \right)}{(1 + F\Theta)r_1 + F(1 - \Theta) \left(r_2^+ + \frac{r_3}{a} \right)} \quad (8-24)$$

بالتعمييض العددي للقيم التجريبية في المعادلة السابقة نحصل على القيمة Ωcm^2 1000 للمقاومة النوعية السطحية ، أما إذا كان نصف قطر الخلية متساوية $10^{-3} Cm$ فان المقاومة النوعية لهذه الخلية تساوي $10^6 \Omega.cm$

8-9 دراسة مرور التيار المستمر خلال الخلايا والألياف العصبية :

لنقم بدراسة حالة ليفة شعرة عصبية طويلة ، باستخدام التقنية المستعملة في حالة دراسة مرور التيار الكهربائي خلال سلك مغمور في الماء ، وذلك حسب الشكل (8-7) :



الشكل رقم (7-8) يبين رسمياً توضيحاً لكيفية مرور التيار خلال الحبل العصبي (المحوار)

يبين الشكل (7-8) نظاماً يسهل تحليله ، إذا افترضنا أن داخل الشعيرة العصبية موصلًا للتيار ، وبنطبيق قانون أوم على الكمون V_e عند أي نقطة على السطح الخارجي للعصب و هي المسافة على طول العصب ، R_e المقاومة لوحدة الأطوال للوسط الكهربائي الخارجي

فإن :

$$\frac{dV_e}{dX} = -I_e R_e \quad (8-25)$$

$$\frac{dV_i}{dX} = -I_i R_i \quad \text{و}$$

V_i = تمثل كمون السطح الداخلي للغشاء

R_i = مقاومة وحدة الأطوال لمادة السيتو بلاسما

نتيجة الكمون V_i ينشأ تيار يمر خلال الغشاء ، مقداره I_m يعطى بالعلاقة :

$$I_m = \frac{dI_e}{dX} = \frac{dI_i}{dX} \quad (8-26)$$

استخدم العلماء العلاقة السابقة لحساب المقاومة الداخلية لمادة السيتوبلاسما والمقاومة الخارجية للمحلول الكهربائي ومقاومة الغشاء في الليف العصبي للحبار وذلك بعد استخدام علاقة تعطي الطول المميز للحبل العصبي (λ) وهي تساوي:

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_1 + r_2}} \quad (8-27)$$

r_m المقاومة النوعية للغشاء

r_1 المقاومة النوعية للمحلول الكهربائي خارج الحبل العصبي

r_2 المقاومة النوعية للسيتوبلاسما

وبذلك تكتب المعادلة التي تعطي مقاومة الحبل العصبي على المسافة (s) بينقطي القياس متساوية :

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} S + \frac{2r_1^2 \lambda}{(r_1 + r_2) \left(K + COths \frac{r_1}{2\lambda} \right)} \quad (8-28)$$

K = ثابتة تتعلق بطول الأقطاب المستخدمة ، وبشكل عام يمكن القول أن المقاومة النوعية للسيتوبلاسما تتراوح بين (30-300) أوم . سم بينما المقاومة النوعية السطحية لغشاء الخلية فانها تتراوح ما بين (100,000 - 100) أوم . سم.

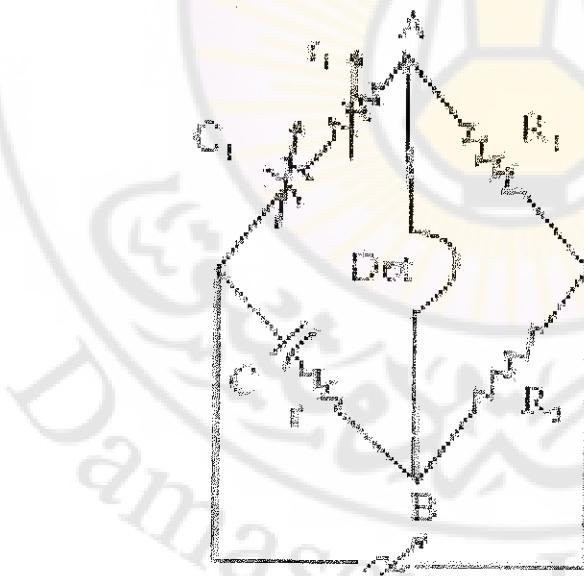
10-8- الممانعة الكهربائية للأنسجة والخلايا

إذا طبقنا كموناً مستمراً (DC) على الأنسجة والخلايا فإننا نستطيع قياس وتحديد المقاومة الكهربائية لها ، أما إذا طبقنا فرق كمون متداوب (AC) فإنه يظهر لنا عنصر كهربائي جديد يجب حسابه ، هو السعة الكهربائية ، وبما أن مقاومة الغشاء كبيرة ، فإن كلًا من السعة (C)

والمقاومة R تعيقان مرور التيار المتداوب ، ويمكن البرهان أن قيمة الممانعة الكهربائية تساوي :

$$Z^e = R + \frac{1}{J\omega C} \quad (8-29)$$

ونقاش هذه الممانعة باستخدام جسر وطسطن على الشكل (8-8) :



الشكل (8-8) يمثل جسر وطسطن لقياس ممانعة الأنسجة

يتكون هذا الجسر من ثلاثة أوتار والوتر الرابع يمثل النسيج الحي الذي يمثل بمقاومة (r) ومكثف (C) وبتغيير قيمة كل من C_1, R_1 , يمكن الوصول إلى التوازن وإيقاف التيار في المقياس الغلفاني (galvany) وذلك لأن كمون

ال نقطتين A, B متساوي أي $V_A = V_B$

بتطبيق قانون التوازن :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{r_1 + \frac{1}{J\omega C_1}}{r + \frac{1}{J\omega C}} \quad (8-30)$$

أو على الشكل :

$$R_1 \left(r + \frac{1}{J\omega C} \right) = R_2 \left(r_1 + \frac{1}{J\omega C_1} \right)$$

وبتساوي الأجزاء الحقيقة نحصل على :

$$r = \frac{R_2}{R_1} r_1$$

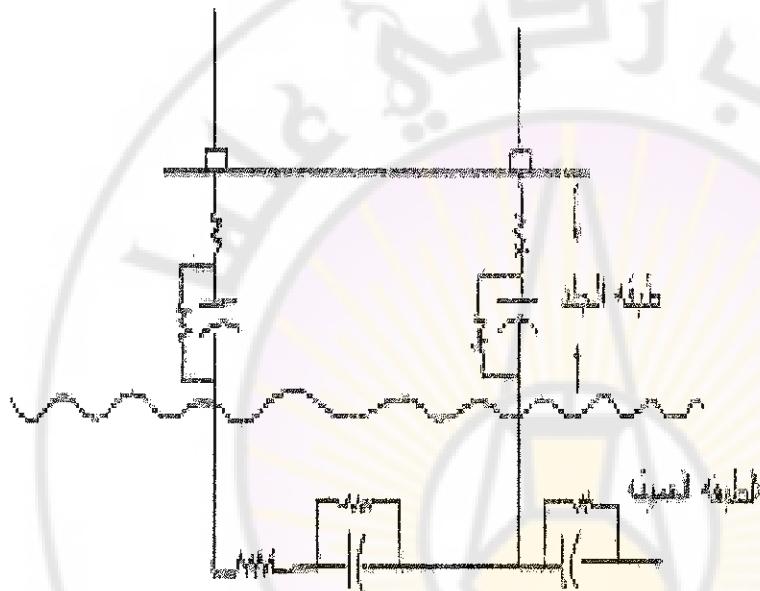
وبتساوي الكميات التخيلية نجد أن :

$$C = \frac{R_1}{R_2} C_1 \quad \text{وكذلك} \quad \frac{R_1}{J\omega C} = \frac{R_2}{J\omega C_1}$$

وبذلك نصل إلى الممانعة الكلية :

$$Z = \sqrt{r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \dots, \tan \varphi = \frac{1}{\omega C r} \quad (8-31)$$

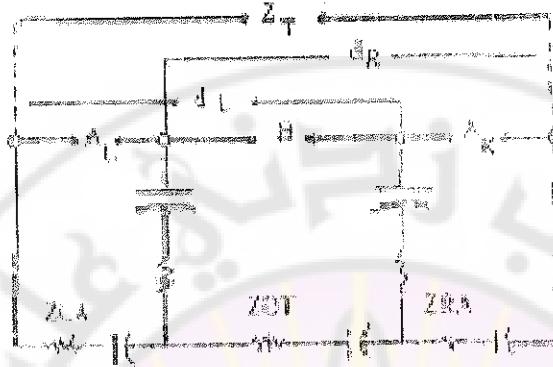
إن قياس الممانعة للأعضاء يفيد في تشخيص بعض الأمراض، كأمراض القلب مثلاً، ويكون ذلك بقياس الممانعة عند قيم مختلفة لتوافر التيار، ويمكن تمثيل وضع الأقطاب عند قياس الممانعة للأعضاء الداخلية وربط ذلك بالمقاومة والسعنة حسب الشكل (8-9):



الشكل (8-9) يبين نموذج للمكونات الكهربائية للأعضاء العميقة عند قياس ممانعتها.

10-8- قياس ممانعة الجسم

يمكن قياس الممانعة الكلية للجسم والأعضاء الداخلية باستخدام أربعة أقطاب، اثنان منها على اليدين، واثنان آخران على الكتفين كما في الشكل (8-10)

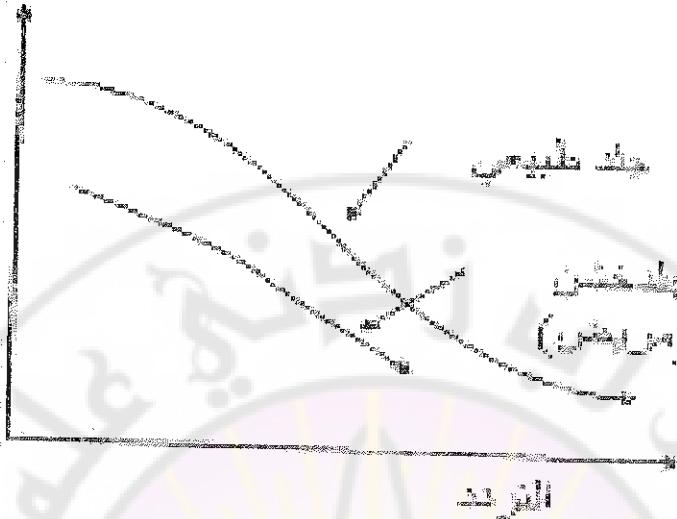


الشكل رقم (10-8) وفيه التخطيط الكهربائي المستخدم عند قياس الممانعة للأعضاء الداخلية للجسم باستخدام أربعة أقطاب

وتقاس الممانعة عادة بين اليد اليسرى والكتف الأيسر A_L ، وبين اليد اليمنى والكتف الأيمن A_R ، وبين الكتفين B ، أيضاً بين اليد اليسرى والكتف الأيمن d_L وبين اليد اليمنى والكتف الأيسر d_R . إذا افترضنا ما سبق ، فيمكن إيجاد الممانعة للأعضاء الداخلية من المعادلة :

$$Z_{dt} = \frac{B + Z_r - (A_L + A_R)}{2} = \frac{d_L + d_R - (A_L + A_R)}{2}$$

يمكن اعتماد هذه المعادلة للكشف بعض الأمراض - الشكل (11-8) (يبين منحني ممانعة جلد الإنسان عند قيم مختلفة من تردد التيار المستخدم في القياس ، وذلك لجذ سليم ، وأخر خشن نتيجة مرض معين



الشكل (8-11) يبين العلاقة بين الممانعة والتواتر لجذب إنسان طبيعي وأخر

مريض

الفصل التاسع

الكمون الكهربائي الفعال للأنسجة

تمهيد

يمكن للخلايا والأنسجة الحية أن تتحول من الحالة السكونية إلى الحالة الفعالة بعد تلقيها لإثارة تتناسب مع الحالة التي نريد أن نوصلها إليها ، وتلك الآثارات تأخذ أشكالاً مختلفة ومنها:

9-1 الإثارة الميكانيكية:

وهي خاصة بالخلايا السمعية إذ أن الأمواج الصوتية تسبب انضغاطاً وتخللاً في الهواء الحامل لهذه الأمواج ، وحين تصل إلى الأذن تسبب اهتزاز غشاء الطبيل ، وبذلك تحدث الإثارة . كما أن الجلد يتحسس بالمثيرات الميكانيكية فيتغير شكله تحت تأثير أي قوة خارجية .

9-2 الإثارة الضوئية :

وهي تؤثر في خلايا شبكيّة العين فتحدث الرؤيا عند الإنسان شرط أن تكون الإثارة ضمن المجال المرئي ، وطول موجتها يقع بين 3500 A° $\rightarrow 7500 \text{ A}^{\circ}$ أما الأطوال الموجية التي هي أدنى أو أعلى من هذا المجال ، فهي لا تثير الرؤيا عند الإنسان وإنما تحدث أضراراً تختلف باختلاف المؤثر .

٩-٣- الإثارة الكيميائية :

المسؤول عن استقبال هذه الإثارة هي خلايا الشم ، كما يمكن للجلد أن يتأثر بهذا المؤثر الكيميائي .

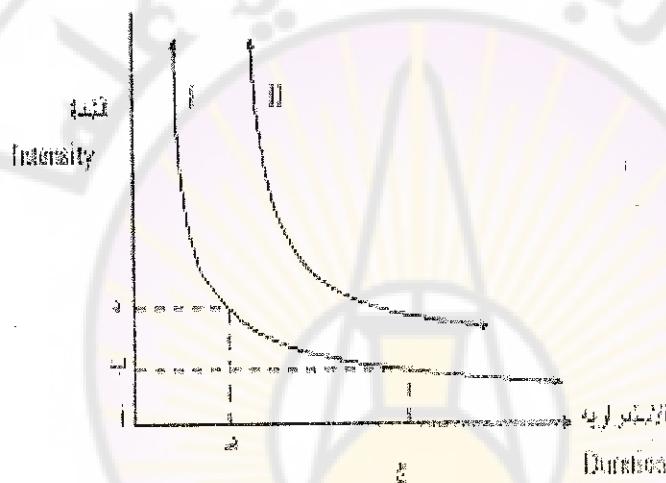
٩-٤- الإثارة الكهربائية :

وهذا المؤثر تتأثر به الأعصاب بشدة ، ولذلك يتم استخدامه بشدة في المخابر لسهولة تواجده والتكييف بإخراجه من حيث الشدة والشكل، فهو يستخدم لإثارة الخلايا والأنسجة الحية ، وبحسب طبيعة الخلية المراد إثارتها ، يمكن تغيير شكل الموجة الكهربائية التي يراد الإثارة بها ، من هذه الأمواج الموجة الجيبية التي يمكن الحصول عليها من التيار الكهربائي العادي ، وطبعاً هناك أشكال أخرى للأمواج التي يمكن الحصول عليها باستخدام معدلات خاصة نطبقها على التيار الكهربائي العادي فنحصل على الموجة المربعة والموجة التي لها شكل أسنان المنشار ، أو موجة تفريغ مكثفة، أو الموجة التي ترداد خطياً . في الشكل رقم (١-٩) أوردنا أشكال المثيرات الكهربائية المختلفة ،



الشكل رقم (١-٩) أشكال أمواج الإثارة الكهربائي

يتميز المثير الكهربائي بثلاثة سمات ، هي الشدة ، الاستمرارية ، والانحدار . يفضل الدارسون والمخبريون الموجة المربعة ، لما يمكن دراسته عن طريقها من تأثير الشدة والاستمرارية على خاصية الإثارة للخلايا الحية ، وذلك لصعوبتها وانحدارها بشدة . يمثل الشكل (2-9) العلاقة بين الشدة والاستمرارية .



الشكل رقم (2-9) يبين العلاقة بين الشدة والاستمرارية

لدراسة هذه العلاقة بالتفصيل ، نبدأ بشدة قليلة ومن ثم نزيد من شدة التأثير حتى تبدأ الخلية بالتحول من الحالة السكونية إلى الحالة النشطة ، أي تنتج نبضة كهربائية كافية للإثارة ، وحسب الشكل السابق (2-9) ، نجد أن هناك علاقة عكسية بين الشدة والاستمرارية ، تلك المؤثرات يمكن تكرارها على الخلايا ، وهي تتغير حسب نوع النسيج الحي وحالته الفيزيولوجية .

إن أقل شدة تلزم لتحويل النسيج الحي من الحالة السكونية إلى النشطة تسمى بالعتبة ، وهي تطابق بالشكل المرحلة (اب) أما الزمن الموافق لهذه العتبة ، فيسمى الزمن المستخدم (اح) وبما أنه يصعب تحديد هذا الزمن بدقة ، فإننا نأخذ قيمة للاستمرارية تدعى كروناكس .

تعريف الكروناكس : هو أن نأخذ الزمن المقابل لضعف العتبة (اد) وتكون قيمته (اه) وكما نرى من الشكل أن تعين هذا الزمن يمكن تحديده بدقة ، لأنه يقع في الجزء المتغير من المنحنى ، وذلك بعكس ما هي الحالة بالنسبة للزمن المستخدم .

كما يظهر لنا من الشكل أنه إذا انخفضت الاستمرارية عن قيمة معينة ، فإن النسيج الحي لا يمكن تحويله من الحالة السكونية إلى الفعالة مهما أزدادت الشدة ، وبالعكس أي أنه إذا انخفضت الشدة عن قيمة محددة ، فإنه مهما أزدادت الاستمرارية فإن النسيج لا يمر إلى المرحلة الفعالة .

أما التطبيق السريري للكروناكس ، فعن طريق قياسه يمكن تشخيص عمل العضلة وكفاءتها ويمثل الشكل (9-2) منحدين الأول لعضلة سليمة () والآخر لعضلة مريضة () ، يلاحظ أن الكروناكس للعضلة المريضة ، يكون دائمًا أكبر منه للعضلة السليمة . وفي حالة الأمراض والحوادث ، يمكن تحديد ما إذا كان عصب العضلة سليماً أو مصاباً عن طريق معرفة أن قيمة الكروناكس للعصب أقل من تلك للعضلة .

يمكن دراسة تأثير التدرج على قيمة عتبة الإثارة باستخدام نبضات كهربائية مختلفة التدرج ، وقد وجد أنه عندما يقل التدرج ، فإن عتبة الإثارة تزداد . أما إذا انخفض التدرج عن قيمة محددة ، فإنه لا يحدث إثارة مهما أزدادت شدة النبضة الكهربائية المستخدمة وهذا يعود إلى خاصية التعود التي

تحملها الأنسجة الحية . هذه الخاصية ، كلما كان تكونها في الأنسجة سريعاً، فإنها تحتاج إلى نبضة كهربائية أو مثير له تدرج كبير جداً حتى لا يعطي النسيج أي فرصة للتعود ، وبالعكس أي أنه إذا كان التعود بطبيئاً ، فإن تأثير التدرج في هذه الحالة لا يكون فعالاً، ولهذا فإن خاصية التعود تختلف من النسيج إلى الأعضاء ، ونجد أن القلب بحاجة إلى مثير يكون انحداره شديد جداً حتى تتم إثارته ، وأن هناك أعضاء أخرى تحتاج أن تكون خاصية التعود بطبيئة ، أي يمكن أن تثار بمثير ذي انحدار بسيط ، مثل ذلك الجلد الذي يتاثر بأي ارتفاع بطيء في درجة الحرارة ، فلو تصورنا أن خاصية التعود في الجلد كتلك التي في القلب، فإننا سوف لن نشعر بالحرارة ، إلا إذا كانت مرتفعة ، مما يؤدي بنا لحدوث حروق جلدية شديدة قبل أن نشعر بتأثير الحرارة .

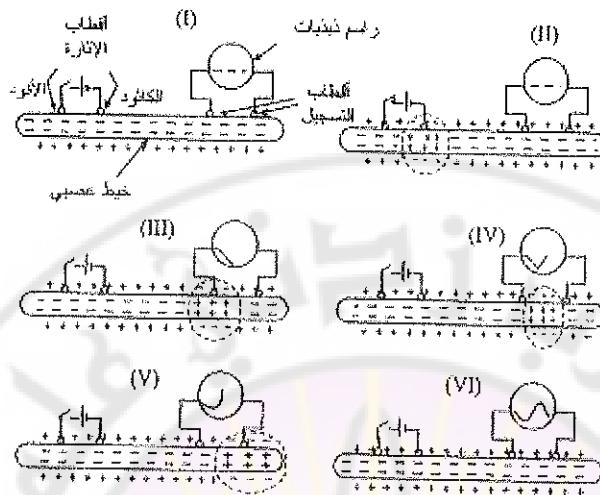
5-9- الكمون الكهربائي النشط :

إذا تعرضت الخلية الحية ، العصب ، أو النسيج الحي ، إلى إثارة مناسبة، فتحولت من الحالة السكونية إلى النشطة ، يمكن تسجيل هذا النشاط وفق طرفيتين :

- أ- باستخدام أقطاب توضع على سطح النسيج وتسمى طريقة التسجيل من الخارج .
- ب- إدخال قطب ذي سن صغير جداً داخل الخلية ، وتسمى هذه ، طريقة التسجيل من الداخل

1-5-9- التسجيل بدءاً من السطح الخارجي

يوضح الشكل (3-9) طريقة تسجيل الكمون النشط على السطح الخارجي لخيط عصبي ، ويستخدم في هذه الطريقة أربعة أقطاب ، إثنان لإثارة العصب ، وإثنان لتسجيل الكمون السطحي الفعال



يوضح الشكل رقم (9-3) طريقة تسجيل الكمون النشط من على سطح الخطط العصبي . وتوزع الشحنات على كل من سطحه الخارجي والداخلي بالإضافة إلى شكل الكمون المسجل على راسم الإهتزاز المهبطي .

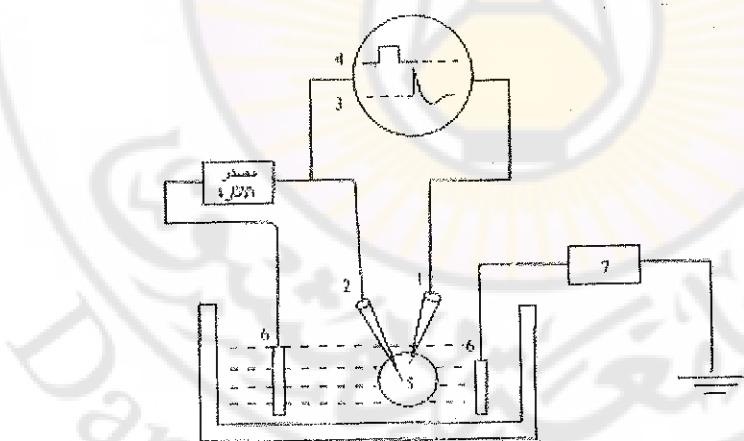
يوضح الشكل (9-3:ا) وضع الأقطاب وشكل الكمون ، وهذا لا يوجد تسجيل لأي كمون لعدم توافر الإثارة التي تحدث عادة وفق قانون أنه عند إثارة النسيج بمثير كهربائي خارجي مناسب ، فإن هذه الإثارة تحدث تحت القطب المتصل بالقطب السالب للبطارية ، أما إذا كانت الإثارة من داخل الخلية ، فإن الإثارة تحدث عندما يكون القطب الموجود داخل الخلية متصلةً بالقطب الموجب للبطارية . أما في الشكل (9-3:ب)

فإن الإثارة تحدث تحت القطب السالب للبطارية (عند تشغيلها لحظياً) وعندما تصل هذه الإثارة تحت القطب الأول من أقطاب التسجيل فإن مؤشر راسم الإهتزاز المهبطي ينحرف حسب الشكل (9-3:III) هذا المؤشر يعود إلى وضعيته قبل التسجيل عندما تكون موجة الإثارة بين القطبين ، وذلك حسب

الشكل (9-3) وعندما تصل موجة الإنارة إلى قطب التسجيل الثاني ، فإن مؤشر الجهاز ينحرف إلى الأعلى كما في الشكل (9-3-7) ثم يهبط ثانية إلى وضعية البداية ، قبل الحركة بعد مرور الموجة ، وذلك حسب الشكل (9-3-71)، الجدير بالذكر أن شكل الكمون النشط الموضح بالشكل (9-3-71) يسمى بكمون ثنائي الوجه

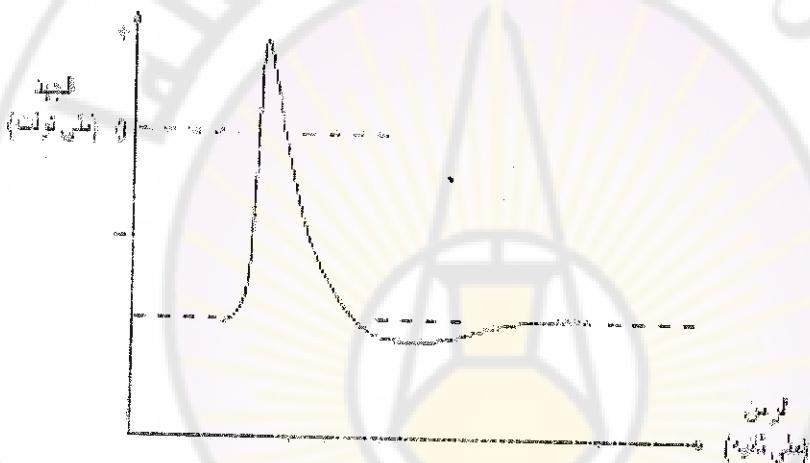
9-5-2 - طريقة التسجيل من داخل الخلية أو داخل النسيج الحي :

الشكل رقم (9-4) يعطينا فكرة عن طريقة قياس الكمون النشط من داخل نموذج لخلية حية ، وفيه يستخدم قطبين قطر كل منهما صغير جداً ، يبلغ حوالي $0.5\mu m$ بالنسبة لقطر الخلية الذي يبلغ نصف قطره حوالي $100\mu m$ وذلك لتفادي أي تلف لعشاء الخلية . كما نضيف أن أحد هذين القطبين يستخدم لإثارة الخلية والأخر لتسجيل هذا الكمون



الشكل (9-4) يمثل طريقة تسجيل الجهد النشط من داخل الخلية باستخدام قطبين أحدهما للإثارة والثاني لقياس وتسجيل الكمون .

يستخدم لتسجيل هذا الكمون جهاز راسم اهتزاز ثنائية الأقنية ، الأول لتسجيل شكل النبضة الكهربائية المستخدمة في الإثارة ، ومن ثم شدة التيار المار داخل غشاء الخلية ، والثاني لتسجيل كل من الكمون الساكن والكمون النشط بعد زمن محدد يسمى الزمن المتأخر من تطبيق نبضة كهربائية (4) مناسبة من حيث النوع والخواص خلال غشاء الخلية ، باستخدام قطب الإثارة (2) فإن الكمون النشط يظهر على راسم الإهتزاز (3) كما في الشكل (9-5) .



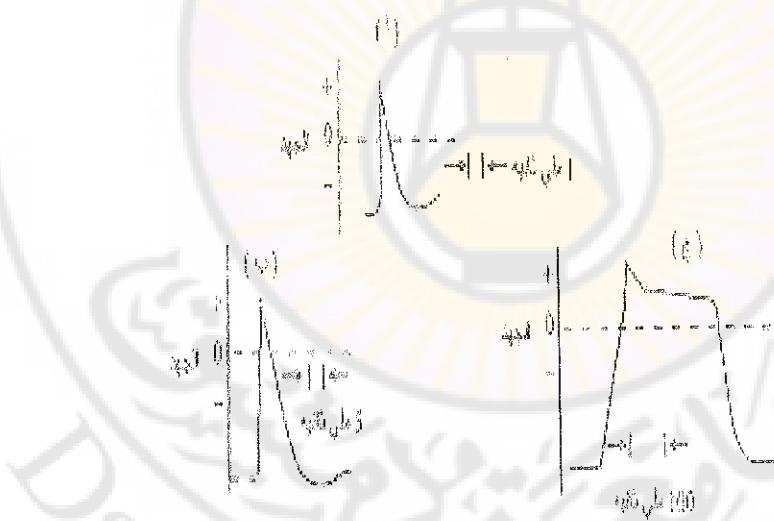
الشكل (9-5) الكمون الكهربائي النشط المسجل من داخل الخلية

3-5-9- خواص الكمون الكهربائي النشط المسجل من داخل الخلية :

بعد مرور مدة زمن التأخير من تطبيق الإثارة ، يبدأ الكمون السكוני في الإنخفاض حتى يصل إلى الصفر ثم يتجاوزه إلى قيمة موجبة ، وبعد ذلك يبدأ بالرجوع إلى سيرته الأولى (الكمون السكوني) ويتجاوزه إلى قيمة صغيرة تسمى بعد الكمون النشط ، وبعد مدة يعود إلى حالته البدائية .

لكي تقوم الخلية بكمون نشط آخر ، فإنه يجب مرور زمن معين يسمى زمن عدم الإستجابة ، وأنشاء هذا الزمن تقوم الخلية بإعادة توازنها الإيوني ، يلاحظ من شكل الكمون النشط أنه مكون من جزئين ، الأول صاعد ويسمى وجه تقليل الإستقطاب ، والثاني هابط ويسمى بوجه إعادة الإستقطاب ، كما أن الزمن الذي يستغرق في الصعود يكون أقل من زمن الهبوط ، وقد وجد أن شكل الكمون النشط ، الشكل (9-5) يكون مشابهاً لمعظم الخلايا والأنسجة الحية ، ولكنه يختلف بعضها عن البعض في قيمة السعة والإستمرارية كما هو في الشكل (9-6) وفيه أشكال الكمون النشط للأعصاب والعضلات وعضلات القلب ، ومنه نلاحظ أن قيمة الكمون والإستمرارية تزيد من حالة العضلات عن الأعصاب ، بينما تزيد الإستمرارية زيادة كبيرة في حالة عضلة القلب حتى

300 msec



شكل رقم (9-6) الكمون النشط في حالة أ-الخيط العصبي ب-العضلات الهيكلية ج- عضلة القلب

4-5-9-النظرية الشاردية وأسباب تكون الكمون النشط

أجرى العالم هودجكين دراسة هدفها معرفة أسباب تحول النسج الحية والخلايا ، من الحالة السكونية إلى الحالة النشطة إذا ما تعرضت لمثير مناسب في نوعيته وطبيعته ، تعتمد النظرية الشاردية على أن المثير يؤثر على خواص غشاء الخلية ، وبشكل أدق على سماحته التي تعرف بأنها قدرة الغشاء على إمرار عدد معين من الشوارد خلال واحدة المساحة في واحدة الزمن تحت تأثير قوة دافعة ، وبما أن الشاردة الواحدة تحمل شحنة قدرها q ، بذلك تكون الشحنة الكلية لمجموعة شوارد عددها N متساوية qN أما السماحة فتعرف على

الشكل :

$$P = \frac{qN}{Vt} = \frac{I}{V} = g_m$$

t = الزمن

V = قوة الدفع الشاردية

I = شدة التيار

g = ناقلية الغشاء

بما أن الغشاء يحتوي عدداً من الثقوب تساوي n في واحدة المساحة ،

وناقلية الثقب تساوي $(\Omega^{-1})^{\sigma}$ فإن ناقلية الغشاء بواحدة المساحات له تساوي

$$g_m = n\sigma \cdot \Omega^{-1} \cdot m$$

أما ناقلية الغشاء لمساحة منه قدرها A فتساوي :

$$g = g_m \cdot A$$

تتغير الناقلية للغشاء بحسب نوعية الشاردة التي تجتاز الغشاء وأيضاً كمية الماء التي تتحدد معها . الجدول رقم (9-1) يظهر الناقلية لبعض الشوارد خلال غشاء الحبار في الحالة السكونية .

الجدول (9-1) الناقلية الكهربائية لبعض الإيونات خلال غشاء الحبار

$\Omega^{-1} \text{cm}^{-2}$	الإيون
37×10^{-5}	K^+
1.1×10^{-5}	Na^+
30×10^{-5}	Cl^-

مثال:

أُوجد الناقلية لستنتمتر واحد من ساق عصب حبار نصف قطره

$$0.25 \times 10^{-3} \text{ m}$$

الحل:

$$g = g_m \cdot A$$

$$A = 2\pi rL = 2\pi(0.25 \times 10^{-1}) \text{ cm}(1 \text{ cm})$$

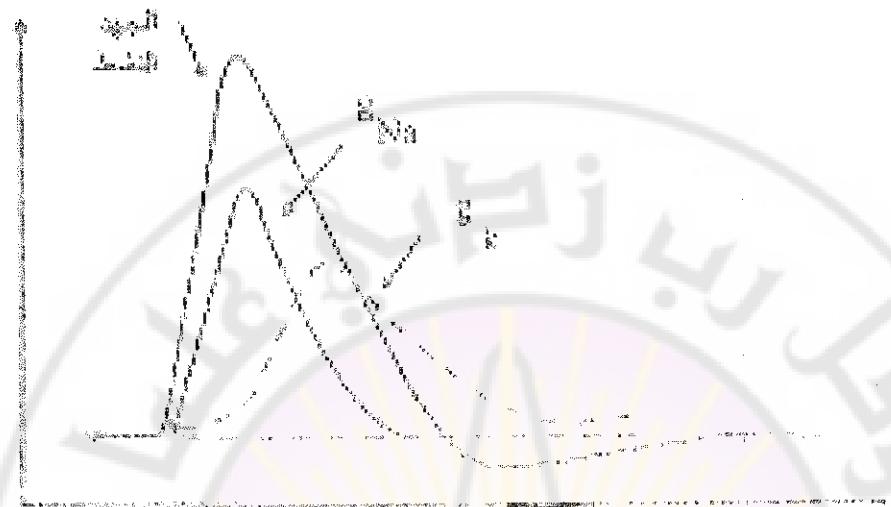
$$= 16 \text{ cm}^2$$

$$g = (1.4 \times 10^{-3})(0.16) = 2.2 \times 10^{-4}$$

لفهم نظرية هودجكين نسمى تركيز أهم الشوارد داخل الخلية (a) وخارجها (0) فيكون تركيز البوتاسيوم داخل الخلية K_i أكبر من تركيزه خارج الخلية K_0 أي $K_i > K_0$ أما بالنسبة للصوديوم فتركيزه داخل الخلية Na_i أقل من خارجها Na_0 .

تتلخص نظرية هودجكن كالتالي :

عند إثارة خلية حية بمثير مناسب فإن سماحية غشائها تزداد بالنسبة للشاردة الصوديوم وتنتقل نتيجة لذلك تلك الشاردة من خارج الخلية إلى داخلها، ويحدث ذلك تبعاً للتدرج التركيز لأن $\langle Na_0 \rangle$ هذا الإنقال يحدث انخفاض في الكمون الساكن والذي بدوره يسبب مزيداً من السماحية للغشاء لإمرار شوارد الصوديوم ، وتنتظر هذه الدورة حتى وصول الكمون السالب إلى قيمة الصفر ، ومن ثم إلى قيم موجبة . في نفس الوقت تتكون على الغشاء عمليات تسمى بالإخمام يكون نتيجتها وقف السماحية بالنسبة للصوديوم وبداية زيادتها بالنسبة لشاردة البوتاسيوم وذلك كما هو موضح في الشكل (9-7) في هذه الحالة يخرج البوتاسيوم من التركيز الأعلى (الداخل) إلى التركيز الأدنى (الخارج) وذلك أيضاً وفقاً للتدرج في التركيز ، ونتيجة لخروج البوتاسيوم يبدأ الكمون الساكن بالظهور بسبب تراكم الشحنات السالبة وهذا يؤدي إلى مزيد من نفوذية الغشاء لشوارد البوتاسيوم مما يؤدي لعودة الكمون الساكن إلى قيمته الابتدائية ويدعى هذا التصرف بما بعد الجهد ، نضيف أخيراً أن تشكل الكمون النشط لا يرافقه أي طاقة مبذولة من جهة الخلية لأن مرور الشوارد يحدث نتيجة الاختلاف في التركيز ومن الأعلى إلى الأدنى .



الشكل رقم (7-9) تغير الكمون النشط مع تغير نفاذية الغشاء لكل من الصوديوم . والبوتاسيوم .

نلاحظ أيضاً أنه بعد حدوث الكمون النشط ، فإن شوارد الصوديوم داخل الخلية يكون تركيزها أكبر من المعتاد ، بينما هنالك نقص في شوارد البوتاسيوم، في هذه الحالة تكون الخلية غير قادرة على إنتاج كمون نشط آخر ، أو نبضة كهربائية ، إلا إذا أعادت التركيز الشاردي داخلها إلى وضعه الطبيعي ، أي يجب أن تطرد شاردة الصوديوم وتدخل مكانها شاردة البوتاسيوم بعملية تسمى مضخة الصوديوم والبوتاسيوم . هذه العملية يلزمها بعض الوقت الذي يسمى بوقت الإفادة .

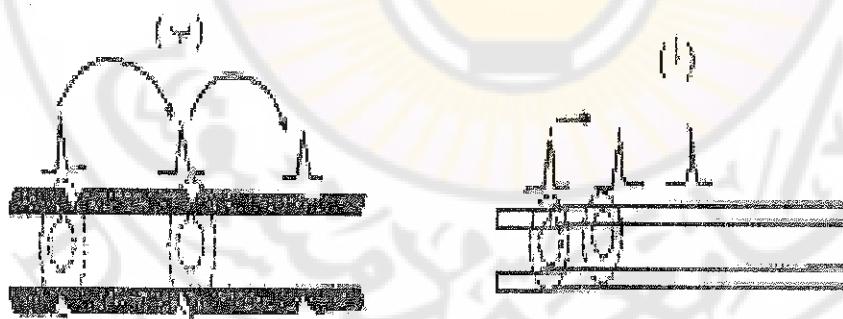
وأيضاً بعض الطاقة التي تأتي من تفكك مركب الأدينازين ثلاثي الفوسفيت.

6-9- سريان النبضات الكهربائية داخل الشعيرات العصبية :

يمكن للشعيرة العصبية إمرار النبضة الكهربائية إلى الخلايا والأنسجة ، ولكن الذي يحدد الاتجاه هو وجود نقاط الاتصال التي تسمح بمرورها باتجاه واحد فقط ، كما سوف نشرح ، تعتمد سرعة توصيل النبضة الكهربائية العصبية خلال العصب على نوع العصب وخصائصه من جهة المقاومة والسرعة معروفة أن الأعصاب تنقسم إلى نوعين :

النوع الأول : وفي هذا النوع يكون غشاء ميلن الذي يغطي الساق سميك ومتخلله فجوات صغيرة غير مغطاة بالميلن وعلى مسافات متساوية تسمى عقد رانفير . وهذا النوع يسمى العصب المغطى .

النوع الثاني : وهذا النوع يتميز بعدم وجود غشاء الميلن السميك والمقطوع ، ولكن بالمقابل يوجد غشاء رقيق متصل ، ويسمى الغير مغطى ، يحمل الإنسان كلا النوعين من الأعصاب ، أما الكائنات بطيئة الحركة فلا تحمل سوى غير المغطى .



الشكل رقم (8-9) يبين كيفية مرور النبضات العصبية خلال الخيط العصبي ذو الغشاء غير المغطى (أ) والغطى (ب)

الشكل (8-9) يظهر كيفية مرور النبضة العصبية من خلال كلا النوعين من الأعصاب ، حيث أظهرنا في الشكل (أ) حالة العصب غير المغطى ، يكون حدوث النبضة العصبية في بجوارها ، وبذلك تكون نبضة عصبية جديدة ، وهذه بدورها أيضاً تعتبر مثيراً للجزء الذي يليها ، وهكذا تنتقل النبضة العصبية من مكان إلى آخر بالتتابع على طول العصب . هذا لا يحدث في حالة مرور نبضة كهربائية في موصل كهربائي لأننا نعرف أنه بعد طول معين من هذا الموصل ستتناقص شدة هذه النبضة وتتغير خواصها بسبب مفعولات مختلفة . أما في حالة مرور النبضة العصبية خلال العصب لأن كل نبضة تولد مثيراً لها .

وهنا نؤكد أنه يكفي 0.20 فقط من سعة النبضة العصبية يكفي لإثارة الجزء المجاور لإنتاج نبضة عصبية أخرى .

أما في حالة العصب المغطى فإننا نجد أن موضع عقد رينغفير غير المغطى بطبيقة الميلن يتميز بمقاومة وسعة للعصب في هذا الجزء صغيرة بالمقارنة بالأجزاء السميكة الغشاء المحيطة بها .

وهذا مما يسهل إثارتها إذا ما تعرضت لمثير مناسب ، وهكذا فإن النبضة العصبية سوف تكون عند العقدة المجاورة للمثير ، والنبضة العصبية المنتجة تكون وبالتالي مثيراً للعقدة التالية ، أي أن سريان النبضات في هذه الحالة يكون عن طريق القفز من عقدة لأخرى ، وهذا ما يسمى بمتيكانيكية القفز .

إذا قارنا بين السرعة في حالة العصب ذو الغشاء المغطى ، وغير المغطى فسنجد أن سرعة الإثارة في العصب ذو الغشاء المغطى ذو القطر المعين أكبر بكثير من تلك المارة بغشاء غير مغطى ولو نفس القطر ، كما أن سرعة مرور نبضات المؤثر تتعلق بنوع غشاء العصب وقطره أي بمقاومة وسعة العصب ، كما أنه يمكن استنتاج علاقة وهي أن العصب ذو الغشاء غير

المغطى تتناسب مع قطره ، وفي حالة العصب المغطى تتناسب مع الجذر التربيعي لقطره .

إن الأعصاب المغطاة في جسم الإنسان تعطي سرعة مرور عالية للنبضات العصبية ، أما وزنها وحيزها فهو أقل في الجسم الإنساني ، ولو كان للإنسان أعصاب غير مغطاة للزم وزن وحجم أكبر بكثير ، والسبب هو الزيادة في ضخامة الأعصاب ، كما أن استهلاك الغذاء في الإنسان يكون أكثر ، وللمقارنة بين نوعي الأعصاب فإننا نقول أنه قد وجد كل عشرة آلاف ليفة عصبية ذات غشاء مغطى قطر 10 ميكرون ومساحة مقطع 2mm^2 تكون سرعة مرور النبضة العصبية بها تمايز مقطعيه 1000 نفس العدد من الليفة العصبية ذات الغشاء غير المغطى ومساحة cm أي تقريباً أكبر بـ 10000 مرة أكثر من حالة الغشاء المغطى .

يحمل الإنسان النوعين السابقين من الأعصاب ، ولكن غير المغطى موجود في الأماكن التي تلزم لها الحركة البطيئة كالأمعاء مثلًا أما المغطى منها موجود بالجلد .

7-9- النشاط الكهربائي وأهميته الطبية :

تتميز الخلايا والأنسجة الحية بوجود جهدين ، الأول سكوني ، والأول سكوني ، وفي تراكم الشحنات السالبة داخل الخلية ، وتكون قيمته أي الكمون ثابتة طالما بقيت الخلية ساكنة ، ولكن بمجرد تعرض هذه الخلية ، أو النسيج لمؤثر خارجي ، فإنه يتحول من السكون إلى الإثارة ، وتكون النتيجة إنتاج نبضات كهربائية يتتناسب تواترها مع طبيعة المؤثر . إن تسجيل هذه النبضات دراسة خواصها من تواتر ، سعة ، واستمرارية يكون مهمًا ، وذلك لمعرفة كفاءة العضو المثار وما إذا كان طبيعياً أو مريضاً .

إن تسجيل النشاط الكهربائي يعتبر هذه الأيام من العناصر المهمة في تشخيص الأمراض ، وسنشرح كيف يمكن الاستفادة منها في التشخيص السريري لأعضاء الجسم

١-٧-٩-١ نشاط العضلات الكهربائي :

تتميز العضلات في الأجسام الحية على قدرتها في القيام بعمليتي الانكماش والاسترخاء ، وذلك عن طريق تكثيل الخلايا القابلة للتكتل إذ أنها تقوم بتحويل الإشارة الكهربائية إلى طاقة حرارية أو ميكانيكية ، أو الاثنين معاً.

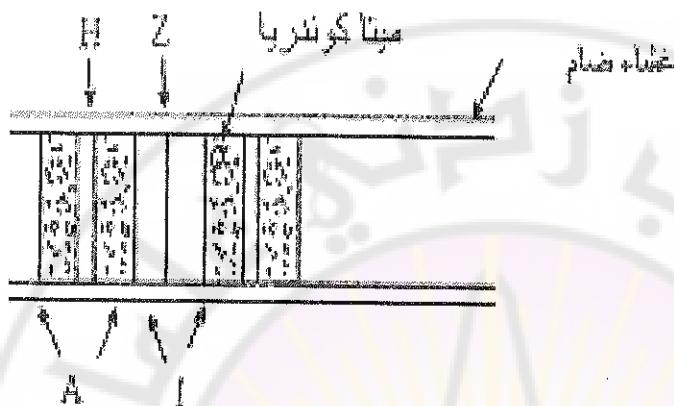
يقسم علم الأنسجة، العضلات في الأجسام المختلفة إلى عضلات مخططة وعضلات ملساء .

عندما ننظر إلى العضلات المخططة ، نجد أنها مكونة من شرائط منتشرة بشكل منظم طولياً في حين أن العضلات الملساء تتكون من شعيرات أقصر وبدون انتظام .

يوضح الشكل (9-9) مقطع من الشعيرات العضلية المخططة التي تتكون من عدد من التويات والمتداكوندريا (مولدات الطاقة) وعدد من الشرائط السوداء ، منها (A) وهي غير منتظمة التركيب ، وتستطيع فصل شعاع الضوء غير المستقطب إلى شعاعين ويكون ذلك بسبب العدد الكبير لجزيئات البروتين ، وتسمى هذه الشريطة أيضاً بأقراص Q . الشريطة A بيضاء ومنتظمة التركيب وتسمى بأقراص I أما أقراص Z فهي في منتصف الشريط A ولونها أسود . النطاق H يكون أقل تلوناً ويوجد في منتصف الشريط A .

معظم العضلات المخططة تتكون من حزم كبيرة ، من هذه الشعيرة العضلية ، يتراوح قطرها من $100\mu m$ → $10\mu m$ و يصل طولها إلى

ومحاطة بغشاء من الأنسجة ، وبين حزم هذه الشعيرات العضلية نجد الأوعية الدموية والأعصاب والشعيرات الصغيرة التي تنتهي بالأوتار.



الشكل (9-9) رسم لشعايرة عضلية في عضلة مخططة

يجدر بالذكر أن انقباض العضلات المخططة ، يقلص جزء من طولها ، بينما يتغير طول العضلات الملساء عدة مرات ، ويعزى ذلك لإلزلاق خلايا العضلات الملساء بعضها على بعض وذلك حسب الشكل (9-10) .

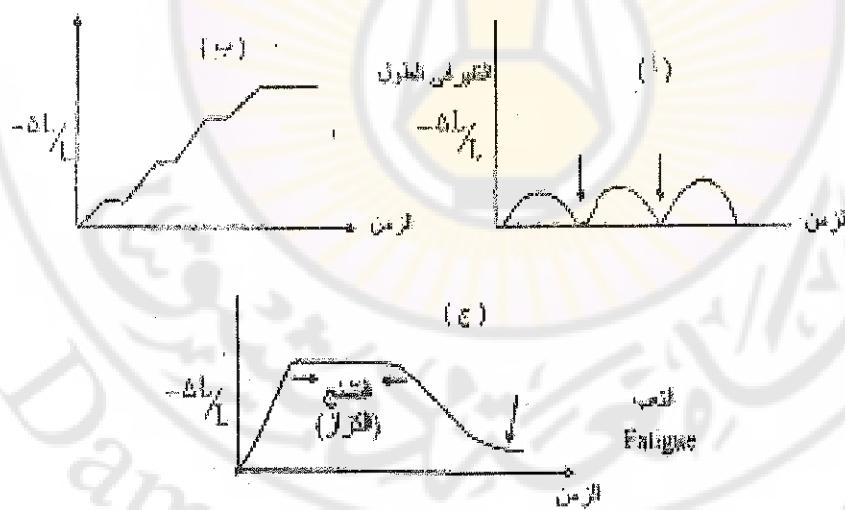
الشكل (10-9) خلية من خلايا عضلة ملساء .

الانقباض العضلي : عندما تخضع عضلة لإثارة ، فإنها تقبض ، فإذا كانت هذه الإثارة على طولها ، انقبضت العضلة عند طول ثابت ويسمى هذا الوضع تساوي الطول .

أما إذا كانت الإثارة عمودية عليها ، فإن هذا الوضع يسمى تساوي القوة .

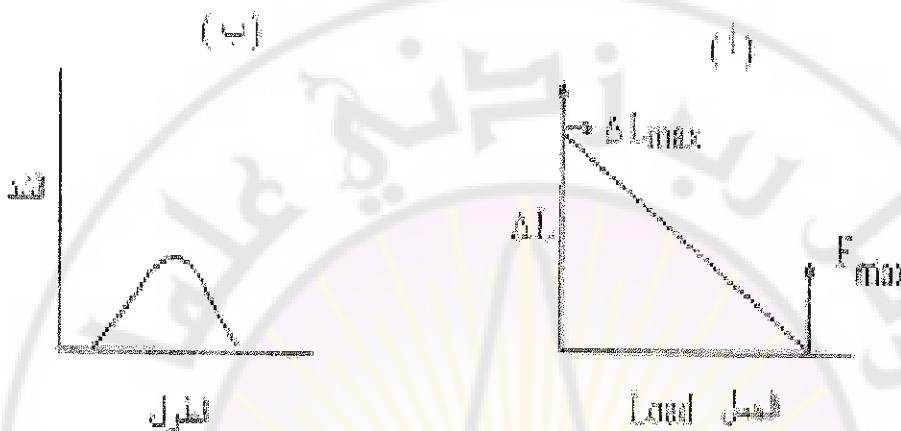
لدراسة هذين الوضعين نقوم باستخدام مثير كهربائي مناسب في عضلة ، فإذا كان هذا المثير مناسباً فإن العضلة سوف تسترخي وتعود إلى طولها بين فترات الإثارة ، كما هو مبين في الشكل (11-9-أ) .

أما إذا كان تواتر المثير أسرع من زمن عودة الطول الطبيعي للعضلة فإنه سيحدث تجمع لها حتى الوصول إلى قيمة معينة تشكل عندها أكبر استطالة ΔL بالنسبة لطولها الطبيعي L ، فإذا ازداد التواتر أكثر من ذلك ، فإننا نصل إلى حالة التشنج (11-9-ج) إلى أن يحدث انهيار أو إجهاد .



الشكل (11-9) منحنيات انقباض العضلة عند شدة ثابتة للمثير وترددات مختلفة أ- عند تردد مناسب . ب- عند زيادة التردد ج- عند ترددات عالية جداً

نذكر هنا أن التعب لا يحدث للعضلة نفسها ، وإنما للعصب المرتبط بها .
 الشكل رقم (12-9-أ-ب) يوضح المنحنيات التي تظهر العلاقة بين تغير طول العضلة كتابع للقوة المطبق عليها



الشكل رقم (12-9-أ-ب) العلاقة الخطية بين القوة المطبقة والتغير في طول العضلة ب -
 العلاقة بين الشد في العضلة عند أطوال مختلفة .

يبين الشكل (12-9-أ) العلاقة بين تغير الطول ΔL والحمل (القوة) المطبق عليها ، وهي كما نرى من الشكل ، خطية ، ويمكن التعبير عنها بالمعادلة :

$$\Delta L = \Delta L_{max} \left(1 - \frac{F}{F_{max}} \right)$$

حيث تمثل F القوة المؤثرة الناتجة عن التحميل ، أما العمل W الناجم عن التحميل فيساوي :

$$W = F \cdot \Delta L$$

ويأخذ العمل الصيغة النهاية :

$$W = F \cdot \Delta L_{\max} \left(1 - \frac{F}{F_{\max}} \right)$$

هذا العمل يصل إلى نهاية عظمى عندما نأخذ التفاضل بالنسبة للقوة $\frac{dw}{dF} = 0$

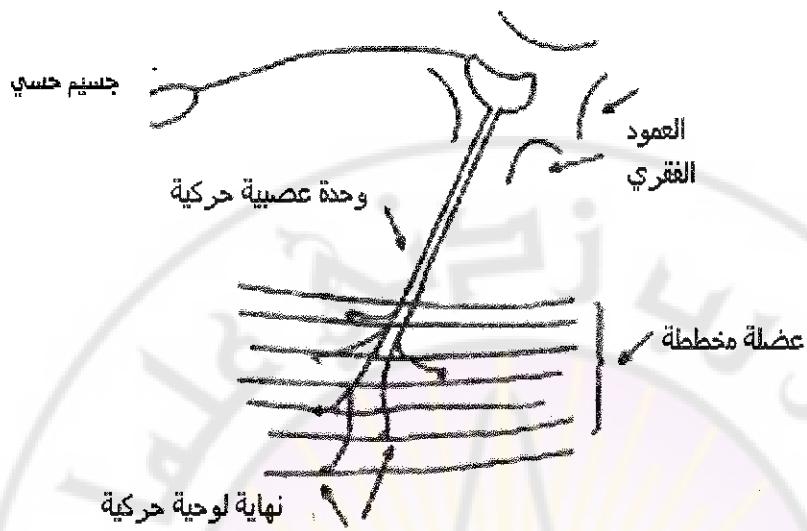
وبذلك تأخذ القوة الشكل :

9-7-2 العضلة وإنماج الحرارة

المعروف أن للعضلة وظيفة ، هي بذل القوة ، إلا أن لها وظيفة أخرى هي إنتاج الحرارة أثناء وبعد عملها ، وقد وجد أن ارتفاع درجة حرارة العضلة أثناء الشد يكون في حدود 0.003 درجة مئوية ، وذلك ضمن فترة زمنية قصيرة .

9-7-3 النشاط الكهربائي للعضلات

يمكن التعرف على الحالة الصحية للعضلات من خلال تسجيل النشاط الكهربائي لها ، ومن المعروف أن للعضلة وحدات عصبية حركية ، كما هو مبين في الشكل (9-13) وكل وحدة عصبية شعيرية عصبية مكونة من عدد من الخلايا العصبية الموجودة في المخ أو في العمود الفقري وتتصل بحوالى 25.....2000 شعيرية عضلية عن طريق نهاية لوحية حركية .

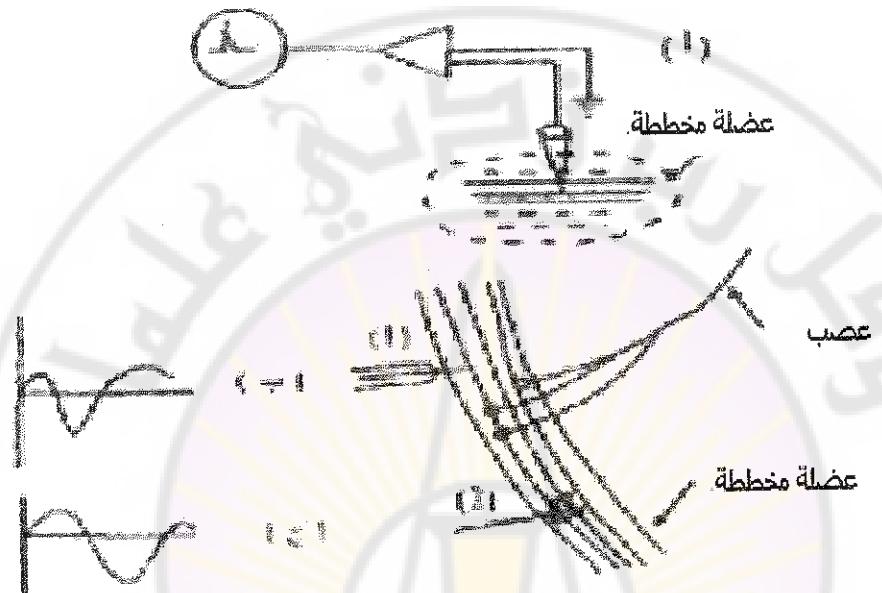


الشكل (13-9) يبين تخطيط العضلة المخططة وتشعب الوحدات العصبية الحركية داخلاها واتصالها بالشعيرات العضلية عن طريق النهايات اللوحية الحركية .

تنقبض العضلة نتيجة تأثير النبضات الكهربائية القادمة سواء من المخ ، عبر العمود الفقري ، أو مباشرة من الخلايا الحركية العصبية للعمود الفقري والتي تمر عبر الوحدات الحركية إلى أن تنتهي إلى النهايات اللوحية لها ، وهذه بدورها تثير الشعيرات العضلية ، ومن ثم تؤدي إلى انقباضها.

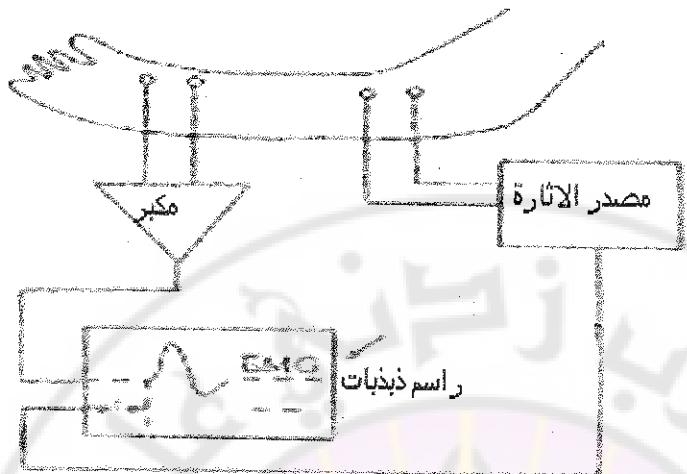
يمكن تسجيل هذا النشاط إما على مستوى شعيرة عضلية ، وذلك بإدخال أقطاب صغيرة داخلاها وذلك كما في الشكل (14-9أ) وتسمى هذه بطريقة الكمون المسجل من داخل الشعيرة العصبية ، أو يمكن تسجيل النشاط الكهربائي لمجموعة من الشعيرات العضلية ، وفي هذه الحالة ، يعتمد النشاط على قطر

القطب المسجل ، كما في الشكل (14-9-ب) . أما في الشكل (14-9-ج) فإن التسجيل ناتج عن استخدام قطب يوضع على سطح جلد العضلة .



الشكل (14-9) أ - تسجيل النشاط الكهربائي للشعيرات العضلية باستخدام قطب متناهي الصغر بـ، ج شكل النشاط الكهربائي للعضلة باستخدام نوعين من الأقطاب على شكل إبرة مزدوجة (1) وقطب سطحي(2)

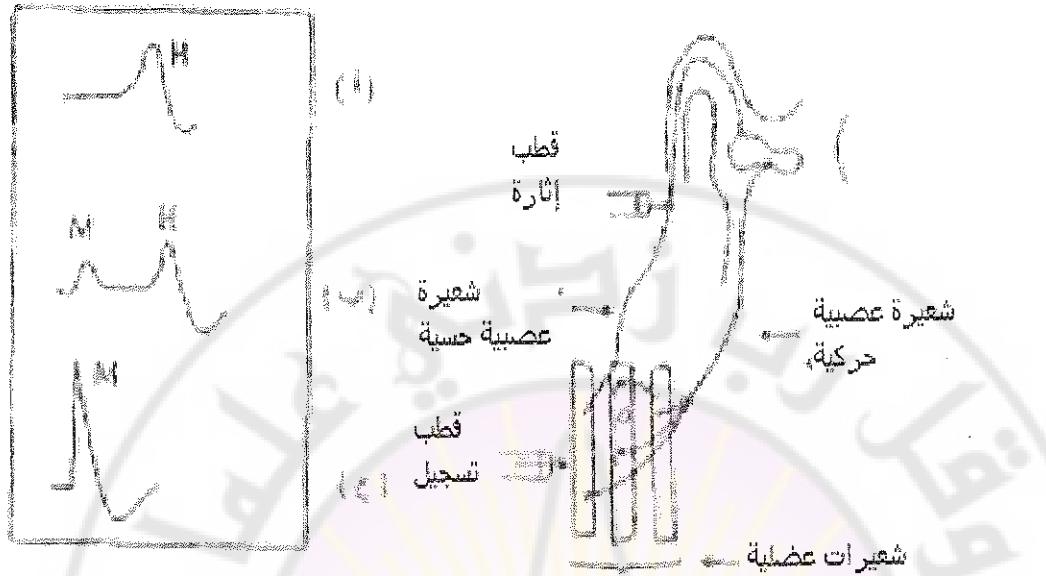
كما يمكن استخدام أقطاب للتسجيل وأخرى لإثارة الوحدة الحركية العصبية ، كما في الشكل (15-9) والذي يبين كل من مصدر الإثارة الكهربائية المستخدمة و一波مة استجابة العضلة التي تظهر بعد مرور زمن يدعى بـ *التأخر* .



الشكل (15-9) يمثل كيفية تسجيل الإشارة عن طريق إثارة الوحدة الحركية العصبية

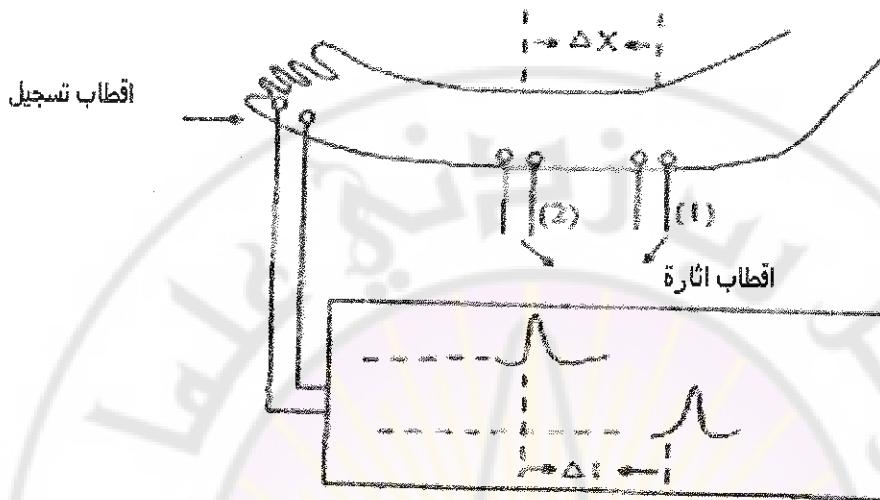
حيث يعتبر زمن التأخير هذا من الخواص المهمة التي تستخدم في تشخيص حالة العضلة وذلك بمقارنتها بعطلة سلieme .

كما يمكن إثارة الأعصاب الحسية وذلك لتشخيص التصرف الانعكاسي الذي ينشأ من إثارة العضلة ، أي أنه من الممكن تشخيص عمل الخلايا العصبية الموجودة في العمود الفقري حسب الشكل (16-9)



الشكل (9-16) التصرف الانعكاسي عن طريق إثارة الشعيرات العصبية والتسجيل من الشعيرات العضلية

يتبيّن من الشكل أنه عندما تكون الإثارة ضعيفة ، فإننا نحصل على الاستجابة أو النشاط الكهربائي من الشعيرات الحسية فقط (H) وليس الحركية (M) التي تتحسّس من زيادة الإثارة . أما في حال زيادة الإثارة ، فإننا نحصل على الاستجابة (M) فقط . ولقياس سرعة انتقال الكمون النشط خلال الشعيرات العصبية الحركية فإننا نستخدم المخطط المبين في الشكل (10-17) وفيه نستخدم قطبان ، نضعهما على مسافة ΔX من بعضهما ويسجل الكمون النشط الناجم عن الإثارات باستخدام راسم الاهتزاز الممبوطي .



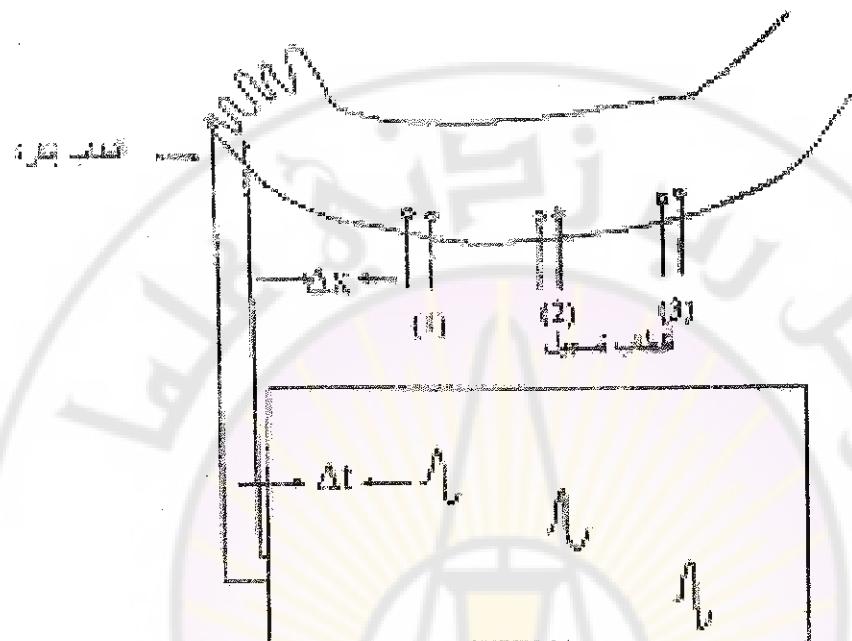
الشكل (17-9) تسجيل سرعة سريان الکمون النشط خلال الشعيرات العصبية الحركية .

ومن قياس الفترة الزمنية بين كمونين بفارق زمن Δt يمكن تحديد سرعة تأثير الکمون النشط (V) باستخدام العلاقة : $V = \frac{\Delta X}{\Delta t}$ وتقدير السرعة هنا ب: سم ثانية .

إن هذه القيمة ثابتة عند الأشخاص السليمين وأي تغير في هذه القيمة يعني أن الأعصاب الحركية مريضة ، طبعاً في المنطقة التي نقيسها ، ويعطي ذلك مؤشراً على تعب العضلة ، وسببه هو عدم قدرة العصب الحركي على إيصال التأثير وتكرير الإثارة .

كما يمكن إيجاد سرعة جريان الکمون النشط خلال الشعيرات العصبية الحسية باستخدام مجموعة من أزواج أقطاب التسجيل (1) و(2) و(3) التي

تسجل الكمون النشط الناجم عن إثارة عضلة موجودة في اليد كما هو موضح في
الشكل (9-18)



الشكل (9-18) تسجيل سرعة سريان الكمون النشط خلال الأعصاب الحسية .



المراجع العربية

- 1 الفيزياء الجامعية للعلوم الطبية والحيوية
تأليف د . أحمد عبد السلام رحيل
د . الطاهر مختار أبو عين جامعة الفاتح
- 2 الفيزياء التطبيقية
أ.د . محمد عبد المقصود الجمال جامعة الإسكندرية
أساسيات الفيزياء
- 3 د. رافت كامل واصف جامعة القاهرة
- 4 الفيزياء (1)
د. إبراهيم شريف جامعة بيروت العربية
فيزياء الصوت والحركة الموجية
- 5 د. أمجد عبد الرزاق كرجية جامعة الموصل
- 6 الفيزياء الطبية
د. عبد الغني قرم جامعة حلب
د. فياض حسين
- 7 د. سهيل باطة
الضوء الهندسي
- 8 د. أدهم السمان جامعة دمشق
الفيزياء للمعاهد المتوسطة المتخصصة
- 9 ل. جدانوف . غ.جданوف دار مير موسكو
الفيزياء الحيوية (الجزء الثاني) مجلة علمية تصدرها مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتكنولوجيا



المراجع الأجنبية

- 1- G.S. hurst and J.E.Turner. Elementary Radiation physics,John wiley&Sons,Inc,New York.1970
- 2-Maurice J.Cotter and Kathleen Taylor,Neutron Activation Analysis of Painting, The physics Teacher,vol 16,Ma 1978,p263.
- 3-Rowland W. Redington and Walter H. Berninger, Medical Imaging System, physical Today,vol . 34 ,August 1981, p.5.
- 4-Advisitory Committee on the Biological Effect on population of Exposure to low Level of Ionizing radiation ,National Research Council , National Academy of Sciences , National Academy of Sciences , National Academy Press , Washington , D.C.1980 .
- 5-Louis E. Etter The Science of Ionizing Radiation, Charles C Thomas , Springfield , 3, 1969



المصطلحات العلمية

A

absolute	مطلق
adiabatic	كظوم
altitude	ارتفاع
atmosphere	جو
atom	ذرة
aberratio	زيغ أو عيب
absorbed dose	جرعة الامتصاص
acceleration	تسارع
accommodation of the eye	تكيف العين
acoustic impedance	الممانعة الصوتية
action potential	الكمون النشط
adenosine triphosphate	أدينازين ثلاثي الفوسفات
aerobic	هوائي
after potential	بعد الكمون النشط
alveoli	حويصلات هوائية
anaerobic	لاهوائي
autonomic nervous system	الجهاز العصبي اللاإرادي
axon	الساق

B

boiling point	نقطة الغليان
barometer	جهاز قياس الضغط الجوي
basal metabolic rate	معدل الأيض الأساسي
basilar membrane	غشاء القاعدة
becquerel	وحدة قياس شدة الإشعاع
biceps muscle	العضلة ذات الرأسين
bifocal	ثنائي التحديد
binocular vision	ثنائي الرؤية
bipolar neuron	خلية عصبية [ثنائي القطب]
birefringence	القدرة على فصل الضوء غير المستقطب
blind spot	النقطة العمياء
blood pooling	تجمع الدم
blood pressure	ضغط الدم
blood vessel	وعاء دموي
bone mineral	معدن العظم
brachial artery	شريان عضدي
braking radiations	الأشعة الإنكابحية
brilliance	اللمعان أو السطوع
bulk modulus	المعامل الحجمي

C

calorie	حريرة
capacity	سعة

coefficient	عامل [معامل]
centigrade	مئوي
collision	اصطدام
compression	انضغاط
concentration	تركيز
condensation	تكاثف
conduction	نقل [إصال]
contraction	تضيق
convection	حمل
cooling	تبريد
critical point	نقطة حرجة
cycle	دورة
capillary	شعري
cavitation	تكون الفجوات
cell body	جسم الخلية
central nervous system	الجهاز العصبي المركزي
centrifugal force	قوة الطرد المركزي
cerebrospinal fluid	السائل المخفي
characteristic peaks	القمة المميزة
chromatic aberration	الزيغ اللوني
chronaxie	كرونکاس (مقاييس الزمن)
ciliary muscle	العضلات الهدبية
coefficient	معامل

color blindness	عمى الألوان
communication	الاتصالات
compression	انضغاط
Compton scattering	أثر كومبтон
computer tomography scan	المسح المقطعي بالمحاسب
conductance	توصيل
cones	مخاريط
continuity equation	معادلة الاتصال
contraction	انقباض
convection	الحمل
critical velocity	السرعة الحرجة
cryosurgery	جراحة التبريد
curie	وحدة قياس شدة الإشعاع [الكوري]

-D-

degree	درجة
density	كتافة
diagram	مخطط
diatomic	ثنائي الذرة
diffusion	انتشار
distribution	توزيع
dyne	دينية
daughter nucleus	النواة الوليدة

dB	وحدة قياس شدة الصوت النسبية
deceleration	تباطؤ
deep tissue	الأنسجة العميقية
dendrites	شجيرات طرفية
depth of perception	عمق الرؤية
deterministic	ختمي
diastolic	الانبساطي
diet	حمية
donnan equilibrium	توازن دونن
doppler effect	تأثير دوبلر
double phase	ثنائي الوجه
dynamic friction	الاحتكاك динамический
dynamics	динамикa
dynode	قطب (دينود)
-E-	
effect	فعل (مفعول)
efficiencyt	مردود
elasticity	مرنة
energy	طاقة
enthalpy	أنتالبيّة
entropy	أنترóبيّة
equilibrium	توازن

expansion	تمدد
ear drum	طبلة الأذن
exposure dose	جرعة التعرض
efferent nerves	أعصاب مؤثرة
efficiency	الكفاءة
elastic scattering	تشتت مرن
elbow	المرافق
electric dipole	ثنائي القطب
electrical stimulus	الإثارة الكهربائية
electrical force	القوى الكهربائية
electrical impedance	المعاوقة الكهربية

-F-

fluid	سائل
free energy	طاقة حرّة
free path	مسار حرّ
friction	احتكاك
fusion	انصهار

-G-

gas	غاز
gas constant	ثابتة الغاز

-H-

heat	حرارة
(latent) heat	حرارة كامنة(لاطية)

heat conductivity	نافلة حرارية
heat equilibrium	توازن حراري
-I-	
ice	جليد
ideal gas	غاز مثالي (كامل)
internal energy	طاقة داخلية
internal pressure	ضغط داخلي
isobar	متساوي الضغط
isochore	متساوي الحجم
isolated	معزول
isotherm	متساوي درجة الحرارة
heat	الحرارة
isotropic	متمااثل المناخي
-K-	
kinetic energy	طاقة حركية
-L-	
law	قانون
linear expansion	تمدد خطى
liquefaction	تمبيع
liquid	سائل مائع
-M-	
mass	كتلة
mean value	قيمة وسطية
mean velocity	سرعة وسطية

mole	مول
molecule	جزيء
monoatomic	أحادي الذرة
	-N-
number	عدد
	-P-
paramagnetism	مغناطية طردية
parameter	وسيط
partial pressure	ضغط جزئي
particle phase	جسيم
phenomena	ظاهرة
(triple)point	نقطة ثلاثة
Polyatomic	متعدد الذرات
Polytropic	متعدد المناخي(بوليتروبية)
potential	كمون
process	تحول
pyrometer	بيرومتر
	-R-
reel gas	غاز حقيقي
reversible	عكس
	-S-
scale	تدرج
solid	صلب
source	منبع

specific heat	حرارة نوعية
state	حالة
statistic	إحصائي
sublimation	تصعد
	-T-
temperature	درجة حرارة
thermocouple	مزدوجة كهربائية
thermodynamique	ترموديناميك
thermometer	ميزان حرارة
thermostat	منظم درجات
	الحرارة (ترmostat)
	-U-
unit	واحدة
	-V-
vacuum	خلاء
vapor	بخار
velocity	سرعة
vibration	اهتزاز
volume	حجم
	-W-
work	عمل

اللجنة العلمية :

- د. سهام طرابيشي
..... د. فوزي عوض
..... د. محمد سعيد محسنة

المدقق اللغوي :

- د. برهان أبو عسلی

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات
الجامعة