



الفيزياء الحيوية



السنة الأولى
قسم الفيزياء



منشورات جامعة دمشق
كلية العلوم

الفيزياء الحيوية

الدكتور

محمود الغفري

أستاذ مساعد في قسم الفيزياء

الدكتور

محمد سعيد محاسنة

أستاذ في قسم الفيزياء

الدكتورة

عنايات الزين

المدرسة في قسم الفيزياء

1430 - 1431 هـ

2009 - 2010 م

جامعة دمشق



الفهرس

15	الفصل الأول خواص الموائع
15	(1-1) مقدمة
15	(1-2) الضغط
17	(1-3) الضغط قي 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 منحنى (قانون لابلاس)
47	مسائل الفصل الأول
49	الفصل الثاني الموائع في حالة الحركة
49	(2-1) تعريف المائع
49	(2-2) انسياب 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 الازدواج الحراري
84	(3-10) التعبير الرياضي للمقياس الترمومטري
90	(3-11) الترمومتر البلاتيني
92	(3-12) الترمومترات الغازية

93	(3-13) الترمومتر الغازي ذو الحجم الثابت
95	(3-14) البيرومتر الضوئي
97	مسائل الفصل الثالث
99	الفصل الرابع انتقال الحرارة
99	(4-1) طرق انتقال الحرارة
100	(4-2) انتقال الحرارة بالتوصيل
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) السرعة في الحركة الموجية
147	(5-12) سرعة الجسيم
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 دوبلر
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 المستقيم
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 الشبكية
229	(6-15) المطابقة
231	(6-16) شذوذ البصر وإصلاحه
236	(6-17) منحنى 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 المكروية وموجات الراديو
256	7-1-2 الوقاية والأمان من الموجات المكروية 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	4-1-7 الأشعة فوق البنفسجية - مجالاتها - مصادرها
260	5-1-7- أشعة الليزر : توليدها - استخداماتها - أنواعها
262	2-7 الإشعاع المؤين
262	1-2-7 الإشعاع الكهرومغناطيسي - الأشعة السينية
264	2-2-7 الجسيمات المشحونة , جسيمات , جسيمات
266	3-2-7 إشعاعات
266	4-2-7 النيوترونات
266	5-2-7 الآثار البيولوجية للإشعاعات المؤينة
267	6-2-7 التأثيرات الحتمية والعشوائية للإشعاع
271	الفصل الثامن الكمون السكوني للخلايا والأنسجة
271	تمهيد
273	1-8 الهد الساكن
273	2-8 مبادئ تشكل الكمون الحيوي
274	3-8 توزع الشوارد على الغشاء نصف النفوذى للخلية
274	4-8 دراسة ترموديناميكية لكمون الغشاء السكوني
278	5-8 كمون الشوارد المتراكمة على الغشاء
280	6-8 كمون التوازن
282	7-8 الخواص الكهربائية للخلايا والأنسجة الحية
284	8-8 مقاومة الخلية
287	9-8 دراسة مرور التيار المستمر خلال الخلايا والألياف العصبية
290	10-8 الممانعة الكهربائية للأنسجة والخلايا
295	الفصل التاسع الكمون الكهربائي الفعال للأنسجة

295	تمهيد
295	9-1 الإثارة الميكانيكية
295	9-2 الإثارة الضوئية
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 الطبية
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 و الخصائص 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 و تحكم 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 الدكتورة عنايات الزين والتي تناولت فيها :

خواص الموائع وحركتها والمقاييس الحرارية وأنواعها , وطرائق انتقال الحرارة وتأثيرها على الخلايا الحية والحركات الموجية والصوت ثم الضوء وطبيعته والقوانين النازمة لانتشاره , ودراسة العين كمجموعة ضوئية , ومكوناتها والعيوب التي يمكن أن تتعرض لها .

بينما كتبت الفصول الثلاثة الأخيرة من قبل الدكتور محمد سعيد محاسنه والدكتور محمود الغفري 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 نكون قد وفقنا في مسعانا هذا وحققنا الهدف والفائدة والله ولي التوفيق

المؤلفون



الفصل الأول

خواص الموائع

1-1 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 شبهنا 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 متجهة إلى الخارج تساوي القوة التي يؤثر بها الهواء الخارجي عليها إلى الداخل ، والتي تحاول أن تسبب انحناءها ، 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 ، بالضح فإن العلبة ستتهار تحت تأثير القوى غير المتزنة ، والناجمة من الضغط الجوي الخارجي .

1-2 الضغط :

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

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

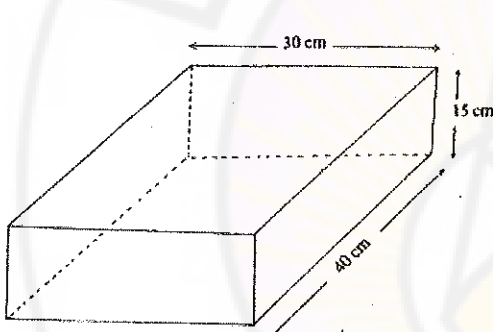
يُقَدَّر الضغط بالجملة الدولية N/m^2

وفي الجملة السغنية dyn/cm^2

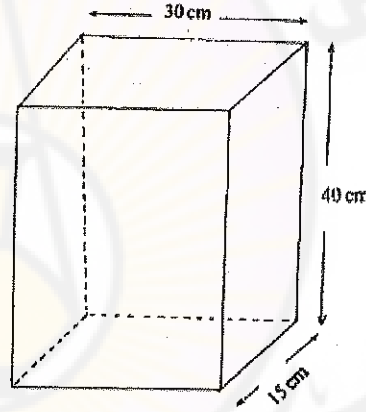
إن كلمة ضغط ليست مرتبطة بحالة المادة ، وإنما بوجود قوة مؤثرة على مساحة ، فالمواد الصلبة والسائلة والغازية ، يمكن أن تؤثر وتتأثر بالضغط .

مثال (1)

صندوق معدني على شكل متوازي المستطيلات 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)



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 :

$$F = mg$$

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

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

وباستخدام المعادلة (1-1) نجد

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

$$P = \frac{254.8 \text{ N}}{12.10^{-2} \text{ m}^2} = 2.12.10^3 \text{ N/m}^2$$

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

$$A = (15.10^{-2} \text{ m}) (30.10^{-2} \text{ m}) = 4.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

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 الموائع

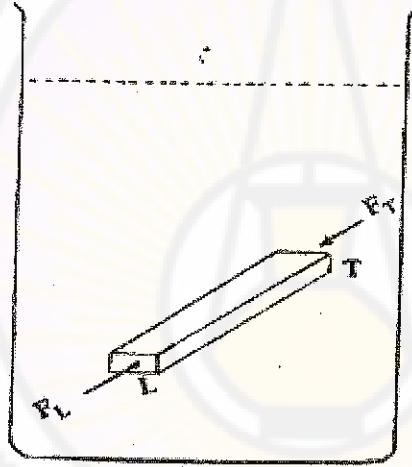
نلاحظ من خلال تجاربنا أننا نستطيع أن نؤثر بقوة على سطح الجسم الصلب

في أي اتجاه ، ولكن في حالة الموائع ، فإن القوة لا بد أن تؤثر عمودياً على السطح

في حالة التوازن ، فلو افترضنا أن هناك قوة تؤثر بشكل مواز 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) ، ولتوضيح هذه الخاصية ، نتخيل 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 ، ولأن 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 رمزنا للضغط على السطح A بـ P_A والضغط على السطح B بـ P_B فإن :

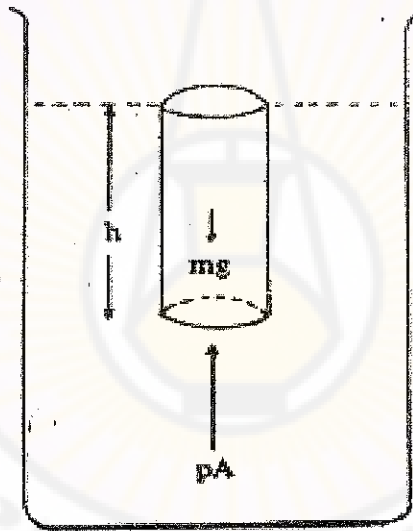
$$P_A = \frac{F_A}{A} \quad , \quad P_B = \frac{F_B}{B}$$

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) و سطحها العلوي على مستوي سطح السائل .



الشكل (3)

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

$$PA=mg$$

أو

$$PA-mg=0$$

F

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_A و L_B على التوالي ، كما في الشكل (4) ومن المعادلة (1-1) يكون الضغط عند النقطة A :

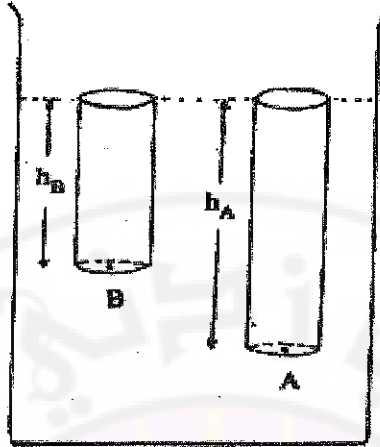
$$P_A = \rho g L_A$$

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 $(1.03 \cdot 10^3) \text{ Kg/m}^3$

الحل : 9.8

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 نساكنه ، 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 مقطعه 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:

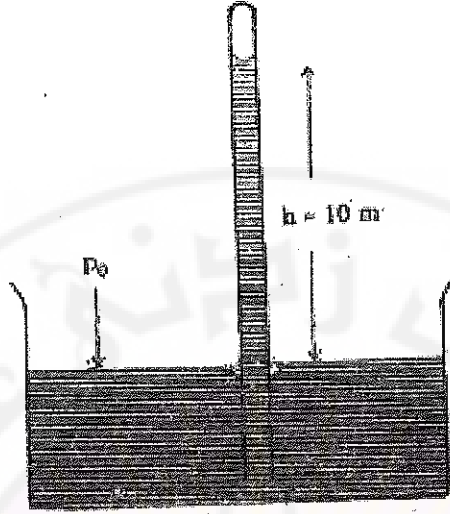
$$P_0 = \rho gh$$

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 (76 cm) ، أو

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



الشكل (5)

1-5 ضغط الدم

إن ضربات القلب منتظمة ومستمرة ، عددها في الرجل البالغ السليم 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 الأذنين ، 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

(ينبض) ، فإن الضغط يتراوح بين المستوى الانقباضي ، وهو حوالي (120 mmHg) ، وهذه أعلى قيمة ، وبين المستوى الانبساطي ، وهو حوالي (80 mmHg) وهذه أدنى قيمة ، وهذان 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 ينفخ 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 نتيجة لذلك جريان الدم في الذراع ، ثم يخفض الضغط داخل الحزام تدريجياً ، وذلك بفتح الصمام والسماح للهواء أن يتسرب منه ، وبواسطة السماعة الطبية يستمع الطبيب إلى رجوع النبضة للشريان ، وأول صوت يسمع للنبضة ، عندما يكون الضغط في الحزام مساوياً للضغط الشرياني ، وعندها 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 السغنية ، تكون وحدة الضغط dyn/cm^2 ، وفي الجملة الدولية N/m^2 وتسمى هذه الوحدة بالباسكال ويرمز لها بالرمز (Pa) .
أي أن :

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

ورأينا أيضاً أن ضغط جوي واحد (1 atm) يساوي $1.013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (، أو يعادل (76 cm Hg) . هنالك وحدات أخرى للضغط ، تستخدم لأغراض

مختلفة من العلوم ، فعلماء الأرصاد الجوية يستخدمون وحدة البار (bar) ، وهي تعادل مليون دينة/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 الزئبق طوله (1 mm) ، ويسمى (1 mm Hg) بالتور (Torr) أي أن :

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

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

1-7 الضغط القياسي

عندما يكون سطح السائل معرضاً 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 :

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

وكثيراً 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 و ضغط 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 :

$$P = P_0 + \rho gh$$

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

8-1 الضغط السالب :

مع

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 ثلاث زجاجات متشابهة ، كما في الشكل (6) ، كلاً منها مملوءة جزئياً بسائل ، ومغلقة بإحكام بسدادة ، ومثبت بكل سدادة أنبوبة يكون حرفها العلوي مفتوحاً للهواء الجوي .

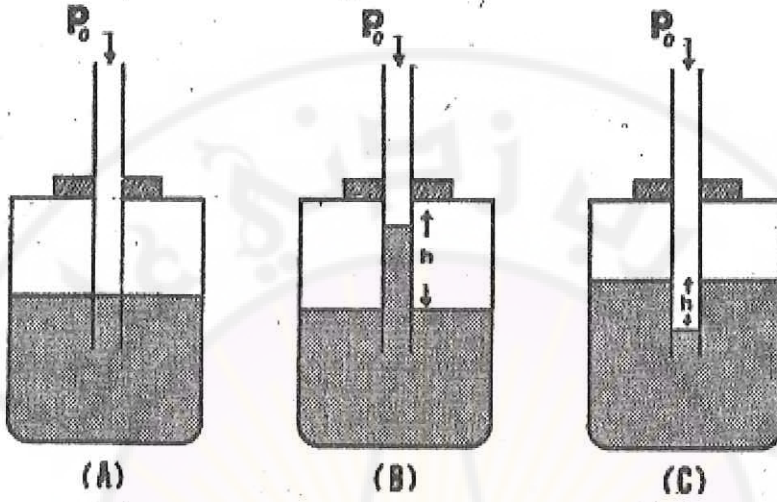
فإذا كان الضغط في الزجاجات يساوي الضغط الجوي ، فإن مستوى سطح السائل في الزجاجات وفي الأنبوبة يكون متساوياً كما في الشكل (6- A) . أما إذا كان الضغط في الزجاجات أكبر من الضغط الجوي ، فإن السائل في الأنبوبة سيرتفع عن مستوى سطح السائل في الزجاجات كما في الشكل (6- B) .

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

في الحالة (A) يكون الضغط القياسي يساوي صفراً ، 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 الحجيرات الهوائية فخلال عملية الشهيق يصبح الضغط سالباً (تقريباً -1mmHg) ، وهذا يسبب في اندفاع الهواء داخل الرئتين ، وخلال

عملية الزفير يرتفع الضغط داخل الحجيرات الهوائية إلى (+1 mmHg) تقريباً ، وهذا يجعل الهواء يندفع إلى الخارج خلال الجهاز التنفسي .



شكل (6)

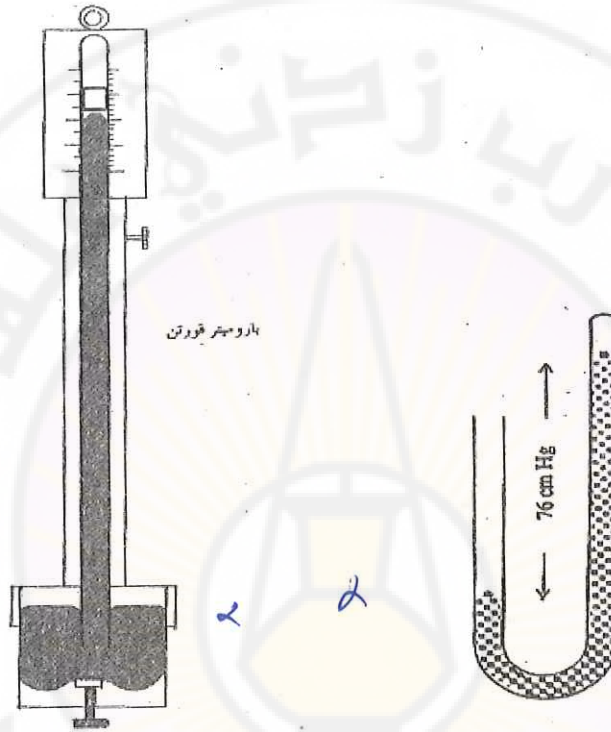
9-1 أجهزة قياس الضغط:

1- 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 تقريباً ، مسدودة من أحد طرفيها ، ومملوءة بالزئبق ، وتوضع في إناء فيه زئبق ، وتكون قراءة ارتفاع الزئبق هي مقدار الضغط الجوي مقدراً بالسنتيمتر الزئبقي (cm Hg) ..

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

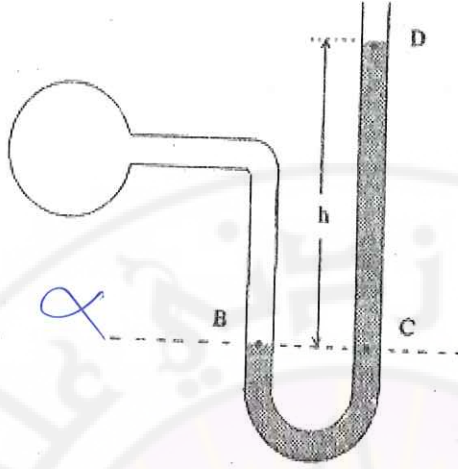
حرف (U) ، مسدود أحد طرفيها ومملوءة بالزئبق ويكون الفرق في ارتفاعي سطحي الزئبق في الأنبوبة هو مقدار الضغط الجوي (cm Hg)



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 .

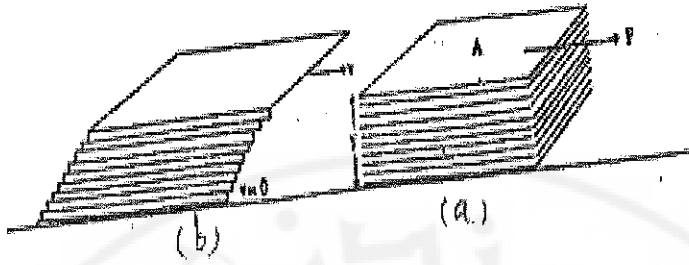


الشكل (8)

1-10 اللزوجة

عندما يتحرك جسمان متلامسان بسرعتين مختلفتين ، تنشأ عند السطح الفصل بينهما قوى احتكاك ، تظهر من خلال تحول الطاقة إلى حرارة ، أما فيما يخص الموائع ، 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 اللزوجة في حالة سائل يجري بصورة طبقية تختلف سرعة كل طبقة عن مجاورتيها ، 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) ، وأثرنا 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 السفلى (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) ، كالآتي :

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

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

أي أن

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

أو

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

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 $N \cdot S/m^2$ ، ولكن واحدة اللزوجة الشائعة في الجملة السغثية هي $dyn \cdot S/cm^2$ وتسمى بواز ، وتساوي

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

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) يعطي معامل اللزوجة لبعض المواد في درجات حرارة مختلفة .

جدول (1):

الهيدروجين 10^{-6} Pa.s	الهواء 10^{-6} Pa.s	البنزين 10^{-3} Pa.s	الماء 10^{-3} Pa.s	T (°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 بالموائع وذلك لعدم تجانسه ، فتكون العلاقة بين القوة الأفقية المؤثرة فيه والسرعة ليست علاقة خطية .

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

1-11 قياس معامل اللزوجة η

1-1-11 قياس معامل اللزوجة لسائل بواسطة معادلة بوازوي POISEUILLE

تستخدم معادلة بوازوي [poiseuille] لإيجاد معامل لزوجة السوائل سهلة الحركة في الأنابيب كالماء والكحول .

يتكون الجهاز كما في الشكل (10) من مستودع للسائل (B) يستقبل السائل من صنوبر (A) ، وتثبت أنبوبة شاقولية مفتوحة الطرفين ، بحيث تنفذ 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 وينسكب من طرفها c ، ويتجمع في مخبر 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:

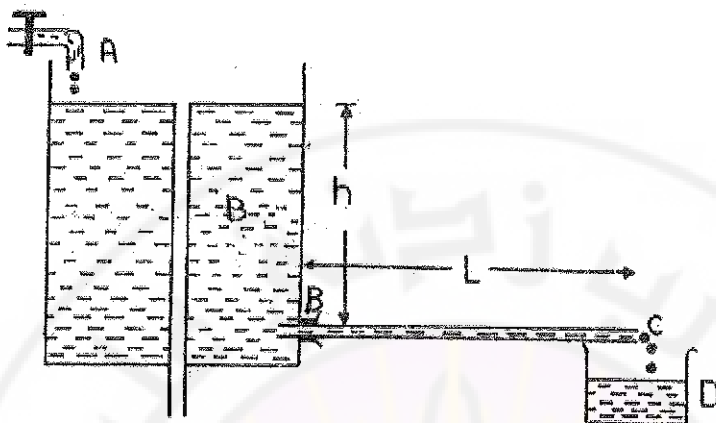
$$Q = \frac{\pi r^4 P}{8\eta l}$$

وبنعويض

$$P = \rho gh$$

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)

2-1-11 مقياس معامل اللزوجة لسائل بواسطة الكرة الساقطة (طريقة ستوك)

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

نلاحظ أن سرعة الكرة الساقطة تزايد تدريجياً حتى تصل إلى سرعة ثابتة ،
تسمى بالسرعة العظمى (V) ، وتخضع الكرة عند السقوط إلى ثلاث قوى :

1- قوة ثقلها المتجهة إلى الأسفل (mg) وتساوي :

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

2- القوة الناتجة عن دفع السائل للكرة واتجاهها للأعلى

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

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

3- 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 .

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

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

مثال (4) : م

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 صفراً ، فإن $a = 0$ وتكون

سرعة الكرة هي السرعة العظمى V

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

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

حيث ρ_v للنحاس

و ρ للماء

معامل اللزوجة للماء عند الدرجة 20°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

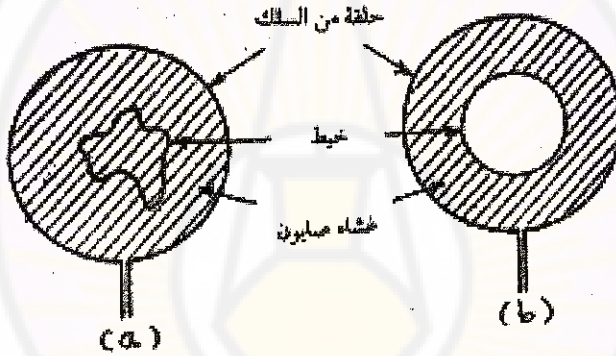
$$V = 789.44 \text{ m/S}$$

12-1 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 تنقوس أي يعمل سطح الماء كغشاء مشدود ، يحمل الإبرة ويمنع اختراقها له يشبه هذا ما يحدث لغشاء من الصابون في حلقة من سلك رفيع عندما يوضع على الغشاء خيط، الشكل (11.a) ثم يتقب ما داخل الخيط فيأخذ غشاء الصابون الشكل (11.b) .



الشكل (11)

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

13-1 النظرية الجزيئية للتوتر السطحي

افترض لابلأس 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 ، وافترض لابلأس أن الجزيئات داخل هذا الحيز ، هي التي تؤثر بشكل ملموس في الجزيء ، وأهمل تأثير الجزيئات الواقعة خارج الحيز .

فإذا 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 ، وآخر (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 بجزيئات السائل الأخرى، ستكون محصلة قوى التماسك التي تؤثر بها في هذه الجزيئات تساوي صفراً . أما الجزيء (B) الواقع عند سطح السائل ، فإنه يخضع لقوى تماسك 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 ، نتجه 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

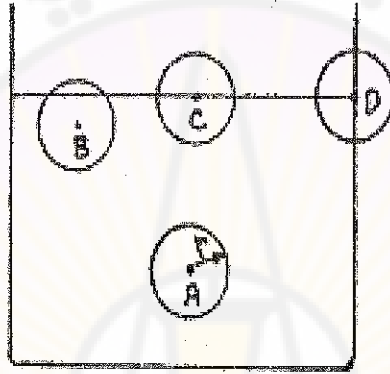
التماسك ، وقوى التلاصق السابقة ، فإن الجزيء يتأثر بقوى تلاصق ناتجة من

جزيئات مادة جدار الإناء الواقعة 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)

فإذا كانت محصلة قوى التلاصق أكبر من محصلة قوى التماسك ، فإن سطح

السائل يأخذ شكلاً مقعراً ، وذلك لأن سطح السائل يجب أن يكون عمودياً على

محصلة القوى ، لأنه لو كان غير ذلك ، فإن مركبة المحصلة في اتجاه السطح

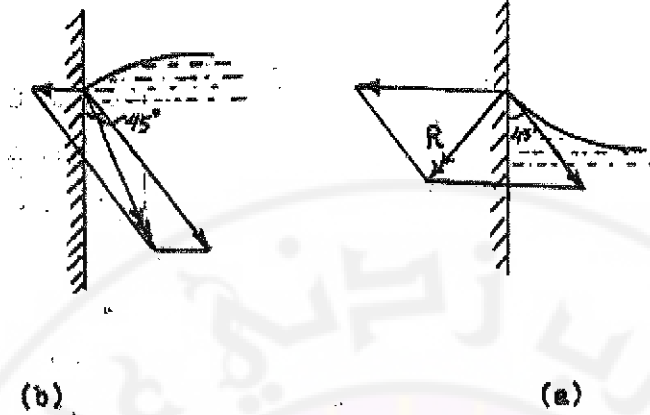
ستتسبب في وجود حركة في اتجاه سطح السائل ، ولا يمكن أن يحدث هذا لأن

السائل في حالة سكون ، ويقال للسائل في هذه الحالة أنه سائل مائل ، كما في حالة

الماء مع الزجاج. الشكل (13,a) . أما إذا كانت محصلة قوى التماسك أكبر من

محصلة قوى التلاصق ، فإن سطح السائل سيأخذ شكلاً محدباً ويحدث هذا في حالة

الزئبق مع الزجاج ، (سائل لا يبيل 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 : *هو السطح المتوتر كالأغشية*

مما 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 الخاصة الشعرية وزاوية التلامس :

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

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

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

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

ولإيجاد العلاقة بين ارتفاع السائل في الأنبوبة والتوتر السطحي ، نعرف أولاً 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 الأنبوبة، كما في الشكل (14) وتكون مركبة قوة التوتر السطحي المؤثرة في اتجاه جدار الأنبوبة :

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

حيث r نصف قطر الأنبوبة الشعرية .

(γ) التوتر السطحي للسائل .

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

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

حيث (ρ) كثافة السائل
 h ارتفاع السائل في الأنبوبة

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

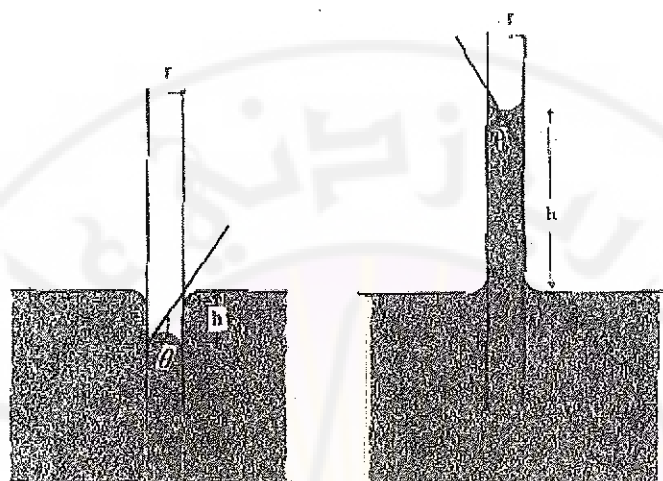
$$2\pi r \gamma \cos\theta = \rho \pi r^2 gh$$

ومنها يمكن حساب قيمة ارتفاع السائل في الأنبوبة

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

ويمكن حساب قيمة التوتر السطحي

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



الشكل (14)

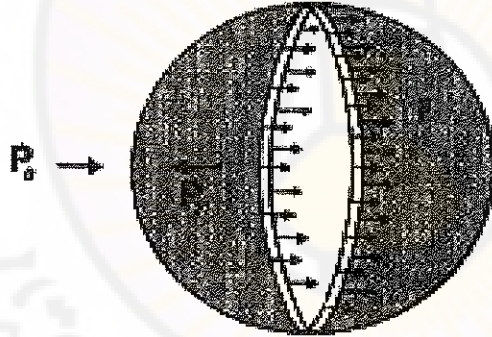
جدول (2)

زوايا التماس (θ)	المتجهدار	المسائل
0°	زجاج	ماء
90°	فضة	ماء
107°	بارافين	ماء
26°	زجاج	كبروسين
140°	زجاج	زئبق

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

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

تتكون 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 متساويتان في المقدار ومتعاكستان 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 للغشائين :

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

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

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

وبما أن هاتين القوتين متساويتان

فنجد

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

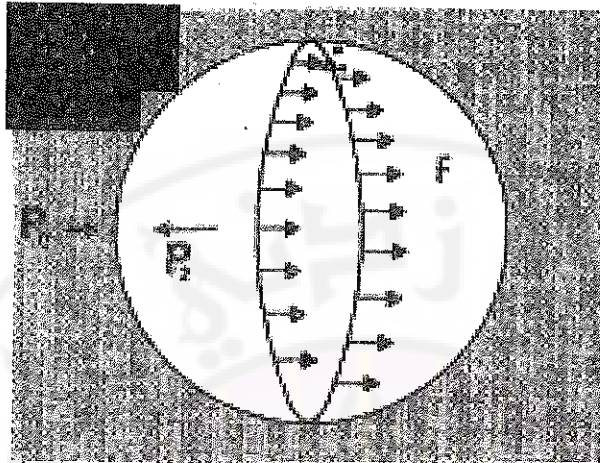
$$(P_i - P_o) = \frac{4\gamma}{r} \quad (1-9)$$

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 $(2\pi r)$ وتصبح العلاقة (1-9) كالتالي

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

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



الشكل (16)

أسئلة ومسائل الفصل الأول

- 1- ماهو تأثير درجة الحرارة على لزوجة السوائل .
- 2- ماهو الفرق في ضغط الدم بين القدمين والقلب لشخص واقف ، إذا كان مستوى القدمين على بعد (140 cm) من مستوى القلب .
- 3- عندما أجريت تجربة تورشيللي فوق قمة جبل وجد أن ارتفاع الزئبق يساوي (73.70 cm) أوجد مقدار الضغط الجوي .
- 4- احسب ما يقابل ضغط (16 cm) من الزئبق بالوحدات التالية :
 - 1) pa
 - 2) CmH₂O
 - 3) Torr
 - 4) bar
- 5- 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 .
- 6- يضخ القلب الدم في الأوردة بضغط انقباضي قدره (110 mm Hg) ، فإذا كانت مساحة مقطع الأوردة (2.6 cm^2) احسب مقدار القوة التي يطبقها القلب لإدخال الدم للأوردة .
- 7- ما معنى أن معامل التوتر السطحي لسائل يساوي ($74 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$) .
- 8- اشرح خطوات تجربة عملية لإثبات أن سطح السائل يعمل كغشاء مرن مشدود .
- 9- 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 90^0 بينما تكون أكبر من 90^0 في السوائل التي لا تبلل السطوح
- 11- عرف معامل اللزوجة واذكر وحدات قياسه .
- 12- احسب التوتر السطحي للماء إذا كان فرق ارتفاع الماء في أنبوبة شعرية عن خارج الأنبوبة 3 cm علماً بأن قطرها الداخلي 4 mm .
- 13- احسب ارتفاع الماء في أنبوبة شعرية قطرها الداخلي 5mm عندما غمر طرفها السفلي في إناء معامل توتره السطحي 0.0736 N/m علماً بأن تسارع الجاذبية الأرضية 9.8 m/s^2 وكثافة الماء 10^3 Kg/m^3 .
- 14- غمست أنبوبة شاقولية في حوض به زيتق فانخفض سطح الزيتق داخلها بمقدار 1.08cm . أوجد قيمة زاوية التماس إذا علمت أن كثافة الزيتق $(13.6 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3)$ 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 ، وتعدّ 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 تعوق حركة المائع ، ففي البداية سنتجاهل هذه الحقائق ، ونعد المائع مثاليًا .

2-1 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 ، وتنقسم الموائع إلى قسمين :

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

2- موائع غير قابلة للانضغاط : 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 يتألف من عدد كبير من الجزيئات ، ولذلك سنصف حركة المائع بدلالة بعض المقادير الفيزيائية الجهرية 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 مسيره 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

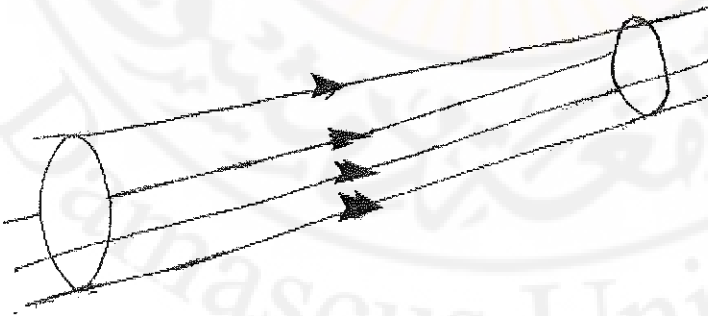
ب- الطريقة الثانية : نستخدم مفهوم خطوط الانسياب (الجريان)

3-2 الجريان الانسيابي والجريان الدوامي :

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

4-2 خط الجريان :

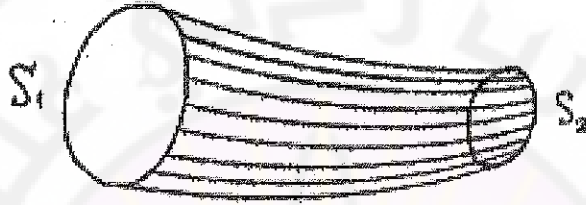
خط الجريان هو خط وهمي داخل المائع ، بحيث يعطي المماس له عند أية نقطة اتجاه الجريان . كما في الشكل (1)



الشكل (1)

2-5 أنبوبة الجريان :

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



الشكل (2)

2-6 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

2-7 معادلة الاستمرارية للجريان :

لنأخذ 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 A_2 هي V_2 .

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

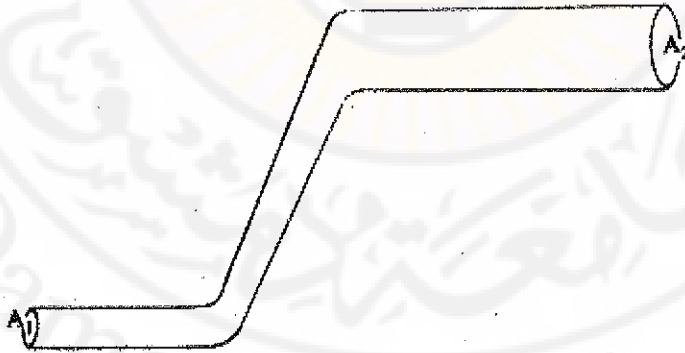
$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2-1)$$

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)

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

وحداتها في الجملّة الدولية m^3/s ، كما توجد واحدة شائعة الاستخدام وهي

$1 \text{ Liter/s} = 1000 \text{ cm}^3$ حيث



الشكل (3)

مثال (1)

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

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

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

8-2 معادلة برنولي : عم

نفترض أن هنالك مائعاً مثاليًا غير لزج ، ينساب خلال أنبوبة غير منتظمة المقطع ، شكل (4) واقع تحت تأثير قوة ثابتة ، (قوة الجاذبية الأرضية) ولتكن القوى السطحية الوحيدة التي يمكن أن تؤثر في هذا المائع ، هي قوى الضغط الناعمية . لنطبق على جريان المائع قانون إبقاء الطاقة ، وذلك بإهمال التبادل الحراري الذي يمكن أن يحصل بين جسيمات المائع والوسط الخارجي .

لتكن كثافة المائع (ρ) ، وينساب انسياباً 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 للانضغاط عند النقطة (

(a) ، يكون مقدار القوة المؤثرة في المائع $F_1 = P_1 \cdot A_1$

وهي في اتجاه انسياب 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 انسياب المائع ، ومن ثم فإن العمل الذي تبذله سالب ، وقيمه تعطى بالعلاقة :

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

$$dx_2 = v_2 dt \quad \text{حيث}$$

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

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

أما العمل الكلي الذي تنجزه هذه القوى فهو

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

بتعويض قيم W_1, W_2, W_3 من العلاقات (2-3) و (2-4) و (2-6) في العلاقة (2-7) 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 (2-8) 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 (2-9) 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 $dm = \rho A_1 V_1 dt$ نعوض 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 :

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

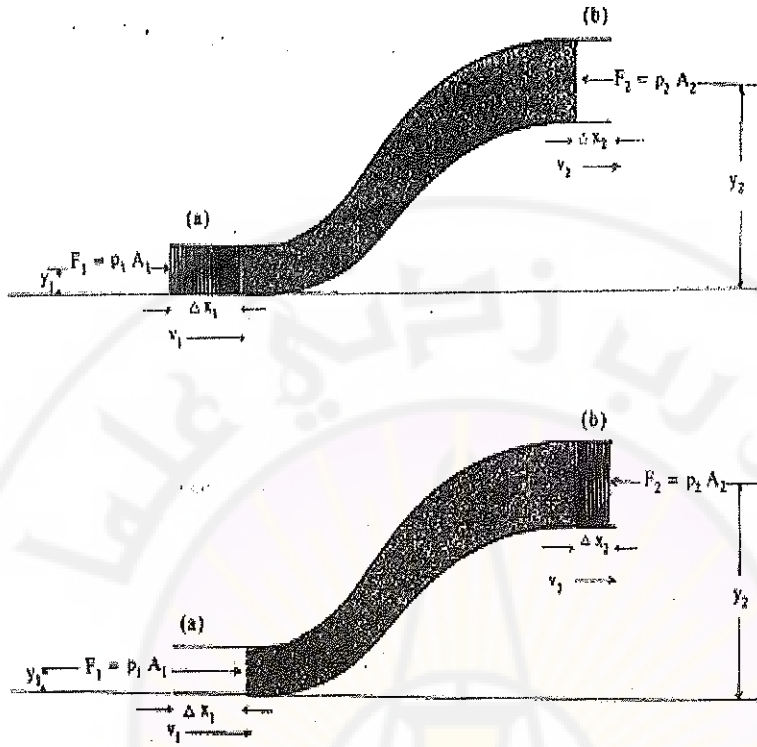
$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (2-13) \text{ وبصفة عامة}$$

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

تدعى هذه المعادلة معادلة برنولي .

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

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



الشكل (4)

9-1 تطبيقات معادلة برنولي

9-1-1 الأنبوبة ذات الاختناق :

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

برنولي

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

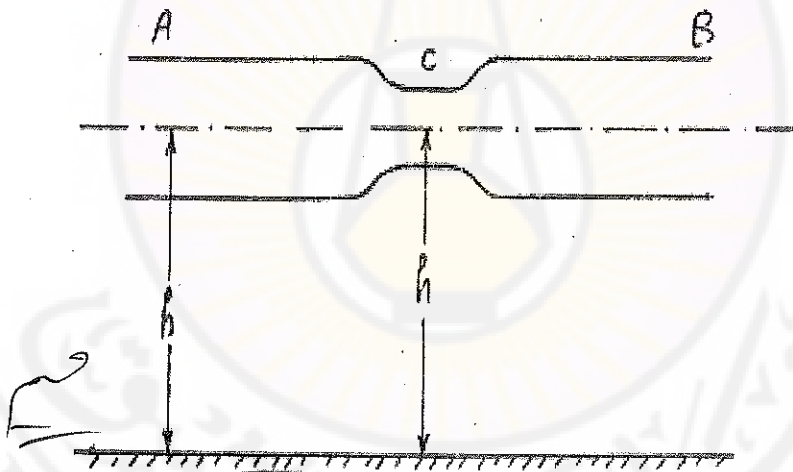
تصبح كما يلي :

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

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 الأنبوبة أفقية $y_1 = y_2$ فإن :

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



2-1-9 جهاز فاننتوري 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 :

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

و

$$s_1 V_1 = s_2 V_2$$

$$V_2 = \frac{s_1 V_1}{s_2}$$

$$\frac{1}{2} V_1^2 \left(\frac{s_1^2}{s_2^2} - 1 \right) = \frac{P_1 - P_2}{\rho}$$

$$V_1^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(\frac{s_1^2}{s_2^2} - 1 \right)} s_2^2$$

$$V_1 = s_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(s_1^2 - s_2^2)}} \quad (2-18)$$

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

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

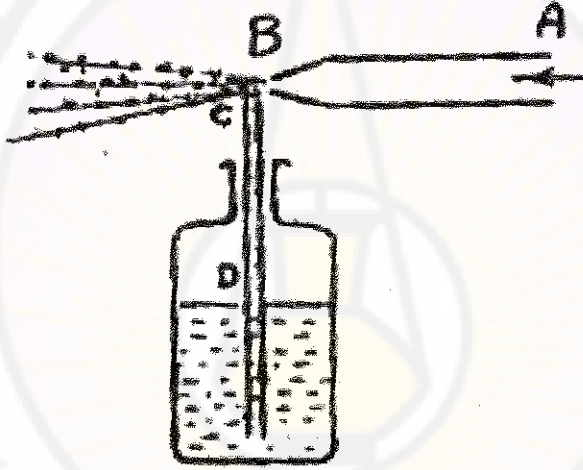
تعطي المعادلة (2-18) ، سرعة جريان المائع كما تعطي المعادلة (2-19) (، حجم المائع المار في الثانية الواحدة ، خلال أي مقطع من مقاطع الأنبوبة . يمكن حساب $P_1 - P_2$ من قراءة المانومتر .

$$p_1 - p_2 = y(\rho' - \rho)g \quad (2-20)$$

حيث ρ' كثافة السائل في المانومتر .

9-1-3 البخاخة :

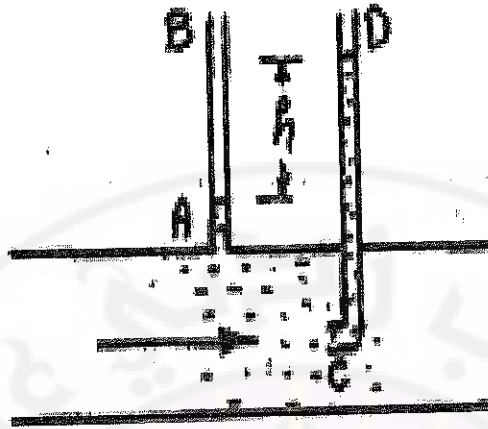
إذا نفخ هواء في الأنبوبة (AB) ، كما في الشكل (6) والتي مقطعتها عند B صغيراً ، فإن سرعة الهواء عند (B) تكون كبيرة ، ويكون الضغط منخفضاً، ومن ثم يرتفع السائل في الأنبوبة (DC) ، وينتشر عند المنطقة (B) ، على شكل قطرات صغيرة .



الشكل (6)

9-1-4 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 ، وتعدّ 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 مساوٍ لـ $h\rho g$

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

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

$$Q = s_1 V_1 = s \sqrt{2gh} \quad (2-25)$$

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

$$V_1 = C \sqrt{2gh} \quad (2-26)$$

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

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

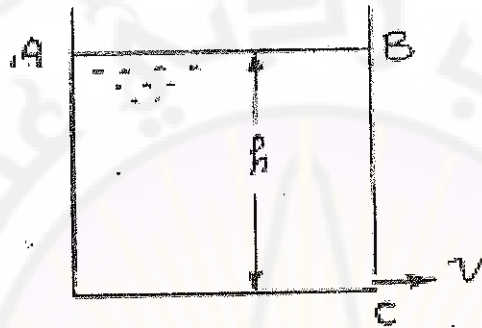
نفرض أن لدينا مستودعاً بالسائل ، وله فتحة جانبية عند (C) ، كما في الشكل (8) ، بفرض أن سرعة السائل عند (C) هي (V) . إذا كان المستودع واسعاً تكون سرعة جريان السائل عند السطح (AB) ، منعدمة تقريباً لأن مساحة السطح كبيرة ، والضغط عند (AB) = الضغط عند الفتحة (C) = الضغط الجوي وبالتعويض في معادلة برنولي ، على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

$$\frac{P}{\rho} + 0 + hg = \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} V^2 + 0$$

$$\frac{1}{2} V^2 = gh \quad (2-27)$$

$$V = \sqrt{2gh} \quad (2-28)$$

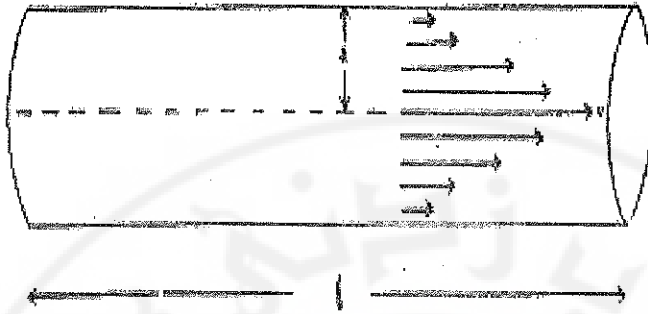
تسمى هذه المعادلة بمعادلة تورشيللي
ولكن لا يتأتى لأي سائل أن يكتسب هذه السرعة ، لأننا أهملنا لزوجة
السائل ، كما أن خطوط مجرى الجريان تضيق عند الفتحة ، ولا تكون متوازية مما
يجعل السرعة أكبر من هذا .



الشكل (8)

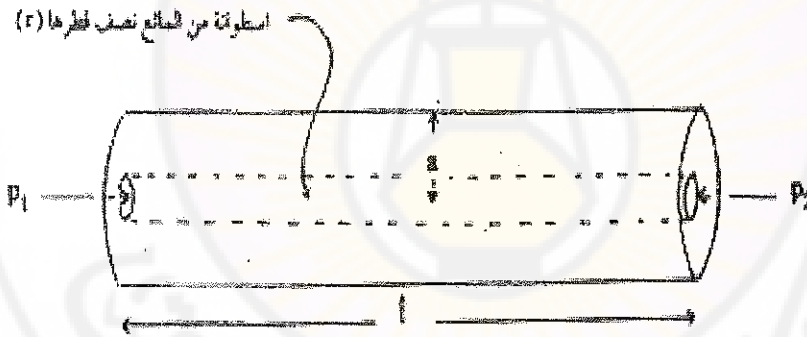
1-10 الانسياب في الأنابيب الشعرية (قانون بوازوي) :

- لحساب التدفق الحجمي في أنبوبة ، وضع بوازوي الفرضيات التالية :
- 1- أن يكون انسياب المائع ثابتاً
 - 2- أن يكون الضغط على مساحة مقطع الأنبوبة ثابتاً ، وهذا لا يحدث إلا في الأنابيب الشعرية
 - 3- طبقة المائع الملاصقة لجدار الأنبوبة تكون ساكنة ، وذلك لالتصاقها بالجدار بفعل التوتر السطحي .
- لندرس انسياب مائع لزج غير قابل للانضغاط في أنبوبة نصف قطرها (a) ، وطولها (l) ، فإن سرعة المائع المماس لجدار الأنبوبة تساوي صفراً ، 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 الأنبوبة كما في الشكل (10)



الشكل (10)

فإذا كان لدينا اسطوانة من المائع نصف قطرها (r) ، و طولها (l) ،
تتحرك داخل الأنبوبة 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 الأنبوبة ، 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 بتكامل المعادلة (2- 29) وبفرض أن $V=0$ عندما تكون $r = a$ و $V=v$ عندما $r=0$ فإننا نحصل

$$\int_0^v V dv = -\frac{(P_1 - P_2)}{2\eta l} \int_a^0 r dr \quad (2-30)$$

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

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 الأنبوبة .

وحيث أن مقدار هذه السرعة ، يقل تدريجياً حتى ينعدم عند جدار الأنبوبة ، 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 :

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

وتتمثل هذه العلاقة قانون بوازوي ، ويمكن كتابتها بالشكل :

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

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

تمثل R الممانعة لجريان المائع على غرار المقاومة الكهربائية .

مثال (3) :

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

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

الحل :

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

أو

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

مثال (4) :

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

الحل :

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

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

$$R = \frac{8(4.10^{-3} \text{ N.s/m}^2)(2.10^{-3} \text{ m})}{\pi(2.10^{-6} \text{ m})^4} = 1.274.10^{18} \text{ N.s/m}^5$$

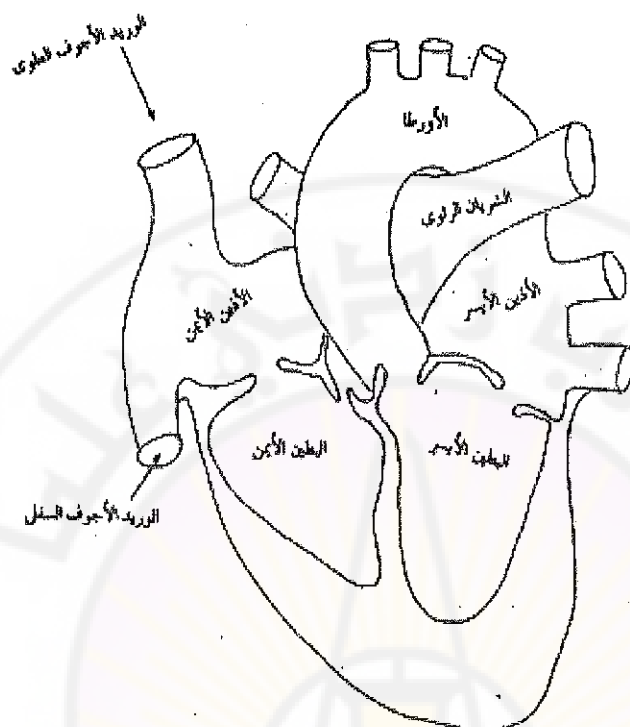
ومنها

$$Q = \frac{(4.56.10^3 \text{ N/m}^2)}{(1.274.10^{18} \text{ N.s/m}^5)} = 3.58.10^{-15} \text{ m}^3 / \text{s}$$

وإذا شَبَّهنا جريان السائل في الأنابيب بـ جريان التيار الكهربائي بالأسلاك فإن ΔP يمثل فرق الكمون ، و Q التيار ، فتكون R مقابلة للمقاومة الكهربائية وتمثل مقاومة الجريان

11-1 انسياب الدم في جسم الإنسان :

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



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

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

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

$$Q = \frac{\Delta P \pi a^4}{8\eta l} = \frac{\Delta P}{R} \quad \text{إذا رجعنا إلى قانون بوازوي}$$

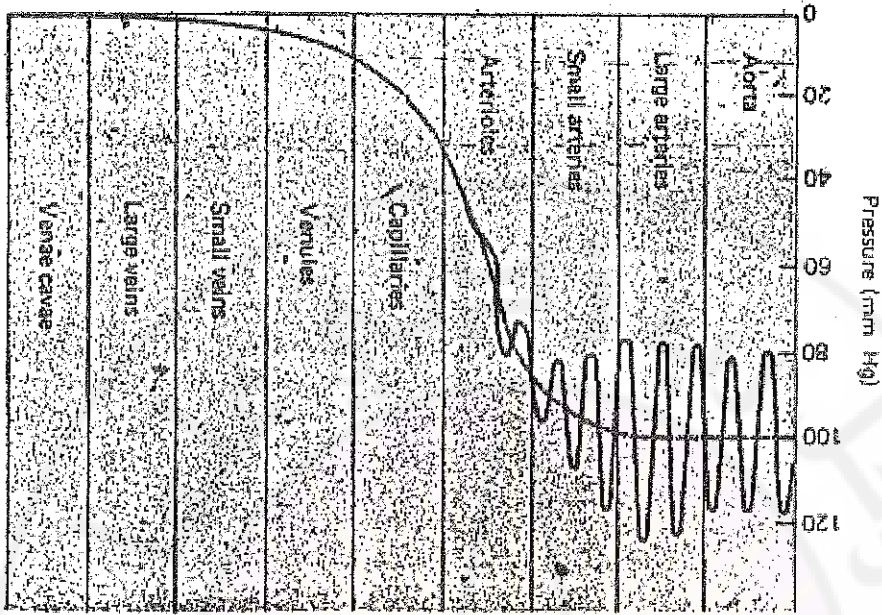
$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad \text{حيث}$$

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

$$\Delta P \propto R$$

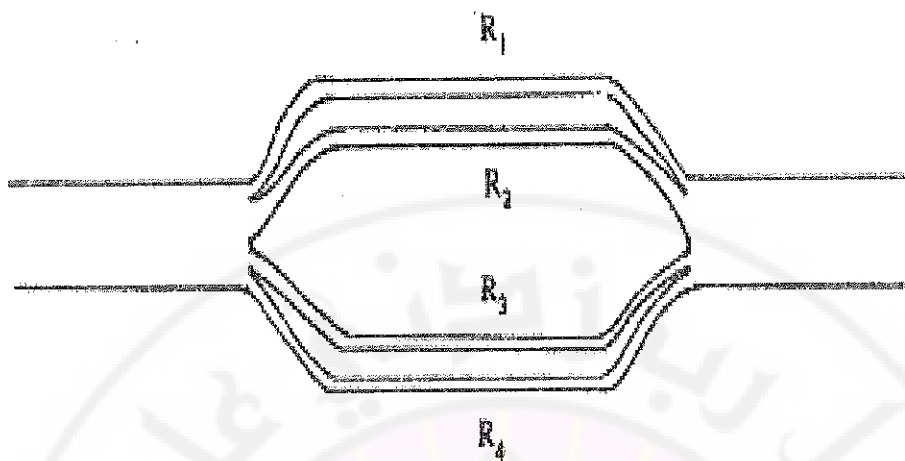
وهذا يعني أن الفرق في الضغط يتناسب عكسياً ، مع نصف القطر مرفوعاً إلى الأس (4) ، كما أنه يتناسب طردياً مع المقاومة ، ولذلك فإن الانخفاض في الضغط في كل جزء من أجزاء الدورة الدموية ، يتناسب تناسباً طردياً مع مقاومة الأوعية الدموية في ذلك الجزء .

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 الشرايين الدقيقة ، 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 لتوصيل 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 ليتر في الثانية فإذا علمت أن لزوجة الماء (0.001 pa.s) فاحسب فرق الضغط اللازم لهذا الجريان .
- 2- استنتج معادلة بوازوي 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 (1.6.10⁵ pa) ، أوجد سرعة الماء عند نقطة أخرى حيث الضغط (1.8.10⁵ pa) .
- 4- ينساب سائل كثافته النوعية (0.8) في أنبوبة غير منتظمة المقطع ، فإذا كانت مساحة مقطع الأنبوبة عند طرفها (a) هي (11 cm²) ، ومساحة المقطع عند الطرف الآخر (b) الذي ارتفاعه (3m) عن المقطع (a) هي (45cm²) ، وكان معدل الانسياب (0.09 m³/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 (3.4m/s) أوجد الفرق في الضغط بين المقطعين ، أهمل لزوجة الماء .
- 6- اشرح معادلة برنولي .
- 7- سائل ينساب بسرعة V_0 خلال أنبوبة اسطوانية 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- ينساب 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 السفلى (20 Kpa) فما هو الضغط عند النقطة العليا ؟ وكيف ستصبح قيمة الضغط عند النقطة العليا إذا أوقف سريان السائل وكانت قيمة الضغط عند النقطة السفلى (18 Kpa) .؟

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

ب- 0.80 cm

أ- 0.5 cm

10- إذا كان مقياس فانتوري يصنع اختناقاً مساحة مقطعه a_2 في أنبوبة مساحة مقطعه 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 الأنبوبة ، بعيداً عن الاختناق بدلالة البيانات السابقة .

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

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

13- ثقب مساحته 1 mm^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 بالإثناء هو 20m أعلى نقطة خروج الماء من الثقب ، ما هي كمية الماء المندفح بالثانية ؟.

14 - أنبوبة أفقية تصل بين أنبوتين أخريتين 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 المنساب خارج الأنبوبة خلال الفترة Δt ، عبر عن إجابتك بدلالة Δt , A_2 , 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 بـ $4m/s$ ، إذا كان الضغط عند النقطة السفلى $20Kpa$ كم يكون الضغط عند النقطة العليا ؟ ما الذي يؤول إليه الضغط عند النقطة العليا إذا توقف الماء عن الجريان وكان الضغط عند النقطة السفلى $18Kpa$ ؟



الفصل الثالث

المقاييس الحرارية

1-3 مفهوم درجة الحرارة :

درجة الحرارة هي العدد الذي يدلّ على مقدار سخونة الجسم أو برودته مقياساً 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 لجزيئاته طاقة داخلية نوعية كبيرة تكون درجة حرارته مرتفعة.

2-3 الطاقة الداخلية النوعية (U) للجسم :

هي متوسط الطاقة الداخلية للجزيئات التي تتضمنها وحدة الكتل .

3-3 الطاقة الداخلية للجسم :

تتكون 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 تماس جسمين أحدهما ساخن والآخر بارد ، فإن الجسم البارد ترتفع درجة حرارته ، والجسم الساخن تنخفض درجة حرارته ، فهذا يدل على أنه حصل تبادل بالطاقة الداخلية بين الجسمين ، ويتوقف هذا التبادل الحراري عندما تتساوى درجة حرارة الجسمين ، بمعنى أنه عندما يتلامس جسمان ، فإن الطاقة الداخلية تنتقل من الجسم الساخن إلى الجسم البارد ، بغض النظر عن أي الجسمين

يمتلك طاقة داخلية أكبر من الآخر ، تقاس كمية الحرارة في الجملة الدولية كالطاقة بال جول ، وتقاس بوحدة حرارية أخرى تسمى الحرارة ، وتعرف الحرارة بأنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غرام واحد من الماء النقي درجة مئوية واحدة .

السعة الحرارية

هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الجسم درجة واحدة (كلفن) ، وتقدر بوحدة جول /درجة (J/K^0).

5-3 مقياس درجة الحرارة :

لصنع مقياس لدرجة الحرارة ، يلزم اختيار خاصية من الخواص الفيزيائية ، التي تتغير بتغير 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 النقية .

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 سلم درجات الحرارة

في هذا السلم النقطتان الثابتتان هما درجة انصهار الجليد ، وهي النقطة السفلى ($0^0 C$) ، ودرجة غليان الماء في الضغط الجوي العادي ، وهي النقطة العليا وأعطيت القيمة $100^0 C$ ، وقسم التدرج بين هاتين النقطتين إلى 100 قسم متساوي ، وأطلق على كل منها درجة مئوية (درجة سلزيوس C^0) ، ويرمز لدرجة

الحرارة المقاسة على هذا السلم بالرمز t_c ، ويسمى هذا السلم أحياناً بسلم سلزيوس نسبة إلى الفلكي السويصري 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 $(273.15^{\circ}K)$ والعلاقة بين مقياس كلفن ، والسلم المئوي يمكن أن تكتب كالتالي :

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

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 السلطان 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

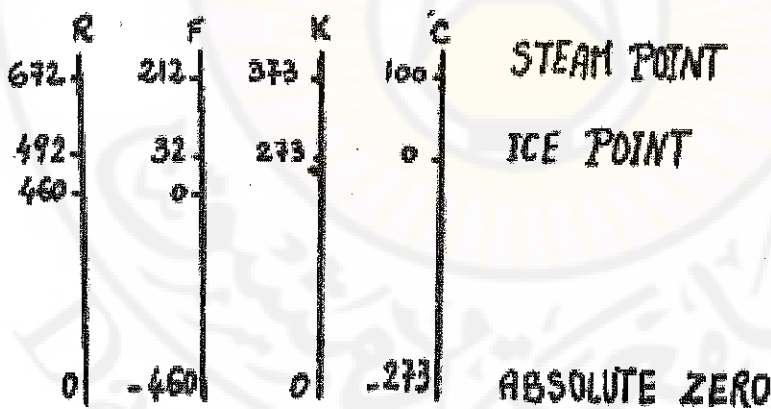
كلفن ، وعلى ذلك فإن وحدة درجة الحرارة على مقياس الديناميكا الحرارية (مقياس كلفن) تساوي $1/273.15$ من درجة حرارة النقطة الثلاثية للماء على نفس المقياس ويرمز لها بالرمز (K) .

أما صفر السلم المطلق فيقع على سلم فهرنهايت عند ($-459.67^{\circ} F$) ، وتعرف درجة الحرارة المطلقة الفهرنهایتية بالمعادلة :

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

ويسمى هذا السلم بسلم رانكين ، نسبة إلى علاقة العالم رانكين ويقسم سلم رانكين بنفس الكيفية التي يقسم بها السلم الفهرنهایتية ، وتكون العلاقة بين سلم رانكين وسلم كلفن كالآتي :

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

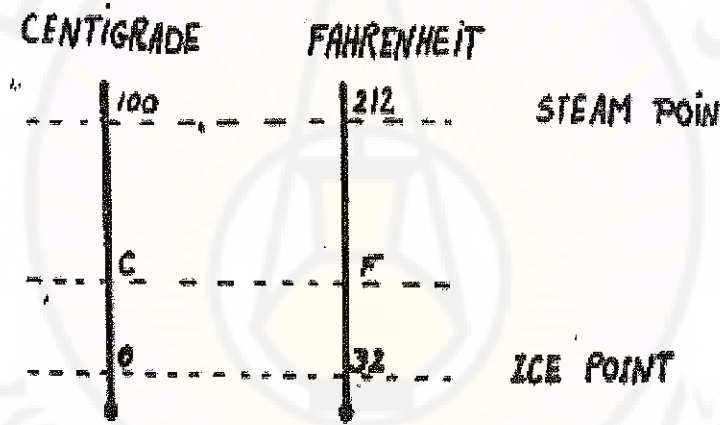


الشكل (1) .

8-3 العلاقة بين سلالم درجات الحرارة :

نفرض أن درجة حرارة جسم ما ، مقاساً على السلمين المئوي والفهرنهايتي ، الشكل (2) ، هي (F , C) على الترتيب ، فتكون التدرجات بين سطح الزئبق والنقطة السفلى (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 الفهرنهايت إلى الدرجة المئوية :

أ) 97.8 F°

ب) 0 F°

ج) -34 F°

الحل

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

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

$$t_c = 36.55 \quad C^0$$

(ب)

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

$$t_c = \frac{5}{9}(-34 - 32) = -36.66 \quad C^0 \quad (جـ)$$

مثال (2)

حول درجات الحرارة التالية من التدرج المئوي إلى التدرج الفهرنهايتي :

$$-243 C^0 \quad (جـ)$$

$$-4 C^0 \quad (ب)$$

$$30 C^0 \quad (أ)$$

الحل

$$t_F = \frac{9}{5}t_C + 32 \quad (أ)$$

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

$$= 86 F^0$$

$$t_F = \frac{9}{5}(-4) + 32 \quad (ب)$$

$$= 24.8 \quad F^0$$

جـ)

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

مثال (3)

حول درجات الحرارة التالية إلى سلم كلفن

أ) (26°C) ب) (-53°C) جـ) (60°C)

الحل

أ)

$$t_K = t_C + 273.15$$

$$t_K = 26 + 273.15$$

$$t_K = 299.15 \text{ } ^\circ\text{K}$$

ب)

$$t_K = -53 + 273.15$$

$$t_K = 220.15 \text{ } ^\circ\text{K}$$

جـ)

$$t_K = 60 + 273.15$$

$$= 333.15 \text{ } ^\circ\text{K}$$

9-3 التعبير الرياضي للسلم الحراري:

إذا رمزنا إلى أي خاصية من الخواص الطبيعية التي تتغير بتغير درجة الحرارة بالرمز (X) ، وكانت (x_0, x_{100}, x_t) ، 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 سلسيوس 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 الفهرنهايتي فإن:

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

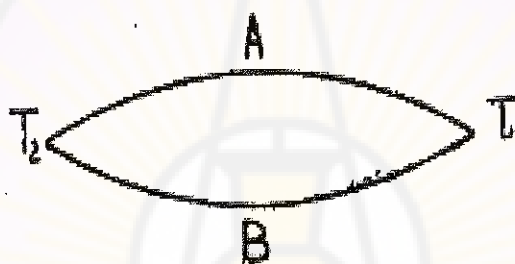
$$t = \frac{X_t - X_{32}}{X_{212} - X_{32}} \cdot 180 + 32 \text{ F}^0$$

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 قيس على سلم خاصية أخرى .

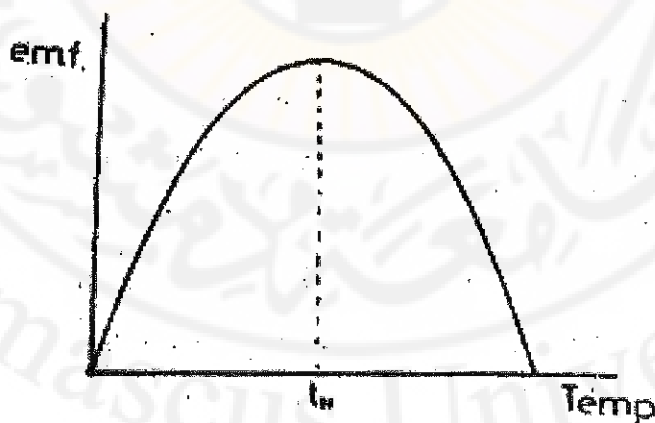
10-3 ميزان الازدواج الحراري

اكتشف سيبيك في عام 1821م التأثير الكهروحراري وذلك بتوصيل سلكين من معدنين مختلفين مع بعضهما عند نهايتهما فإذا كانت إحدى النهايتين ساخنة ، والأخرى باردة شكل (3) فإن قوة محرّكة 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 درجتى حرارة النهايتين ، ويمكن قياس القوة المحركة الكهربائية الناتجة بقطع أحد السلكين ، وتوصيله بمقياس فولط مناسب ، ولقياس درجة الحرارة بهذا الميزان، يدرج الميزان أولاً بوضع إحدى النهايتين في جليد مجروش 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 .



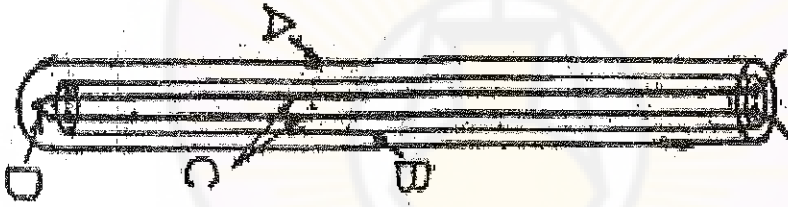
الشكل (3)



الشكل (4)

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

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



الشكل (5)

لقياس درجات الحرارة حتى (300°C) يستخدم ازدواج حراري مكون من
سلكين ، أحدهما من النحاس ، أو الحديد والآخر من الكونستنتان (الكونستنتان
عبارة عن سبيكة من النحاس والنيكل) ، يعطى مثل هذا الازدواج 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 تعيينها بقياس القوة المحركة الكهربائية ، عند وضع النهاية الساخنة في ثلاث درجات حرارة معلومة 100 C^0 و 200 C^0 و 300 C^0 ، على التوالي ، فتكون دقة القياس في المدى المذكور هي 0.2 C^0 كما يمكن استخدام نفس الازدواج في المدى من 190 C^0 - إلى 0 C^0 ، بنفس المعادلة ، ولكن بثوابت جديدة يمكن تعيينها باستخدام درجات حرارة منخفضة معلومة ، ولا يحسن استخدام هذا الازدواج في درجات حرارة أعلى من 330 C^0 حيث يتأكسد النحاس في هذه الحالة ، وتتغير أبعاد الأسلاك مما يترتب عليه خطأ ، وباستخدام أسلاك غليظة من الحديد و الكونستانتان أمكن استخدام الازدواج الحراري للأغراض الصناعية لقياس درجات حرارة تقرب من 750 C^0 ، ولقياس درجات حرارة تصل إلى 1100 C^0 يمكن استخدام ازدواج حراري مكون من سلكين أحدهما من سبيكة من النيكل والكروم والآخر من سبيكة من النيكل والألمنيوم ، ولدرجات حرارة تصل إلى 1500 C^0 يستخدم سلكان أحدهما من البلاتين والآخر من سبيكة من البلاتين و الروديوم ، وتستخدم المعادلة :

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

في المدى من 630 C^0 إلى 1063 C^0 . (a ,b ,c) ، ثوابت يمكن تعيينها بتعيين (e) في درجات انصهار الأنتميون والفضة والذهب ، يكون الازدواج في هذه الحالة ازدواجاً عيارياً ،الجدول (1)

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

جدول (1)

بلاتين بلاتين روديوم	نيكل كروم نيكل ألومنيوم	التحاس والكنستانان	درجة الحرارة
٠.٠٦٤ ملى فولت	٤.٠١ ملى فولت	٤ ملى فولت	١٠٠°م
١.٠٤٤ " "	٨.٠١ " "	٩ " "	٢٠٠
٢.٠٣٢ " "	١٢.٠٢ " "	١٥ " "	٣٠٠
٣.٠٢٥ " "	١٦.٠٣ " "	—	٤٠٠
٥.٠٢٢ " "	٢٤.٠٩ " "	—	٦٠٠
٧.٠٢٣ " "	٣٢.٠٣ " "	—	٨٠٠
٩.٠٥٧ " "	٤١.٠٣ " "	—	١٠٠٠
١٥.٠٥٠ " "	—	—	١٥٠٠

بالنسبة للازدواج 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 الازدواج هو (1.3mm) ، وسمك غلاف السيليكا عليه (0.5mm) فإن زمن القراءة لا يزيد عن ثلاث ثوان ، ويجب أن يستبدل الغلاف بغلاف جديد بعد كل قراءة ، وأن يستبدل الازدواج نفسه بازدواج جديد بعد كل 12 قراءة .

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

عند الالتصاق البارد يمر التيار الكهربائي في دائرة الازدواج من أحد السلكين إلى السلك الآخر ، وقد اصطلح على اعتبار السلك الذي يمر منه التيار موجب والذي يمر إليه التيار سالباً ، وهناك مجموعتان من الأسلاك الشائع 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

أقصى درجة حرارة	السالب	السلك الموجب
1400°C	بلاتين	سبيكة من : بلاتين 90% روديوم 10%
1400°C	بلاتين	سبيكة من : بلاتين 87% روديوم 13%
1700°C	سبيكة من : بلاتين 80% روديوم 20%	سبيكة من : بلاتين 95% روديوم 5%
1900°C	سبيكة من : بلاتين 70% روديوم 30%	سبيكة من : بلاتين 80% روديوم 20%

مجموعة معادن الأساس

أقصى درجة حرارة	السلك السالب	السلك الموجب
400°C	كنستنتان سبيكة من : نيكل 40% نحاس أحمر 60%	نحاس أحمر Copper
850°C	كنستنتان	حديد
1100°C	(ألوميل) Alumel سبيكة من : نيكل 94% الومنيوم 2% سليكون 4% منجنيز 4%	(كروميل) Chromel سبيكة من : نيكل 90% كروم 10%

مثال :

وضع الالتصاق الساخن لإزدواج حراري من الحديد والكونستنتان في درجة مجهولة والبارد في الدرجة 20°C وقيست القوة المحركة الكهربائية المتولدة فوجد أنها (-4.09mV) أوجد الدرجة المجهولة .

الحل

من جدول المعايرة للإزدواج المستخدم نجد أن :

القوة المحركة الكهربائية (E_2) المتولدة 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 $97\text{ }^{\circ}\text{C}$

11-3 ميزان الحرارة البلاتيني :

يتكون ميزان الحرارة شكل (6) ، من سلك رفيع من البلاتين النقي (R) ،

يلف حول إطار من الميكا العازلة ، بحيث لا تتولد فيه تيارات تحريضية، عند

مرور التيار الكهربائي ، وذلك بأن يثنى السلك على نفسه قبل أن يلف ، يتصل

الملف بسلكين من البلاتين الغليظ (C_2) ، ويوضع في أنبوبة من الخزف ، أو

السيرليكا المنصهرة ، وأن يعزل سلكا التوصيل أحدهما عن الآخر بمرورها خلال

ثقوب في أقراص من الميكا داخل الأنبوبة ، لتلافي مقاومة سلكي توصيل الملف ،

يوجد داخل الأنبوبة (A) ، سلكان متشابهان (C_1) ، متصلان مع بعضهما من

أسفل ويسميان بأسلاك التعادل ، ويتصلان على التوالي مع قنطرة واطسون

المعدلة شكل (7) ، وتسمى قنطرة كالندر ، وجريفت وفيها (P) و (Q)

مقاومتان ثابتتان ، وكل منها يساوي 10 أوم ، (X) مقاومة متغيرة معلومة القيم

(صندوق مقاومات) ، (L_1, L_2) سلك منتظم المقطع مقاومة السنتيمتر الطولي

منه معلومة ، ولتكن ρ . لإيجاد مقاومة الملف البلاتيني ، تعدل قيمة (x) ،

ويحرك زالق الغلفانومتر على السلك حتى يرجع مؤشر الغلفانومتر إلى موضع

الصفر ، أي حتى لا يحدث انحراف فيه ، وعلى ذلك فإن :

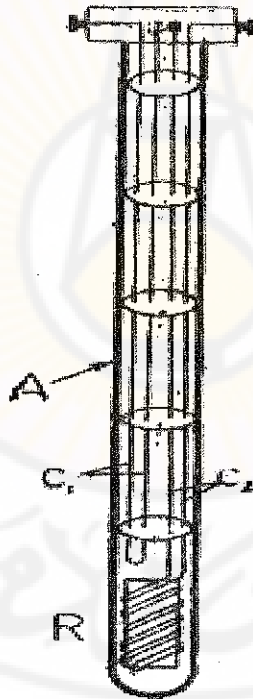
$$\frac{P}{Q} = \frac{X + C_1 + \rho L_1}{\rho L_1 + C_2 + R_t}$$

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

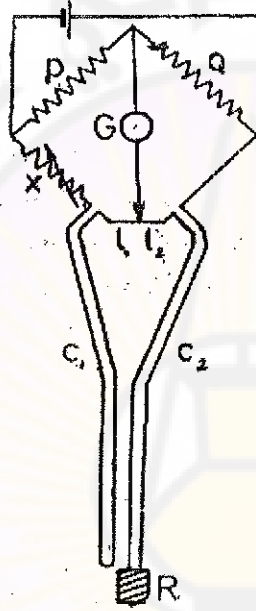
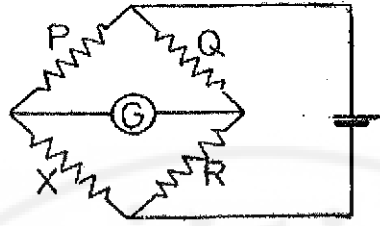
$$C_1 = C_2$$

$$Q = P$$

$$R_t = X + \rho(L_1 - L_2) \quad (3-6)$$



الشكل (6)



الشكل (7) جسر واطسطن المعدل

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

12-3 الترمومترات الغازية

تمتاز هذه الموازين الحرارية بالميزات التالية:

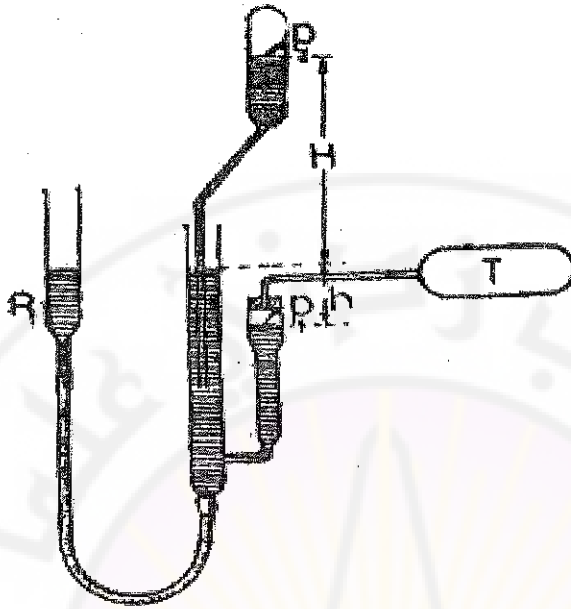
- 1- تعد الغازات مثالية فهي لا تتحول إلى سائل بسهولة .
- 2- يمكن الحصول على الغازات في درجة عالية من النقاوة .

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

13-3 اميزان 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 زئبق عن طريق أنبوبة مرنة ، بحيث يمكن رفع المستودع أو خفضه ، ينكس في الطرف المفتوح من المانومتر أنبوبة بارومترية لقياس الضغط الجوي .

نضع (T) في جليد مجروش ، و نرفع المستودع (R) ، أو نخفضه حتى يلامس سطح الزئبق السن العاجي (P_1) ، و نرفع الأنبوبة البارومترية ونخفضها حتى يلامس سطح الزئبق 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 السنين (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 :

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

14-3 ميزان الحرارة الإشعاعي (البيرومتر الضوئي) :

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

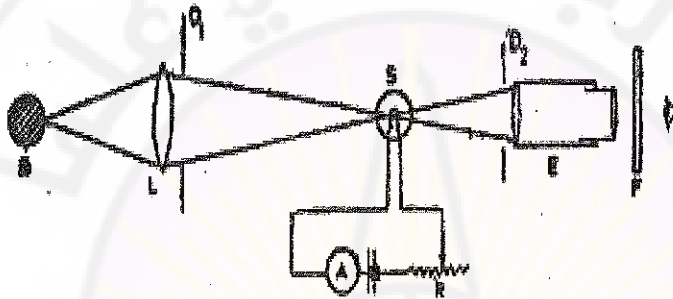
$$E_\lambda = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda t}} \quad (3-8)$$

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 تضاء 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 جساً 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 تختفي الفتيلة في ضوء الخيال ، عند ذلك تؤخذ قراءة الأمبير ، ولتدريج البيرومتر تستخدم مصادر حرارية معلومة القيم حتى درجة $1063C^0$ يرسم منحني بياني بين درجة الحرارة ، وقراءة الأمبير لقياس درجات حرارة أعلى من $1063C^0$ ، يستخدم قاطع الإشعاع ، بالطريقة نفسها المستخدمة في البيرومتر السابق فإذا كانت (T) هي درجة حرارة المصدر ، T' درجة الحرارة كما يقرأها البيرومتر من المنحني 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 (9)

مسائل الفصل الثالث

1- عرف ما يلي :

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

2- اشرح كيف يمكن صنع مقياس ترمومتري - ثم اشرح نوعين من التداريج لهذا المقياس .

3- اشرح موضعاً بالرسم الترمومتري الغازي ذو الحجم الثابت

4- اشرح موضعاً بالرسم الترمومتر البلاتيني

5- ما هو الازدواج الحراري - وكيف يمكن استخدامه كمقياس ترمومتري وما هي أهم مميزاته .

6- عدد مميزات الترمومترات الغازية .

7- حول درجات الحرارة التالية إلى سلم كلفن :

(1) (-60°F) (ب) (220°F) (ج) (-20°F)

8- حول درجات الحرارة التالية من الفهرنهايت إلى الدرجة المئوية

(1) (90°F) (ب) (10°F) (ج) (-50°F)

9- حول درجات الحرارة التالية من التدرج المئوي إلى التدرج الفهرنهايتي

(1) (20°C) (ب) (-6°C) (ج) (-200°C)

10- إذا كانت درجة الحرارة التي ينصهر عندها الذهب هي 1064°C ودرجة

غليانه 3080°C حول هذه الدرجات المئوية إلى الفهرنهايت

11- إذا كان طولاً عمود الزئبق في ساق ترمومتر عند درجة تجمد الماء ودرجة

غليانه على الترتيب هما 15 cm و 25 cm 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 ف سجل الترمومتر مقاومة مقدارها 6.78 أوم ، أوجد درجة حرارة الوسط ؟.

15- ما هي درجة الحرارة التي يكون لمقياس سلسيوس و فهرنهايت عندها القيمة العددية نفسها.

15- حول كلاً مما يلي إلى سلم فهرنهايت و رانكين

(1) (30°C) (ب) (5°C) (جـ) (-20°C)

مع
الحوار
دروس
الحوار
اصناف

الفصل الرابع

انتقال الحرارة

1-4 طرق انتقال الحرارة :

تنتقل 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 ، نكتسب الجزيئات في هذا الطرف طاقة وتزداد سعة اهتزازها حول مواضعها المتوسطة ، فتتصادم مع جارئاتها من الجزيئات ، وتكسبها طاقة تجعلها تهتز بسعة أكبر مما كانت عليه ، وتتصادم هذه الجزيئات مع ما يجاورها من الجزيئات الأخرى تكسبها 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 الحرة داخل المعدن .

أما انتقال الحرارة بالحمل فهو يحدث عن طريق حركة الجزيئات داخل المادة حاملة الطاقة الحرارية معها ، وتتصادم هذه الجزيئات مع الجزيئات الباردة تكسبها طاقة أكثر مما كانت عليه ، وهكذا فمثلاً إذا سخنا سائلاً في إناء مثلاً فإن جزيئات السائل الملاصقة للقاع تسخن أولاً ، وتقل كثافتها أكثر فتصعد إلى أعلى ، أما الجزيئات الباردة فتكون كثافتها أكبر فتتخفض إلى أسفل وتسخن بدورها ،

وهكذا تتكون 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 بطيئاً بالنسبة لانتقال الحرارة بالإشعاع ، لأن سرعة الإشعاع هي سرعة الضوء .

2-4 انتقال الحرارة بالتوصيل :

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

تنتقل 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 $(\theta_1 - \theta_2)$ ، وعكساً مع السماكة (d) .

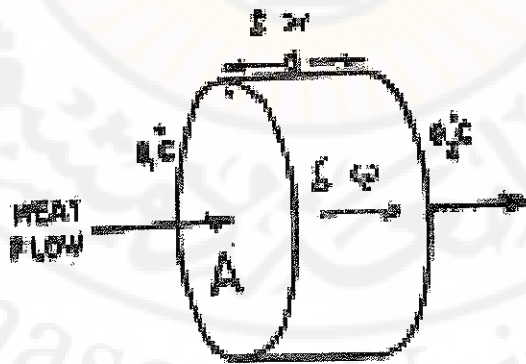
$$Q = KA \frac{\theta_1 - \theta_2}{d} t \quad (4-1)$$

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

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

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

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 أسطوانية منتظمة المقطع ، ومساحة مقطعها A ، وأن درجتي حرارة طرفيها ، بعد الحالة الثابتة هما (θ_1, θ_2) ، حيث $(\theta_1 > \theta_2)$ ، (الشكل 2) في الحالة الثابتة $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ 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 :

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

بتكامل المعادلة (4-3) نحصل على

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

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

عند

$$x = 0$$

$$\theta = \theta_1$$

$$\theta_1 = b$$

إذن

$$\theta = ax + \theta_1$$

ومنها

$$\text{وعندما } x = L \text{ فإن } \theta = \theta_2 \text{ ومنها}$$

$$\theta_2 = aL + \theta_1$$

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

ونأخذ المعادلة (4-5) الشكل :

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

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

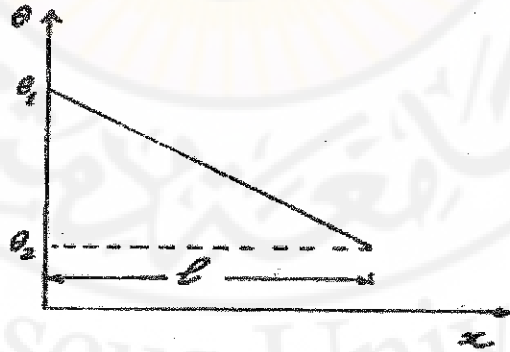
$$\frac{d\theta}{dx} = - \frac{\theta_1 - \theta_2}{L} \quad (4-7)$$

بالتعويض من (4-7) في معادلة فورير لانتقال الحرارة :

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



الشكل (2)



الشكل (3)

ب- انتقال الحرارة خلال جدار مستو مكون من طبقتين مختلفتين النخانة والمادة (الشكل 3) في الحالة المستقرة، تنتقل بفرض أن (d_1) نخانة الطبقة الأولى)، (K_1) معامل التوصيل الحراري لمادتها ، (d_2) ، هو نخانة الطبقة الثانية ، (K_2) (معامل التوصيل الحراري لمادتها ، θ_1 درجة حرارة الطبقة الأولى ، θ_2 درجة حرارة الطبقة الثانية ، (A) مساحة السطح الحرارة بمعدل ثابت خلال الطبقات .

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

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

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

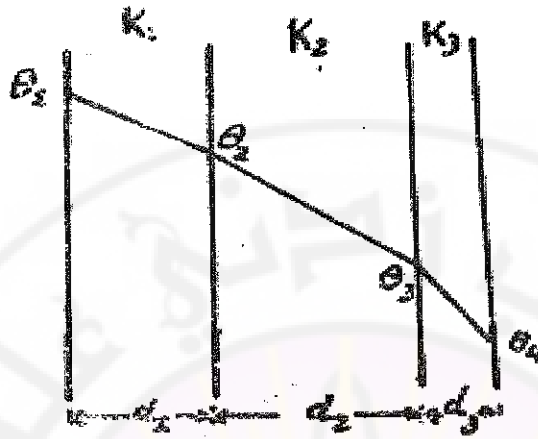
وبالجمع

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

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

هذه المعادلة شبيهة بمعادلة قانون أوم في الكهرباء ، حيث $\frac{dQ}{dt}$ تقابل شدة

التيار و ($\theta_1 - \theta_3$) تقابل فرق الجهد ، و ($\frac{1}{K}$) ، تقابل المقاومة النوعية .



الشكل (4)

ج- 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 $\theta_1 > \theta_2$ ، بافتراض عنصر كروي من جدار الكرة نصف قطره r وثخائته dr ، بتطبيق قانون فورييه على هذا العنصر يكون:

$$\frac{dQ}{dt} = -K4\pi r^2 \frac{d\theta}{dr}$$

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

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

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

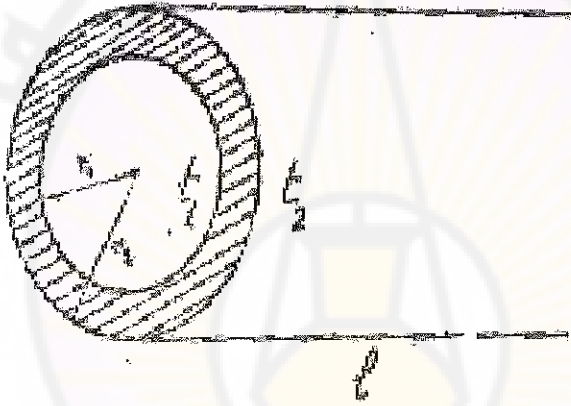
$$\theta_2 - \theta_1 = -a \left[\frac{1}{r} \right]_{r_1}^{r_2}$$

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

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_2, t_1) ، هما درجتا حرارة السطحين الداخلي والخارجي للجدار ، بعد الحالة الثابتة وأن (r_2, r_1) ، هما نصف القطرين ، (L) طول الأنبوبة ، 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

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

فتكون 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 الأنبوبة .

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

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

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

فتكون كمية الحرارة التي اكتسبها الماء في الثانية الواحدة

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

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

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

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

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

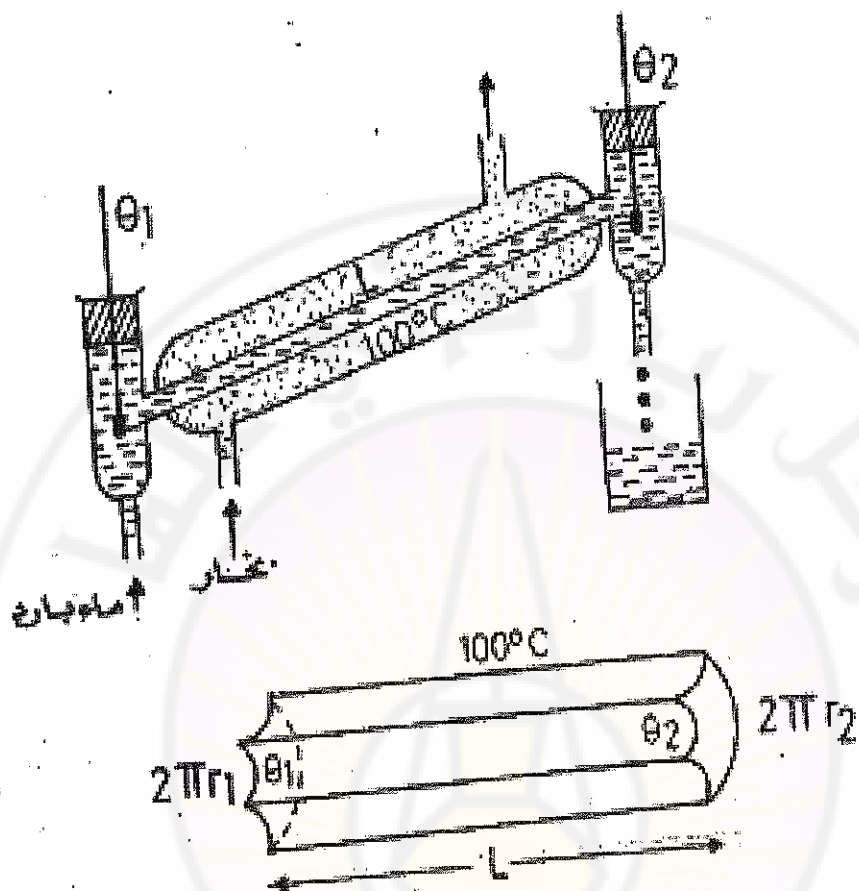
حيث (L) طول الأنبوبة (الجزء الموجود داخل الغلاف)

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

ومن المعادلتين (4-11) و (4-12) نجد

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

ومنها يمكن إيجاد قيمة (K)



الشكل (6) .

جدول (1)

معامل التوصيل الحراري لبعض المواد في درجة الحرارة العادية

المادة	$\frac{K}{Wm^{-1} K^{-1}}$	المادة	$\frac{K}{Wm^{-1} K^{-1}}$
النقطة	٤٠٥٠٤٦	الطوب الحراري	٠.٥٠
الذهب	٢٩٢٣٦	المطاط	٠.١٨٨
النحاس	٣٨٤٠٥٦	الزجاج	٠.٨٣٦
الألمنيوم	٢٠٩	الفلين	٠.١٨
الرصاص	٢٣٠٤٤	الماء	٢.٠٩
الحديد	٧٣٠٥٦	الجليد	٠.٥٨٥
البلاستيك	٦٩٠٣٩	الهواء	٠.٢٤١

4- الحمل الحراري

تنتقل الحرارة بواسطة الحمل الحراري عن طريق حركة الجزيئات نفسها من المواقع الساخنة إلى المواقع الباردة حاملة الطاقة معها ، وبتصادم هذه الجزيئات مع الجزيئات الأخرى ، تنتشر الحرارة خلال المادة ولا يحدث هذا إلا في الموائع ، 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 تفرغ حركة 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 نقابله في حركتها بالنسبة إلى بعضها بعضاً ، ويلاحظ وجود طبقة رقيقة من السائل ساكنة ملاصقة 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 ملاصقة للجدار ، ولكن ثخانتها تكون أقل من ثخانة الطبقة المناظرة في حالة الحركة الطبقية .

يتم انتقال الحرارة بالحمل بطريق التوصيل الحراري أولاً من السطح الساخن إلى السائل خلال الطبقة الساكنة الملاصقة 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 الملاصقة 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 برودة جسم (أي النقص الحادث في كمية حرارته في وحدة الزمن) ، يتناسب 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 K ثابت يتوقف 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 كالآتي :

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

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 نمَد 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 تعيين 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 تمثلها النقطة (D) ، ومن قانون نيوتن للتبريد :

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

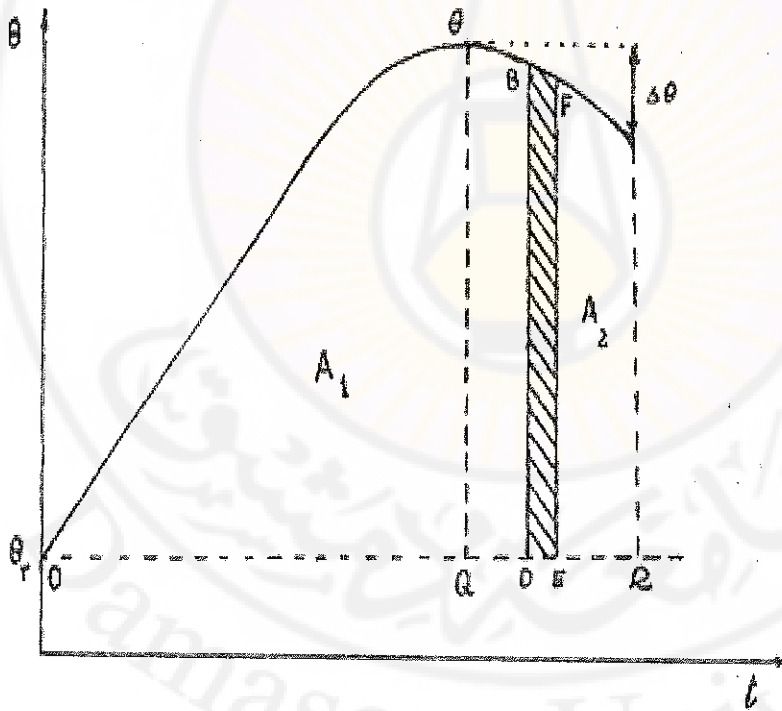
$$d\theta = -K' .BD .dt$$

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

أي أن انخفاض درجة الحرارة الناتج عن التبريد في الفترة ΔE (أي dt) ،
 يتناسب مع المساحة ($BDEF$) ، وبالتكامل 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 تمتص ، وبالتالي فإن طاقة حرارية تنقل إلى الجسم الماص .

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 الاشعاع 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 أثبتت التجارب المخبرية أن معدل طاقة الاشعاع الصادرة من سطح تتناسب أيضاً مع مساحته A كما أنها تعتمد على طبيعة السطح حيث يعبر عن هذه الحقيقة بثابت ليس له أبعاد ، وهو (ε) وقيمه تكون بين الصفر والواحد ونستطيع أن نلخص ما سبق في معادلة تعبر عن معدل طاقة الإشعاع الصادر وهي

$$R_e = \sigma \varepsilon A T_c^4$$

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

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

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

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

الجسم الذي له إصدار عال 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_c) قرب حائط -مثلاً- في درجة حرارة (T_a) فإنه سيمتص الإشعاع الصادر عن الحائط بمعدل :

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

فإذا كانت درجة الحرارة أعلى من درجة حرارة الحائط ، أي أن ($T_c > T_a$) ، فإن معدل الإشعاع الصافي الصادر عن الجسم يكون

$$\begin{aligned} R &= R_c - R_a \\ R &= \sigma \varepsilon A (T_c^4 - T_a^4) \end{aligned} \quad (4-18)$$

أما إذا كان الجسم أبرد من الحائط أي ($T_c < T_a$) ، 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 تمتصه 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

4-8 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 . وسمي 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

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

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 :

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

10-4 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 ، وسخنت الكرة الداخلية كهربائياً بمعدل قدره (10 W) فإن فرقاً في درجة الحرارة قدره (55 K⁰) ينشأ بين سطحي الكرتين ، فما هو معامل التوصيل الحراري للمادة العازلة .

الحل

كمية الحرارة التي تنتقل في الثانية الواحدة بين كرتين متحدتين بالمركز في الحالة الثابتة هي :

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

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

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

$$K = 0,14$$

مثال (2) :

أنبوبة طولها (3m) ونصف قطرها الخارجي ($15 \cdot 10^{-3}$ m) غطيت بطبقة من عازل سمكها ($24 \cdot 10^{-3}$ m) وكانت درجة حرارة السطح الخارجي للعازل ($588K^0$) وكانت درجة حرارة الهواء المحيط ($295K^0$) ، فما هو معدل فقدان الحرارة بالإشعاع من الأنبوبة $\varepsilon = 0.94$

الحل

$$\text{مساحة السطح الخارجي للعازل} = 2\pi(15 \cdot 10^{-3} + 24 \cdot 10^{-3})3 = 0.164m^2$$

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

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

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

4-11 درجة حرارة سطح الشمس :

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

إذا كانت (R) نصف قطر الشمس ، (T) درجة الحرارة المطلقة لسطحها ، فإن الطاقة الحرارية التي يفقدها السطح في الثانية هي $4\pi R^2 \sigma T^4$ 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 :

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

وتسمى (S) ، بالثابت الشمسي ويمكن قياسه بتجميع أشعة الشمس داخل غلاف أسود من ثقب صغير في الغلاف ، ومعلوم مساحته ، نقاس كمية الحرارة المكتسبة بوضع هذا الغلاف في مسعر 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

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

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

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

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

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

هذه النتيجة أقل من الحقيقة لأن الشمس لاتشع 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 تمكن 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 $4.6.10^{23}$ حصان في الثانية .

يمكن حساب درجة حرارة الشمسي باستخدام معادلة (فين)

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

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

$$49.10^{-8} \text{ m} \cdot T = 0.00293$$

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

وبلاحظ 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 وثابتة ، وذلك عن طريق تنظيمها للطاقة الإستقلابية التي تنتجها ، 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 أعضائه 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 وللحفاظ على درجة حرارة ثابتة ، فإن الجسم يستخدم آلياته المتنوعة ليعوض الحرارة المفقودة ، فعندما تكون درجة حرارة البيئة عاليةً ، أو يكون معدل الإستقلاب عالياً ، فإن الجسم يعوض ذلك بزيادة كمية الحرارة المفقودة وذلك عن طريق توسيع الأوعية الدموية ، وتبخير العرق من على سطح الجسم ، أما عندما تكون درجة الحرارة منخفضة ، فإن الجسم يعمل على تقليل كمية الدم المتدفقة 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 - توسع الأوردة والشرابين والتعرق وخفض إنتاج الطاقة الحرارية ، والتغير في

السلوك ، مثل شرب الماء والتخفيف من الملابس ، أو التحرك إلى مكان بارد - في خفضها ، 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 تتحكم 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 وتسبب 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 برودة الجسم الشديد ، يجب أولاً تدفئة قلب الجسم قبل الأطراف ، وتتمثل أعراض البرودة الشديدة في الارتعاش غير المنتظم ، وفقد الذاكرة ، وعدم القدرة على التوازن ، والكلام غير المفهوم والخمول ، والتعب الشديد .

4-13 العلاج الحراري :

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

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

ورفع درجة حرارة المحيط (الوسط) المحصور في مجال سقوطها فقط ، - ويشيع طبياً- 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 تنحصر في إشارة جزيئات الماء- كما في أفران الميكروويف - باختيار التردد المناسب لهذه الموجات ليتطابق مع الطاقة اللازمة لإثارة جزيء الماء في الوسط ، وبالتالي تتم عملية الامتصاص بحدها الأقصى لإحداث عملية التسخين ، ومن أهم المجالات الطبية والحيوية للموجات الدقيقة ما يلي :

1- العلاج الطبيعي :

تعتمد تقنية العلاج الطبيعي بالموجات الدقيقة والموجات الراديوية ، على الاستفادة من خاصية التسخين المرافقة 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 .

2- 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 تعقيم 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 بالهايبرثيرميا ، 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 بالميكروويف.

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 $(65 - C^0)$ ، 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 طويلاً ، أي أنها تنتشر في نفس اتجاه زيادة ونقص الضغط .

تتميز الموجات الصوتية كغيرها من الموجات ، بخواص محددة مثل الطول الموجي (λ) وعدد مرات ذبذبتها في الثانية ، وهو ما يطلق عليه التردد (f) الذي يقاس بوحدة الهرتز HZ (ذبذبة 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 ترددها على 20 ألف هرتز ، وتتميز هذه الموجات بأن ترددها أكثر من المدى المسموع بواسطة الأذن ، ولذلك لا نستطيع استقبالها ، و يطلق على هذا النوع تجاوزاً الموجات فوق الصوتية ، وهو خطأ شائع

14-1 طرق الاستخدام

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

1- طرق المسح المطالي (أ) (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 والشبكية ، وأيضاً تحديد الأجسام الغريبة في العين ، وعندما تنتشر هذه الموجات داخل العين ، فإن جزءاً منها يرتد عند وجود أي حدّ فاصل داخل نسيج العين ، ومن حساب زمن الارتداد يمكن إيجاد العمق أو البعد ، وذلك بمعرفة سرعة هذه الموجات داخل الوسط .

2- طرق المسح الطوعي (ب) (B-scan)

وتستخدم لإيجاد صورة العضو في بعدين ، وهي تختلف عن طرق المسح (أ) في أن المحول يتحرك ، 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 الحاسب ، أمكن الحصول على صورة ملونة ثلاثية الأبعاد.

3- طرق مسح الحركة (م) (M-scan)

وتجمع هذه الطريقة بين الطريقتين السابقتين (أ) و (ب) ، وفيها يكون المحول ثابت ، والعضو هو الذي يتحرك مثل حركة القلب وصماماته

4- 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 ليست 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- استنتج معدل الزيادة في سمك الجليد على سطح بحيرة تحت تأثير الظروف الآتية :

درجة حرارة الماء في البحيرة ($0C^0$)

درجة حرارة الهواء ($-12C^0$)

سمك طبقة الجليد (0.03 cm)

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

كثافة الجليد (920 Kg^{-3})

الحرارة الكامنة لانصهار الجليد ($3.3.10^5\text{ J Kg}^{-1}$)

والمطلوب :

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

2- ما هو المعدل عندما يتضاعف سمك الجليد

2- كرة من النحاس كتلتها (0.1 Kg) عُلقت 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 ($15C^0$)، فما هو معدل التغير في درجة حرارة الكرة عندما تكون درجة حرارتها ($80C^0$)، 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 ($90C^0$)، تم عزله تماماً بمادة عازلة ، معامل التوصيل الحراري لمادتها ($6.4.10^{-2}\text{ W.m}^{-1}\text{ K}^{-1}$)، فإذا كان طول ضلع المكعب هو (1 m) وسمك الطبقة العازلة هو

(0.01 m)، فاحسب معدل انتقال الحرارة خلال طبقة المادة العازلة ، إذا كانت درجة حرارة السطح الخارجي للعازل هي (40°C)

4- جدار يتكون من طبقتين من الخشب ، سمك كل منها (3 cm) بينهما طبقة من مادة عازلة سمكها (0.01 m)، ما هو معدل انتقال الحرارة خلال وحدة المساحات من هذا الجدار ، إذا كانت درجتى حرارة وجهي الجدار هما (0°C) و (20°C)، علماً بأن معامل التوصيل الحراري للخشب هو ($2.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ، و معامل التوصيل الحراري للمادة العازلة هو ($0.24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) .

5- أنبوبة أسطوانية من النحاس قطرها الداخلي (0.075 m) والخارجي (0.080 m) يمر بها ماء متوسط درجة حرارته (70°C) غطيت هذه الأنبوبة بطبقة من مادة عازلة سمكها (1 cm) ومعامل توصيلها الحراري ($0.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) وكان معدل فقدان الحرارة من سطحها الخارجي (20 W m^{-1}) لكل درجة أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط ، احسب درجة حرارة السطح الخارجي للعازل ومعدل فقدان الطاقة الحرارية من سطح متر طولي من الأنبوبة إذا علمت أن متوسط درجة حرارة الوسط المحيط (16°C)

6- وضع جسم في وعاء مفرغ محاط بجليد مجروش في درجة حرارة (0°C)، فإذا كانت درجة الحرارة الابتدائية لهذا الجسم (300°C) ويبرد داخل الوعاء بمعدل ($0.35^{\circ}\text{C s}^{-1}$)، احسب ثابت ستيفان إذا علم أن كتلة الجسم (0.32 Kg) وحرارته النوعية هي ($420 \text{ J Kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$) ومساحة سطحه (8 cm^2) ويمكن اعتباره جسماً أسود .

7- احسب القدرة التي تفقد من سطح كرة قطرها (10^{-2} m) و انبعاثية سطحها (0.6) إذا عُلقت في حيز درجة حرارته (300 K) وثبتت درجة حرارتها بواسطة سخان كهربائي عند درجة حرارة (500 K) علماً بأن ثابت ستيفان

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

8- أنبوبة طولها متر مصنوعة من مادة عازلة معامل التوصيل الحراري لمادتها هو ($0.005 \text{ Jm}^{-1} \text{ S}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$) فإذا كان نصف قطرهما الداخلي والخارجي هما (2 cm, 3 cm) على الترتيب وكانت درجة حرارة السطح الداخلي والخارجي (227°C , 127°C) على الترتيب ودرجة حرارة الوسط الموجودة فيه (27°C)، احسب كمية الحرارة المنقولة بالتوصيل خلال جدارها في الساعة؟ وإذا كانت الحرارة المفقودة بالإشعاع تساوي (0.06) من كمية الحرارة المنقولة بالتوصيل، 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 ارتناها ، ثم تنتقل الحركة منها إلى ما يليها من الجزيئات وهكذا .
تتكون 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 الجاذثة 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 كهرومغناطيسية 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

2-5 الجانب الذاتي للصوت :

هناك سؤال يطرح نفسه دائماً : 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 إذن السامع . و من هنا تظهر أهمية تعريف الصوت .

فمن وجهة نظر الفيزياء ما نطلق عليه كلمة (صوت) ما هو إلا سلسلة من التتابعات السريعة لتضاغطات وتخلخلات متتالية في الهواء .

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

والموجات السمعية تقتصر على مدى التردد الذي يمكنه أن يهيج 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 المهتزة (مثل أوتار الكمان والبيانو والقيثارة والحبال الصوتية للإنسان) والأعمدة الهوائية المهتزة (مثل الأرغن وأنابيب الرنين ومخمد الأصوات في السيارات) والصفائح والأغشية الرقيقة المهتزة (مثل الطبول والدفوف وأجهزة تكبير الصوت) وغيرها كثير .

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

من وجهة
الفيزياء

3-5 استجابة الأذن البشرية للصوت :

إن الأذن البشرية العادية 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/م²) وهذا الحد من الضغط يدعى بحافة السمع (أو عتبة السمع) .

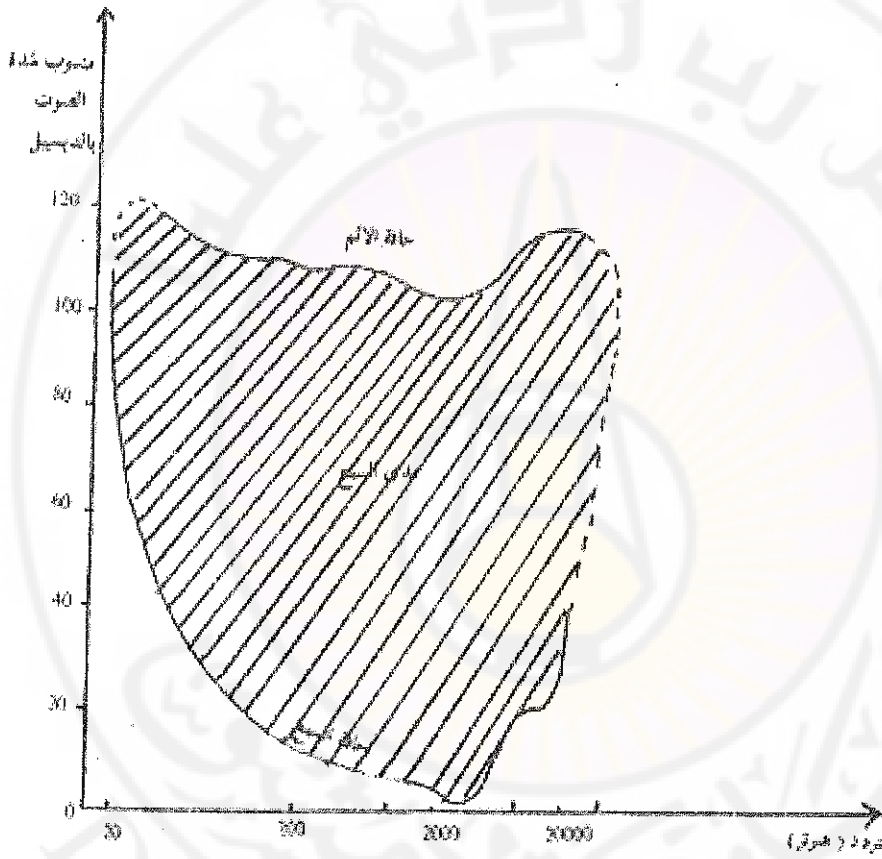
إن هذا التغير الضئيل في مقدار الضغط الجوي 20×10^{-6} باسكال (ويعادل جزءاً واحداً من 50000000000 جزء من الضغط الجوي الاعتيادي) يسبب إزاحة لغشاء الطبل بمسافة تقل عن قطر جزيء الهيدروجين . ومع هذه الحساسية الزائدة فإن الأذن البشرية تتحمل ضغطاً صوتياً يفوق قيمة أدنى ضغط صوتي مسموع بأكبر من مليون مرة ، وهذا الحد من الضغط يدعى بعتبة الألم .

وهكذا يتضح أن الأذن البشرية العادية تحس بالموجات التضاغية 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 العادية 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 ترددها عن 20 هرتز

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

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



يوضح ان الاذن العادية تستطيع السمع الاصوات التي تقع شداتها بين حادتي السمع والالام والمحدودة لحداتها بين 20 هرتز و 20000 هرتز

الشكل (1)

في هذا الشكل نلاحظ أن أدنى شدة للصوت المسموع التي تمثل حافة السمع ليست ثابتة مع التردد ، إذ يلاحظ أن الأذن العادية 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 العادية 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 (عتبة الألم) تكاد تكون ثابتة مع التردد .

مما تقدم يتبين أن استجابة الأذن السليمة للصوت ليست خطية بل معقدة وتختلف باختلاف تردد الصوت وشدته ، وهذه الصفة المميزة للأذن البشرية تفيد 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

للأصوات ذات الترددات المختلفة ونتيجة لذلك فالأذن لا تستطيع سماع الصوت ذي التردد العالي بنفس العلو الذي تسمع به صوتاً تردده أقل وشدته مساوية لشدة الصوت الأول .

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

مقدار الإحساس يتناسب طردياً مع لوغاريتم الشدة .

فإذا فرضنا أن مقدار الإحساس (لعلو الصوت) هو L وأن شدة الصوت I فإن :

$$L \propto \text{Log} I \quad (5-1)$$

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

ومن العلاقة الأخيرة نحصل على :

$$L = K \text{Log} I \quad (5-2)$$

حيث أن K مقدار ثابت .

وبمفاضلة (5-2) نجد أن :

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

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

ويلاحظ من هذه العلاقة أن حساسية الأذن تقل مع زيادة شدة الصوت ، وهذا يعني أن الأذن 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 وليست فيزيائية لذلك فإنه يتعذر 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 طرذاً مع مربع سعة الاهتزاز .

2- المساحة السطحية للسطح المهتز :

إن شدة الصوت الناتج من مصدر مهتز تتناسب طرذاً مع مساحة السطح المهتز .

3- المسافة بين المصدر والمستلم :

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

5-5 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 تعدّ درجة الصوت مرادفة لتردده وهكذا يتضح أن درجة الصوت هي الحكم الذي يصدره السامع على الأصوات ويرتبها وفق سلم في مخه وفق إحساسه لترددها .

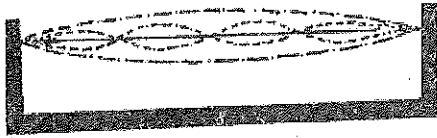
إن درجة الصوت لا تعتمد على علو الصوت أو نوعيته ، فأصوات النساء والأطفال درجاتها عالية لأن تردداتها مرتفعة بينما صوت الرجل الكبير درجته منخفضة وأجش لأن تردده منخفض .

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

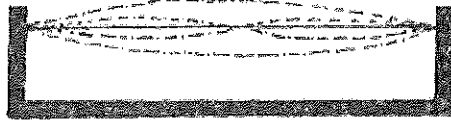
5-6 نوعية النغمة أو الصوت :

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

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



(أ)



(ب)

الشكل (2): يبين وترين مهترين في حالة اهتزاز

(أ) : الوتر يهتز بكامله وبجزأين (النغمة الأساسية والنغمة التوافقية الأولى)
 (ب): الوتر يهتز بكامله و بأربع 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 بالملاحظة أن النغمات الموسيقية الممزوجة بالتوافقيات يكون
 صوتها غنياً وجميلاً وبدون هذه التوافقيات يكون الصوت ثقيلًا وفي الواقع لو
 كانت جميع الآلات الموسيقية تبعث نغمات نقية خالية من التوافقيات تماماً لكانت
 أصواتها متشابهة وليس لها عذوبة أو جرس موسيقي .

ولو فرضنا أن شخصاً يناديك ، فإنك ستدرك حال سماعه من خلال علو
 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 ، وإلا فإن 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 ويتراوح ترددها بين 20 هرتز و 20000 هرتز . أما الموجات التي تقع تردداتها خارج هذا المجال من التردد فإنها غير مسموعة ، وتسمى الموجات التي يقل ترددها عن 20 هرتز بالموجات تحت السمعية ومثل هذه الموجات تتولد عادة عن المصادر الضخمة كما عند الهزات الأرضية أو العواصف أو الأعاصير ، وتسمى الموجات التي يزيد ترددها عن 20000 هرتز بالموجات فوق السمعية ويمكن توليدها بوساطة الاهتزازات المرنة لبلورة الكوارتز التي تتجاوب مع مجال كهربائي متناوب (التأثير الكهروضغطي) 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 ، ولهذه الموجات تطبيقات عملية واسعة في عالم اليوم وسيكون لها شأن كبير في عالم المستقبل .

8-5: المستوى الصوتي وواحداته:

إن الحد الأدنى لشدة الصوت المسموع بالكاد للأذن البشرية السليمة هو 10^{-12} واط لكل متر مربع (وهذا يقابل ضغطاً صوتياً قيمته $20 \cdot 10^{-6}$ باسكال أي $20 \cdot 10^{-6}$ نيوتن لكل متر مربع) بينما الحد الأقصى لشدة الصوت الذي يمكن للأذن العادية أن تتحمله هو حوالي 1 واط لكل متر مربع (وهذا يقابل ضغطاً صوتياً 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 وجدنا من قانون ويبر - فيخنر أن استجابة الأذن البشرية لشدة الصوت المسموع هي لوغاريتمية وليست 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 :

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

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 بل مخترع التليفون ، وعملياً تعدّ وحدة الـ (بل) كبيرة لذلك يفضل استخدام غالباً الديسيبل وهذه :

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

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 ديسيبل ومنسوب شدة الصوت عند عتبة الألم هو 120 ديسيبل ، وأن نغمة صوتية شدتها 10 مرات القيمة المرجعية للشدة لها منسوب شدة يساوي 1 بيل أو 10 ديسيبل وصوت له شدة تعادل 100 مرة القيمة المرجعية للشدة لها منسوب شدة يعادل 2 بيل أو 20 ديسيبل .

ونلاحظ إذاً ازدياد منسوب شدة الصوت بمقدار 1 ديسيبل ، فإن هذا يعني زيادة في شدة الصوت تعادل 26 بالمئة ، والأذن السليمة تدرك حسيّاً 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 ديسيبل . ولما كانت معظم أجهزة القياس تعطي القياس المباشر للضغط الصوتي وليس الشدة ، وحيث أن شدة الصوت I تتناسب طردياً مع مربع الضغط الصوتي لذلك فإن :

$$\text{منسوب شدة الصوت بالديسيبل} = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 =$$

حيث أن p هو الضغط الصوتي المقاس وأن p_0 هو الضغط الصوتي المرجعي ويساوي $2 \cdot 10^{-5}$ نيوتن لكل متر مربع وهو يمثل أقل ضغط صوتي مسموع أي حافة السمع . والعلاقة الأخيرة تصبح :

$$\text{منسوب الضغط الصوتي بالديسيبل} = 20 \log \frac{p}{p_0} =$$

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 التقريبية 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	التخاطب العادي
60 - 70	رنين الهاتف
70 - 85	طريق كثيف المرور
80	ساعة توقيت
90	زئير الأسد (على بعد 6 متر) والشلال
100	ثقابة الصخور تعمل بالهواء المضغوط
100 - 110	الرعد
115 - 120	مطار الطائرات النفاثة (عند التحليق)
130	المدفع الرشاش
150 - 155	منطقة هبوط حاملة الطائرات (على بعد 20 متر)
175	الصاروخ الفضائي

9-5 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 للأذن 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 ويُعمل عليه دولياً بشكل عام .
إن الضجيج تأثير في صحة الإنسان يتوقف على الشدة والتردد وفترة التعرض .

10-5 ظاهرة التشتت :

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

وفي الواقع فإن معظم الأصوات التي نتعامل معها هي أصوات معقدة تتركب 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 تتحرك 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 سرعتها .

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

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

ويقال للوسط المادي الذي تعتمد فيه سرعة انتقال الموجة على الطول الموجي (أو التردد) بأنه وسط مشتمل 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 المعني .
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 :

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

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

5-11 السرعة في الحركة الموجية :

في البداية يجب أن نؤكد أن الوسط الناقل للموجة كالهواء مثلاً ، ليس متصلاً بل منقطعاً ويتألف من عدد هائل من الجزيئات منفصلة عن بعضها تماماً .

ولكن مصادر الصوت تكون عادة كبيرة جداً بالمقارنة مع الأبعاد الفاصلة بين الجزيئات تحت الشروط الجوية الاعتيادية وإن هذه الجزيئات المنفردة التي يتألف منها الوسط لا تنتقل مع الموجة بل تهتز موضعياً حول نقاط توازنها وعلى هذا الأساس يمكن اعتبار الجزيئات عبارة عن مهتزازات تهتز بحركات توافقية بسيطة اهتزازاً طويلاً حول مواضع توازنها . وطبيعي أن جميع هذه

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

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

1- سرعة الجسيم .

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

3- سرعة المجموعة (لعدد 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 الجسيم :

وهي السرعة التوافقية البسيطة للجسيم حول موضع توازنه ، وهي مقدار متغير ، وتكون قيمتها عظمى عند لحظة مرور الجسيم في موضع توازنه وتكون صفرًا عندما يكون في أقصى إزاحة عن موضع التوازن .
الإزاحة الآنية ξ للجسيم في أية 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) كالآتي :

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

حيث c هي سرعة الموجة .

إن سرعة الجسيم u هي :

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

وبمفاضلة 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 $u_0 = \frac{2\pi ac}{\lambda}$

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 وتختفي عندما يتوقف السطح المهتز عن الاهتزاز وهذه السرعة تختلف عن السرعة 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 بسرعات مختلفة تتفاوت في المقدار من الصفر إلى ما لانهاية تقريباً (وفق توزيع ماكسويل لسرعات 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 (إديباتيكية) 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

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

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

نفس المرتبة من المقدار للجزء التربيعي لمتوسط مربع السرعة الجزيئية لذلك الغاز (يعتبر الهواء غاز ثنائي الذرة) .

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

عندما يهتز المصدر الصوتي فإن بعض الجزيئات تدفع نحوه نتيجة الحركة العشوائية وتتلامس مع السطح المهتز ، وبذلك تستلم كمية حركة إضافية صغيرة بالمقارنة مع متوسط كمية الحركة التي تمتلكها قبل التلامس . ولما كانت كمية الحركة كمية متجهة ، لذلك فإن الزيادة بكمية الحركة التي اكتسبتها الجزيئات التي تلامست مع السطح المهتز تنتقل (بنفس المقدار والاتجاه) إلى الجزيئات الأخرى التي ستصطدم معها ، وهذا الاضطراب المصاحب لعملية انتقال كمية الحركة من جزيء إلى آخر سينتقل باتجاه محدد في الفضاء بسرعة تحددها أساساً السرعة الجزيئية العشوائية وليس سرعة الجسيم التي استلمها من المصدر المهتز .

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

وفي الواقع إذا كانت الزيادة في سرعة الجسيم التي يكتسبها من السطح المهتز كبيرة بالمقارنة مع متوسط السرعة 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 الراجة (اختراق جدار الصوت)

5-13 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 :

$$f\lambda = c \text{ (مقدار ثابت)}$$

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 طويل مشدود على طول المحور السيني x ، نفرض أنه في لحظة معينة ، ولتكن $t=0$ ، يمكن تمثيل شكل الموجة (أي شكل الاضطراب الموضعي في السلك) بالمعادلة :

$$y = f(x) \text{ في الزمن } t=0 \quad (5-15)$$

حيث y هي الإزاحة المستعرضة للسلك عند x 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 :

$$y = f(x - ct) \quad (5-16) \quad \text{في الزمن } t = t$$



الشكل (3) : يبين شكل التشوه 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 لأيّة موجة على أية شكل تتحرك إلى اليمين .

والآن لنأمل 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 r (كأن نقول ، قمة النبضة مثلاً) وفي هذه الحالة الخاصة تكون قيمة r 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 يتناقص بازدياد الزمن t ، وهكذا يتضح أنه يمكن بسهولة الحصول على سرعة طور معين للموجة ، فلطور معين لموجة تتحرك إلى اليمين يجب أن يتوفر الشرط التالي :

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

وبإجراء التفاضل ينتج أن :

$$\frac{dx}{dt} = C \quad (5-19)$$

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 اقتصرنا 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 ،

وهذه 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 أنياً في وسط ما ، وهذا ما هو شائع في معظم الحالات العملية ، فإنه ينبغي التعامل مع السلوك الجماعي لجميع الموجات في آن 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 السرعة الذي سبق أن تطرقنا له في الفقرة (5-11) وهو سرعة المجموعة . وللسهولة فقط سنكتفي باعتبار مجموعة تتألف من موجتين تتحركان بنفس الاتجاه ولهما السعة نفسها a والفرق بين تردديهما 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 y حيث :

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

ومنها 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 ترددها $\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \right)$ وهو المتوسط الحسابي للتردين

الأصليين ω_1 و ω_2 وعددها الموجي $\left(\frac{k_1 + k_2}{2} \right)$ يمثل $\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2} \right)$

ولما افترضنا أن الفرق بين الترددين 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 :

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

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

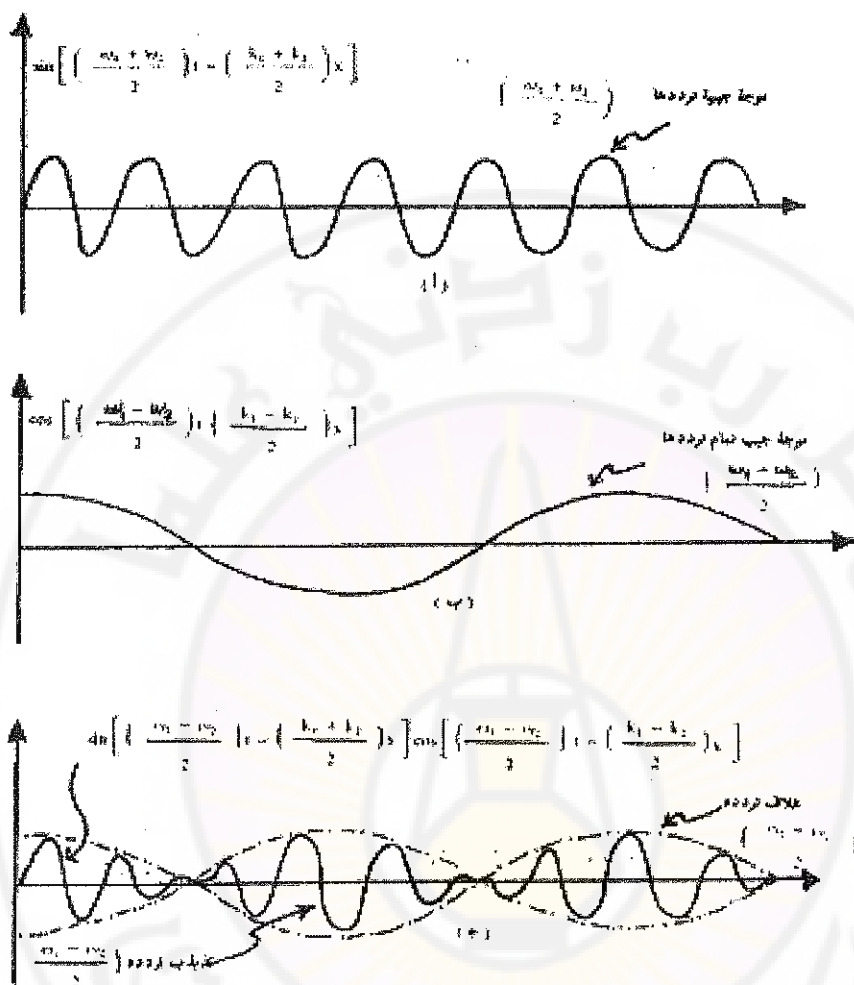
وهذا يشير إلى أن قيمة المتوسط الحسابي للترددين الأصليين يساوي إلى درجة عالية من الدقة قيمة أحد الترددين ، وكذلك فإن قيمة المتوسط الحسابي للعديد الموجبين الأصليين يساوي إلى درجة عالية من الدقة قيمة أحد العددين الموجبين ، وهذا يعني أن حد الجيب يمثل موجة جيبية طورها يماثل إلى حد كبير طوري الموجتين الأصليتين .

والشكل (4-أ) يبين الموجة الجيبية التي يمثلها حد الجيب في المعادلة (5-21) وحد الجيب تمام في المعادلة (5-21) يمثل موجة ترددها 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 (5-21) (ب) يمثل حد جيب تمام ، (ج) يمثل الخط المتصل (وليس المنقطع) حاصل ضرب الحدين وهذا المنحني يمكن الحصول عليه بضرب الإحداثيات الرأسية للحدين الجيب (أ) والجيب تمام (ب) مع بعضهما نقطة بنقطة ، فينتج المنحني المستمر (ج) الذي يظهر واقعاً داخل الغلاف المنقط ،

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

ومما يجدر ملاحظته من تماثل الحدين في x و t في المعادلة (21-5) أن شكل المنحنى 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 وهبوطها مع الزمن يؤدي إلى ظهور ظاهرة الضربات (الخفقان) ، ومن الواضح أن التابع (21-5) الممثل بالمنحنى البياني (4-ج) يعني أن هناك تضمين لسعة الاهتزازات العالية التردد وذات الطول الموجي القصير بواسطة غلاف طوله الموجي طويل وتردده منخفض .

إن تركيب موجتين أو أكثر بهذا الأسلوب يعرف بمجموعة موجية ، والآن لنرى كيف تسلك 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 والمنحنى المستمر العالي التردد الذي يقع داخل الغلاف في الشكل (4-ج) يتحركان إلى اليمين مع مرور الزمن بنفس السرعة ، وهذا يشير إلى أن أي إشارة مركبة من خليط من الموجات تتقدم في وسط غير مشتت بسرعة 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

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

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 تواجهها في الفيزياء تكون سرعة المنحني المستمر $\frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2}$ داخل الغلاف أكبر من سرعة الغلاف $\frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2}$ ، وهذا النوع من التشنت يدعى بالتشنت 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 التشنت يدعى بالتشنت الشاذ ، ومن الأمثلة على ذلك هي الموجات المستعرضة في قضيب صلب والموجات 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 تنتقل 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 تتقدم 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 تقترب قيمة δk من الصفر فعندئذ نحصل على :

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

ولكن لدينا :

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

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 وننتقل إلى نتائج تمثل بدقة كافية السلوك الجماعي للمجموعة الموجية ، أما إذا كانت المجموعة مؤلفة

من ما لانهاية من الموجات فعندئذ نحتاج إلى استخدام رياضيات متقدمة تشتمل على نظرية تحويلات فورير التي تقع خارج نطاق دراستنا .

5-15 سرعة الموجات الصوتية في الأوساط المختلفة :

إن الموجات الصوتية هي موجات طولية (أي موجات تضاغية) في أي وسط مادي وإن سرعة هذه الموجات c في الموائع (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 (اديباتيكية) 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 $\gamma = 1.29$ والهواء 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 خلاله الموجة التضاغطية .

إن مرور مثل هذه الموجة في أي وسط يحدث تضاعطاً في صاحبه قوة قص ولما كان الوسط الصلب بخلاف الموائع (السوائل والغازات) يبدي مقاومة للقص القصية 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 كلا من الموجتين الطولية والمستعرضة . إن سرعة الموجات الطولية C_L في الجسم الصلب الممتد إلى مالا نهاية في جميع الاتجاهات تتوقف على معامل الصلابة n كما على معامل المرونة الحجمي K أي أن :

$$C_L = \frac{\sqrt{K + \frac{4}{3}n}}{\rho} \quad (5-32)$$

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) والموجات القصية المستعرضة يمكن أن تتقدم في الأوساط الصلبة الممتدة إلى ما لانهاية 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 دائماً 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 .

5-16 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 مقابلاً 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 مثالياً) 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 M الوزن الجزيئي للغاز من هذه المعادلة نحصل على :

$$P = \frac{m}{V} \frac{RT}{M} = \rho RT / M$$

نعوض 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 طردياً 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 t سيلزيوس هي C_t 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 :

$$C_t = C_0 \left(1 + \frac{t}{546}\right)$$

وإذا 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 م/ثا .

3- تأثير تغير الرطوبة في سرعة الصوت :

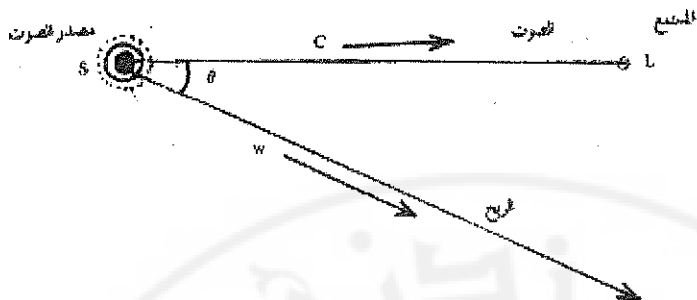
من المعلوم أن كثافة بخار الماء تحت الشروط القياسية من ضغط ودرجة حرارة تساوي 0.0008 غم/سم^3 ($= \frac{18}{22400} \text{ غم/سم}^3$) بينما كثافة الهواء الجاف بالشروط نفسها هي 0.001293 غم/سم^3 لذلك فإن كثافة البخار أقل من كثافة الهواء الجاف ، وعليه فإن الهواء الرطب يجب أن تكون كثافته أقل من كثافة الهواء 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 الرياح في سرعة الصوت في الهواء :

عندما تهب الرياح بسرعة W باتجاه تقدم الصوت نفسه فإن سرعة الصوت تزداد وتصبح محصلة سرعته $(c + W)$ ولكن إذا كانت الرياح تهب باتجاه معاكس لاتجاه تقدم الصوت فإن سرعة الصوت تقل وتصبح محصلة 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 :

$$c = f\lambda \text{ مقدار ثابت}$$

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 بوساطة 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 متعاكسين 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 تقليص الأخطاء البشرية المصاحبة للقياس . 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- الطرائق 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 .

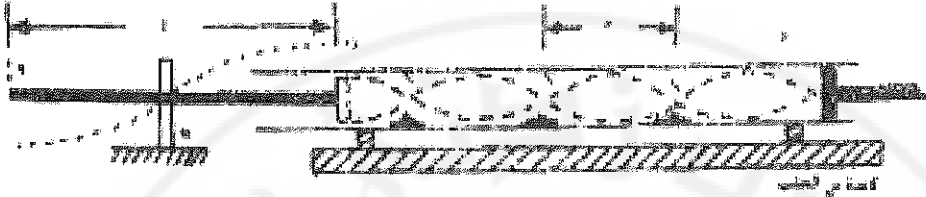
وسنقف هنا عند طريقتين , هما : طريقة كندت وطريقة أنبوبة الرنين . وذلك لأهميتهما في قياس سرعة الصوت , فطريقة كندت مختبرية سهلة وصالحة لإيجاد سرعة الصوت في المواد الغازية والسائلة والصلبة . أما طريقة أنبوبة الرنين فهي تفيد في إيجاد سرعة الصوت في الهواء .

طريقة كندت :

تمتاز هذه الطريقة بدقتها وسهولتها وبساطة أجهزتها . ويتألف جهاز كندت المبين في الشكل (6) من أنبوبة زجاجية مفتوحة الطرفين T تدعى بأنبوبة الرنين ، طولها حوالي $2m$ وقطرها حوالي $5cm$ وتستند على قاعدة من الخشب .

في الطرف الأيسر قضيب منتظم من المعدن أو الزجاج AB طولها حوالي $1m$ وممسوك من منتصفه بإحكام بمسند ثابت B ويثبت في نهاية القضيب الواقعة داخل الأنبوبة قرص معدني دائري الشكل D . وقطر هذا القرص أقل بمقدار ضئيل من قطر الأنبوبة لكي يسهل اهتزازة طولياً على امتداد الأنبوبة دون أن يلامسها من الداخل . والطرف الآخر من الأنبوبة يزود بمكبس متحرك P يسهل تحريكه داخل الأنبوبة للتحكم بطول عمود الهواء المحصور

بين المكبس P والقرص D . ويجب أن يكون الجهاز بكامله مثبتاً بإحكام على مسند صلب لتجنب أي رجة أو هزة عنيفة قد تؤدي إلى كسر الأنبوبة الزجاجية في أثناء إجراء التجربة .



الشكل (6) جهاز كندت

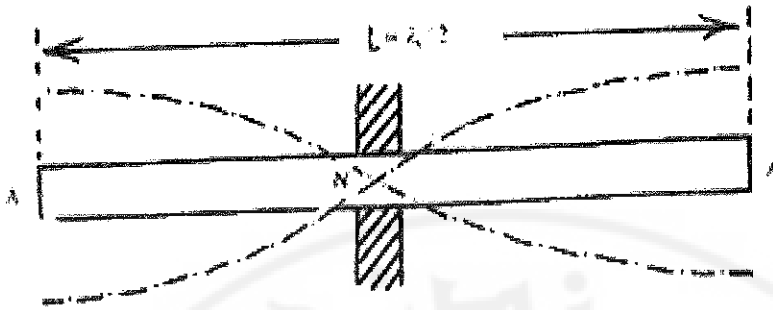
طريقة العمل :

يجب أن تكون الأنبوبة الزجاجية جافة تماماً ومثبتة بوضع أفقي ، يذّر 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 تحتك مع القضيب المعدني وتثير فيه اهتزازات طويلة .

ولما كان القضيب مثبتاً من مركزه فإن منتصفه يعد عقدة (تضابط) بينما طرفاه الحران A يعتبران بطنين (تخلخين) وبذلك يتشكل موجة طولية واقفة على طول القضيب بطنين متتالين 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 طرفيه 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 مواقع متناوبة ومتباعدة بانتظام وهذه المواقع 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 ينشك ما يعرف بالموجات الواقفة في عمود الهواء نتيجة تداخل الموجات المنبعثة من القرص المهتز مع الموجات المنعكسة من المكبس . والآن نقاس المسافة بين عدة عقد ومنها 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 الأنبوبة 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 المعادلتين (5-43) و (5-44) أن التردد f مشترك وهذا هو الحال دائماً في ظاهرة الرنين . وعليه نحصل من هاتين المعادلتين 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 الأنبوبة الزجاجية بالسائل المطلوب إيجاد سرعة الصوت خلاله وتستبدل برادة الحديد الناعمة بمسحوق الليكوبويوم. 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 الأنبوبة من الهواء وتملأ بالغاز المطلوب إيجاد سرعة الصوت خلاله . ومرة أخرى يهتز القضيب طولياً وإذا كانت المسافة بين عقدتين متتاليتين هي d'' فإن :

$$d'' = \frac{\lambda_g}{2}$$

حيث λ_g يمثل الطول الموجي للصوت في الغاز . وإذا كانت سرعة الصوت في ذلك الغاز هي C_g فإن :

$$C_g = f\lambda_g = 2fd''$$

ولما كانت سرعة الصوت في الهواء هي :

$$C_a = f\lambda_a = 2fd$$

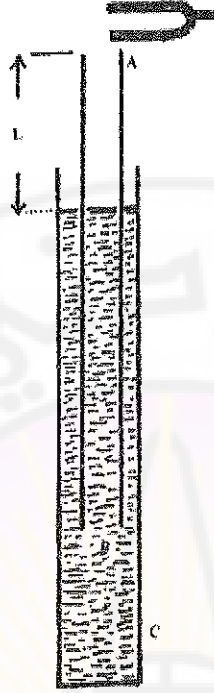
ومن المعادلتين الأخيرتين نحصل على :

$$C_g = C_a \frac{d''}{d} \quad (4-49)$$

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 مهتزة بالقرب من الفتحة العليا لأنبوبة الرنين فإن رنيناً 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 .

واللحصول على أفضل موقع للرنين يستلزم عناية 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 تنبثها 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 أمكن حساب سرعة الصوت في الهواء في درجة حرارة الغرفة .

ولكن هنا يجب أن نشير أننا في هذه الحسابات افترضنا أن بطن الموجة الواقفة تقع تماماً عند الطرف المفتوح للأنبوبة . ولكن هذا الافتراض غير صحيح بالضبط . وفي الحقيقة فإن البطن تقع خارج فتحة الأنبوبة 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 تقريباً $3/10$ من قطر الأنبوبة . 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 الأنبوبة 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 (5-50) من (5-51) 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 ترددها 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 الأنبوبة مساوياً لـ $\frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots$ 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 .

2- الانعكاس .

3- التداخل .

4- الإنعراج.

5- الاستنطارة .

وستعرض باختصار شديد كل خاصية من هذه الخواص .

انكسار الصوت :

إن الموجات الصوتية تنكسر 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 وتنعكس إلى الوسط الأول الذي كانت به وبنفس الوقت فإنها تعاني تغيراً في الطور . وتتبع الموجات الصوتية عندما تنعكس 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 والترديد في الأبنية والنغمة الموسيقية المسموعة عند وضع محارة قرب الأذن . وما الموجات الواقفة في أي جسم مهتز إلا إحدى نتائج الانعكاس .

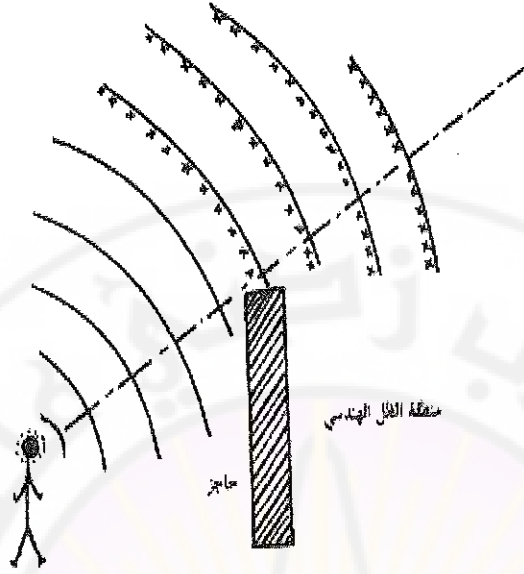
تداخل الموجات الصوتية :

هو التعبير العلمي الذي يشير إلى التأثيرات الفيزيائية الناتجة عند تراكب موجتين أو أكثر .

ظاهرة الانعراج:

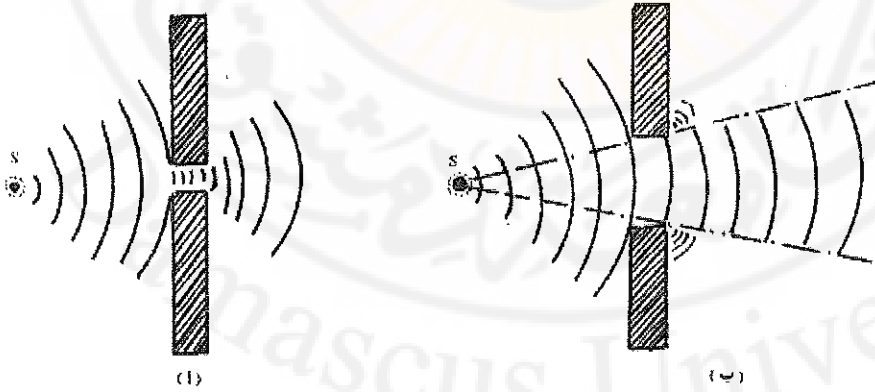
إن ظاهرة الانعراج تعني أن الموجات الصوتية تتحني حول العوائق التي تعترضها وتدخل منطقة الظل الهندسي . وخير مثال على ذلك أنك تسمع صوت شخص يناديك من وراء حاجز دون أن تراه وهذا يعني أن الموجات الصوتية تحيد عن مسارها عند حافة الحاجز وتدخل منطقة الظل الهندسي كما هو مبين في الشكل (9) وهكذا يتضح أن الموجات الصوتية تغير اتجاه تقدمها عندما تجابه عوائق في طريقها ، وظاهرة الحيود مألوفة وواضحة في الصوت بينما هي ليست كذلك في الضوء بسبب أن طول الموجة الصوتية كبير جداً بالمقارنة مع طول الموجة الضوئية . وأن مقدار الإنعراج (أو الانعطاف) حول العائق يزداد مع ازدياد الطول الموجي وعليه فإن الصوت العالي التردد يعطي ظلاً أكثر حدة من الصوت المنخفض التردد وظاهرة الحيود 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 S 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 خلالها دون أن يعاني الجزء الأكبر



الشكل (9) يبين ظاهرة الحيود حول حافة حاجز

من جبهة الموجة أي تغيير إلا عند الحافات حيث يحدد جزء من الموجة نحو الظل الهندسي بمقدار يتوقف على إبعاد الفتحة والطول الموجي . وقد وجد أن تأثير الحيود يقل كلما ازدادت أبعاد الفتحة بالمقارنة مع الطول الموجي . إن موجات الصوت تحيد عن مسارها ولا تنعكس تماماً عندما تسقط على جسم عاكس أبعاده مقاربة للطول الموجي .



الشكل (10)

ظاهرة الاستطارة :

إن الموجات الصوتية تنتشر في جميع الاتجاهات عندما تسقط على حواجز ذات أبعاد صغيرة بالمقارنة مع الأطوال الموجية وسعة الموجات المنتشرة على مسافات بعيدة من الحاجز تتناسب طرذاً مع حجم الحاجز وعكسياً مع مربع الطول الموجي . وعلى هذا الأساس فإن الموجات القصيرة يكون انتشارها أكبر من الموجات الطويلة .

19-5 ظاهرة دوبلر :

لقد اكتشف العالم النمساوي كريستيان جون دوبلر (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 وتسري هذه الظاهرة ، التي تعرف باسم ظاهرة دوبلر ، على جميع الموجات بصورة عامة .

وقبل أن نطبق هذه الظاهرة على الموجات الصوتية دعنا نعطي مثالاً صوتياً مألوفاً . إذا كنت واقفاً في محطة وكانت هناك قاطرة سريعة قادمة من بعيد نحو المحطة مطلقاً صفيراً مستمراً فإنك سوف تلاحظ ظاهرة غريبة وهي عدم ثبوت درجة صوت صفارة القاطرة . فتردد الصفارة أثناء اقترابها يبدو أعلى من ترددها عندما تكون قد مرت 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 دوبلر 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 دوبلر متماثل.

وبصورة عامة فإن تأثير (أو ظاهرة) دوبلر في الصوت تحدث عندما يكون هناك حركة نسبية بين كل من :

(أ) مصدر الموجة الصوتية .

(ب) الوسط الناقل للموجة .

(ج) المستقبل الذي يستلم الموجة .

وسنحاول الآن إيجاد الصيغة العامة التي تحدد مقدار هذا التأثير في الصوت . وقبل البدء في العملية التحليلية للاشتقاق يجدر بنا أن نوضح هذا التأثير وصفيًا . لهذا الغرض نأخذ حالتين بسيطتين تمامًا .

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) متجانس 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

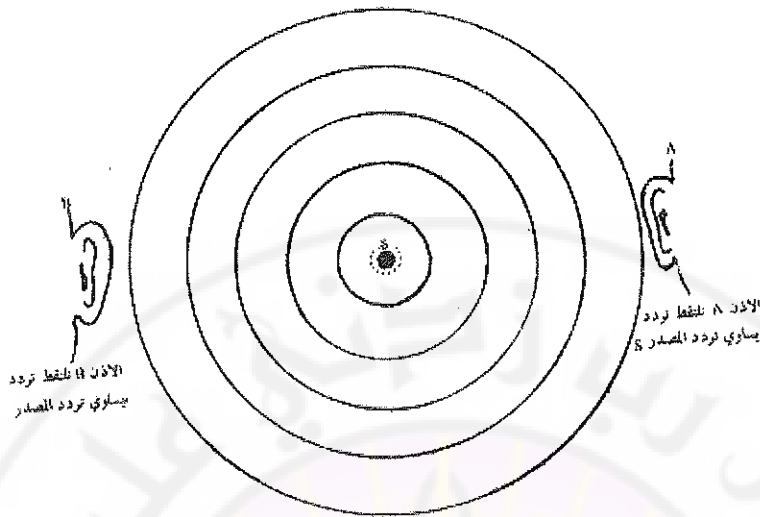
موجات صوتية بتردد يساوي التردد الحقيقي للمصدر S وكذلك المستقبل B (أي السامع B) يستلم موجات صوتية بتردد يساوي التردد الحقيقي للمصدر S .

وباختصار فإن تردد الصوت المسموع يساوي التردد الحقيقي للمصدر ومن ثم فإنه لا وجود لتأثير دوبلر في هذه الحالة .

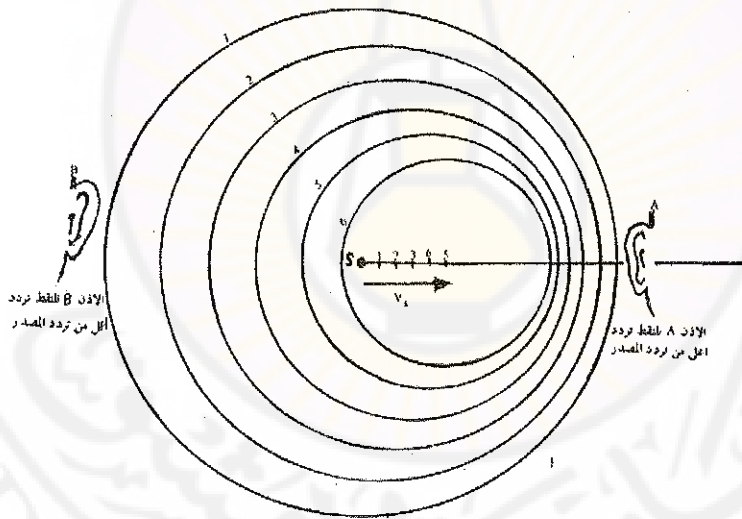
وفي الحالة الثانية نفرض أن المصدر S فقط يتحرك بسرعة منتظمة V_s إلى اليمين بينما الوسط والمستقبل في حالة سكون كما هو مبين في الشكل (12) .

ويمكن تفسير 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 متعاقبة . 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 يتباعد 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 ويبث موجات صوتية بتردد ثابت الشخصان الثابتان B, A يستلزمان الصوت المنبعث من المصدر وبالتردد نفسه



الشكل (12) يبين المصدر (S) يتحرك بسرعة منتظمة V_s نحو اليمين ويلاحظ أن مركز جبهة أي موجة كروية يطابق موقع المصدر في لحظة انبعاث 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 الاشتقاق 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 :

سرعة مصدر الصوت S بالنسبة لمرجع ثابت (وليكن الأرض) $V_s =$

سرعة الوسط الناقل للموجة (أي سرعة الهواء) بالنسبة للأرض $W =$

سرعة الصوت بالنسبة للهواء $C =$

سرعة السامع (O) أي سرعة المستقبل للموجة بالنسبة للأرض $V_0 =$

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 :

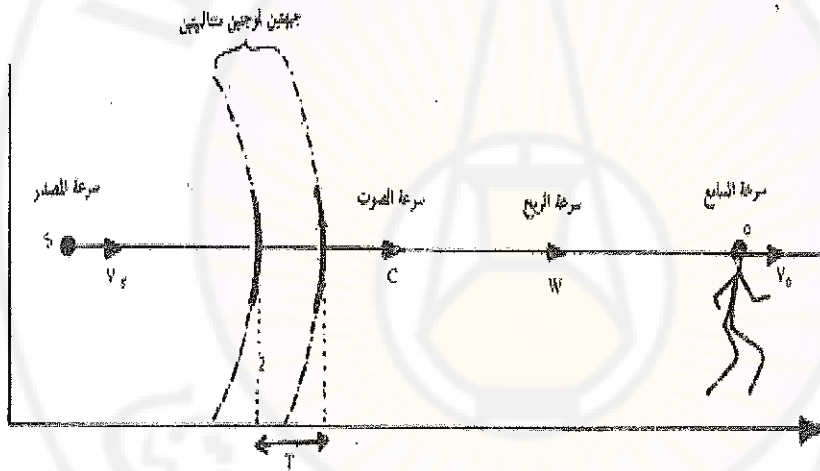
$$\lambda = (C + W - V_s)T \quad (5-54)$$

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_o) لذلك فإن سرعة جبهات الموجة بالنسبة للسامع هي :

$$(C + W) - V_o = C - (V_o + W)$$

وينبغي أن نلاحظ هنا أنه 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 أذن 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 صفراً 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 تنعكس وبذلك تصبح المعادلة الأخيرة كالآتي :

$$f_0 = f_s \left[\frac{C - (V_0 + W)}{C - (V_s + W)} \right] \quad (5-60)$$

وإذا كان الوسط ساكناً أي أن ($W=0$) يصبح شكل المعادلتين الأخيرتين كالآتي :

$$f_0 = f_s \left[\frac{C - V_0}{C - V_s} \right] \quad (5-61)$$

وطبيعي أن هذه المعادلة صحيحة إذا كانت جميع السرع في اتجاه واحد .
إن هذه المعادلات المعبرة عن ظاهرة دوبلر تعدّ 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 .
وينتج هذا الفرق من أن V_0 و V_s قد قيستا 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 الراجة (موجة الصدم) الناتجة من حركة طائرة أو قذيفة تنطلق في الهواء بسرعة تزيد عن سرعة الصوت في هذا الوسط .

أمثلة محلولة :

مثال (1) :

وجد أن منسوب الشدة لمصدر صوتي قدرته W واط في نقطة قياس على بعد معين من المصدر هي L ديسيبل فإذا وضع مصدر صوتي آخر له القدرة نفسها ويجاور المصدر الأول فما هو منسوب الشدة الناتج من المصدرين 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 المصدرين 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 ديسيبل في حالة مضاعفة الشدة .

مثال (2) :

احسب مقدار التغير في منسوب شدة الصوت عندما تزداد شدة الصوت 10^6 مرة بمقدار شدته الأصلية ؟

الحل :

نفرض أن الشدة الأصلية للصوت $I_0 =$

وأن الشدة النهائية للصوت $I = 10^6 I_0$ وعليه فإن الزيادة في منسوب الشدة

$$\text{الزيادة في منسوب الشدة} = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log_{10} 10^6 = 60 \text{ ديسيبل}$$

مثال (3) :

موجتان صوتيتان لهما التردد نفسه وشدتيهما 10^{-16} و 10^{-12} واط لكل سم مربع . فما هو الفرق بين منسوبي شدتيهما ؟

الحل :

الشدتان المطلقتان للصوتين هما :

$$I_1 = 10^{-16} \text{ واط لكل سم مربع .}$$

$$I_2 = 10^{-12} \text{ واط لكل سم مربع .}$$

$$\text{منسوب شدة الصوت الأول} = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{10^{-16}}{I_0} \text{ ديسيبل}$$

$$\text{منسوب شدة الصوت الثاني} = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{10^{-12}}{I_0} \text{ ديسيبل}$$

$$\text{الفرق بين المنسوبين} = 10 \log_{10} \frac{10^{-12}}{I_0} - 10 \log_{10} \frac{10^{-16}}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{10^{-12}}{10^{-16}} = 40 \text{ ديسيبل}$$

$$40 = 10 \log 10^4$$

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 ترددها (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 ويبر - فيخنر ، 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 وأعذب من النغمة النقية الأحادية التردد ؟

15- ما هو تأثير دوبلر ؟ وضح على وجه الدقة هل يعني هذا التأثير تغيير في تردد المصدر المصوت 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 وصادرين من مصدرين مختلفين ؟

18- ما هي الصفات التي تمكننا من التمييز بين النغمات المنبعثة من الآلات الموسيقية المختلفة ؟ وإذا كانت هذه النغمات لها نفس الشدة والتردد فهل يمكن أن نميز بين هذه النغمات ؟ وضح 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 الذاتي (أي التقدير الشخصي للسامع ذاته) .

21- عرف البيل ، الديسيل ؟

22- ما هي الأسباب المسوغة لاستخدام الديسيل كوحدة للقياس 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 . ثم وضح لماذا .

24- ما هو الضجيج ؟ هل يمكن عدّ الصوت الموسيقي ضجيجاً ؟ متى يمكن ذلك ؟

25- وضح لماذا يسمع الشخص لضربات عندما يركض بين صافرتين تبثان نغمات لها نفس التردد ؟

26- ما هو التصحيح الطرفي في أنبوبة الرنين ؟ وما هي العوامل التي تحدد مقداره ؟

27- ما هو التردد الأساسي في عمود الهواء المحصور داخل أنبوبة رنين (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 ينبعث من البيانو والآخر ينبعث 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 . وضح ذلك .

33- وضح بالتفصيل مفهوم :

- سرعة الطور .

- سرعة المجموعة .

- سرعة الجسيم .

وما هي العلاقة بين هذه السرع ؟

34- عرف الوسط المشتت للموجة. وبين أهميته بالنسبة لسرعة المجموعة .

35- وضح مفهوم كل من ظاهرتي الحيود والاستطارة .

36- ما هي الموجة الراجعة ؟ وضح كيف تحدث .

37- علل لما يستمع المشاهد إلى نغمتين بترددين مختلفين عند تحريك شوكة

رنانة مهتزة ومثبتة في صندوق الرنين بسرعة نحو حائط ثابت .

38- ما هو تردد الصوت الذي يلتقطه السامع في الحالات التالية :

(أ)- 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 تنبيه 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 متعاكسين على سكتين متوازيتين ويقتربان من

راصد ساكن ويطلق كل منهما صافرنه بتردد 350 هرتز أحد القطارين

يتحرك بسرعة 40 متر/ثا . فما هي السرعة التي يجب أن يتحرك بها
القطار الآخر لكي يسمع الراصد 5 ضربات في الثانية ؟ علماً أن سرعة
الصوت في الهواء 340 متر/ثانية .

41- التردد الظاهري للصوت الذي يسمعه راصد ثابت هو ضعف التردد
الحقيقي للمصدر الصوتي المتحرك نحو الراصد . احسب سرعة
المصدر .

42- سيارتان A و B تتحركان بسرعة واحدة مقدارها 100 كم/ساعة فإذا
أطلقت السيارة A جهاز التنبيه بتردد قدره 1000 هرتز . احسب التردد
الظاهري الذي يسمعه ركاب السيارة B في :

- (أ) - حالة اقتراب السيارتين من بعضهما على نفس الخط المستقيم .
(ب) - حالة ابتعاد السيارتين عن بعضهما على نفس الخط المستقيم
الواصل 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 لتتأثر به العين مباشرة ، أو عن طريق انعكاس تلك الأشعة على الأجسام . ويكون الضوء جزءاً من الطيف الكهرطيسي ويقع في منطقة بين الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء . كما هو مبين بالجدول (1) .

الجدول (1)

1,4701	الفيلسرين	1,0003	الهواء
1,5014	النيزين	1,3330	الماء
1,6277	كبريت الفحم	1,3614	الزيت
2,36	كبريت الزئبق	1,3726	محلول الخل
2,4173	الزئبق	1,4338	الفلوريسين

ويستهدف علم الضوء دراسة انتشار الضوء في الخلاء والأوساط المادية . والمادة هي منبع الضوء . وتدل التجربة على أن أي تغيير كهرطيسي 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 ، ويواكب الفوتون في حركته موجة كهروطيسية بسيطة يتناسب تواترها ν مع طاقته W :

$$W = h\nu \quad (6-1)$$

حيث ترمز h إلى ثابت يسمى ثابت بلانك $planck$ وتتعلق قيمته بالوحدات المستعملة للتعبير عن ν, E وهو يساوي في الجملة السغئية :

$$h = 6,62.10^{-27} \text{ ارغة . ثانية}$$

وبتعبير آخر نقول إن للضوء مظهرين متكاملين :

المظهر الجسيمي : ويتمثل بالفوتونات وهو يؤدي الدور الرئيسي في التفاعل العميق بين المادة والإشعاع .

المظهر الموجي : ويتمثل بالموجة الكهروطيسية المواكبة للفوتون ، ويؤدي الدور الرئيسي في التفاعل بين الإشعاع والمادة.

إن أكثرية المنابع الضوئية ترسل أمواجا كهروطيسية من تواترات مختلفة في آن 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 انه بسيط أو وحيد اللون والسبب في هذه التسمية هو أن اختلاف اللون من ضوء لآخر هو في حقيقته اختلاف في قيمة التواتر .

2-6 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) :

$$C = 2,99793.10^{10} \cong 3.10^{10} \text{ cm/sec}$$

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 المعبر في النقطة المعبرة .

وتتعلق قرينة الانكسار بعوامل عديدة , منها ما يخص المادة ككثافتها , بنيتها البلورية , تركيبها الكيميائي) ومنها ما يخص الضوء نفسه (التواتر) .

فمن ناحية الكثافة ρ تتغير قرينة الانكسار حسب دستور غلادستون .

$$\frac{n-1}{\rho} = K \quad (6-3)$$

حيث يمثل K كمية ثابتة تتعلق بالوسط . فإذا اختلفت كثافة الوسط من نقطة لأخرى فإن n تختلف تبعاً لذلك . ويمكن الاستفادة من هذا الدستور في معرفة علاقة n بدرجة حرارة الوسط t وعامل تمدده الحجمي K وذلك

بإبدال ρ بالعلاقة $\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + Kt}$ (الكثافة في الدرجة صفر مئوية)

فنجد :

$$(n_t - 1)(1 + Kt) = \text{ثابت} \quad (6-4)$$

لأن الجداء $\rho_0 K$ ثابت . ونرى أن قرينة الانكسار المطلقة تتناقص بتسخين المادة وتزايد تبريدها .

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 بمنحى الانتشار ، فتتغير تبعاً لذلك قرينة الانكسار من منحى لآخر . ونقول عن الوسط أنه متناح إذا كان لسرعة الضوء فيه ، وبالتالي لقرينة الانكسار ، القيمة نفسها مهما كان منحى الانتشار .

وتدل التجربة على أن الموجة الكهرومغناطيسية تحتفظ بقيمة تواترها N ، ومن ثم بقيمة دورها :

$$T = \frac{1}{N}$$

عندما تمر من وسط لآخر . 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 العلاقتين طرفاً على طرف واستقدنا 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 كسراً أي كلما كانت n كبيرة .

وتدل التجربة فوق ذلك أن سرعة الضوء في المادة , ومن ثم قرينة انكسارها , تتعلق بتواتر 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	الجليسرين	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	الماس	1.4338	الفلورين

3-6 سطح الموجة . الشعاع الضوئي . الحزم الضوئية :

ينتج مما تقدم أن دراسة علم الضوء يجب أن تتم في إطار دراسة الحركات الموجية .

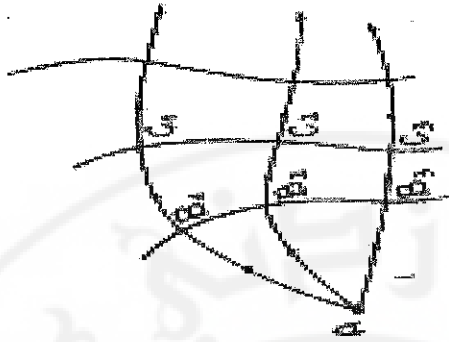
ومن أجل ذلك نعتبر منبعاً ضوئياً نقطياً يرسل في الفراغ المحيط به أمواجاً كهرومغناطيسية تتمثل كل واحدة منها لدى انطلاقها من المنبع بالتابع الجيبي للزمن t

$$E = E_0 \cos 2\pi Nt \quad (6-6)$$

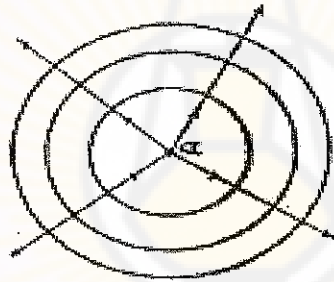
حيث يرمز E إلى قيمة المركبة الكهربائية للحقل الكهربائي . فنطلق اسم سطح الموجة على المحل الهندسي للنقاط التي يكون فيها للحقل الكهربائي قيمة واحدة في لحظة ما . ومن الواضح أنه لا يمر من نقطة معينة من الوسط سوى سطح موجة واحد ، وذلك لكي لا يكون للحقل في هذه النقطة أكثر من قيمة واحدة في لحظة معينة .

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



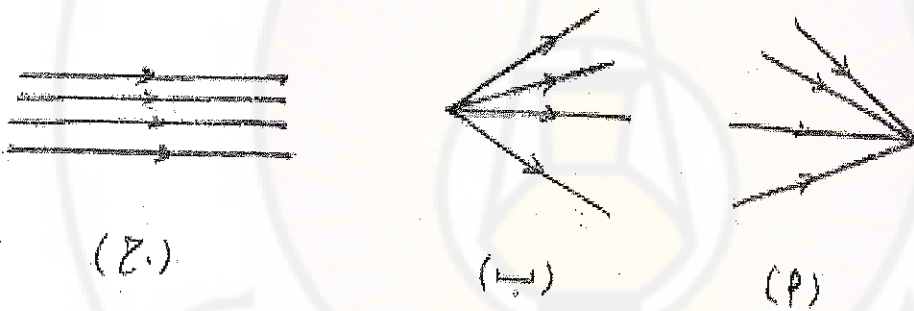
شكل 2- سطوح الموجة والأشعة الضوئية الصادرة عن منبع نقطي A في وسط متجانس و متناح .

في وسط غير متجانس وغير متناح هو شكل معقد , لأن سرعة انتشار الحقل E تختلف فيه من نقطة لأخرى ومن منحنى لآخر , بيد أن استعمال أمثال هذه الأوساط نادر جداً إن لم يكن معدوماً وذلك لقلة فائدتها العملية . ولهذا السبب لا نهتم إلا بالأوساط المتجانسة و المتناحية 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 بدلالة 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 ومتناح هي سطوح كرات متركزة على المنبع . ومن مفهوم الشعاع الضوئي يدخل مفهوم الحزمة الضوئية ، ونطلق هذه العبارة

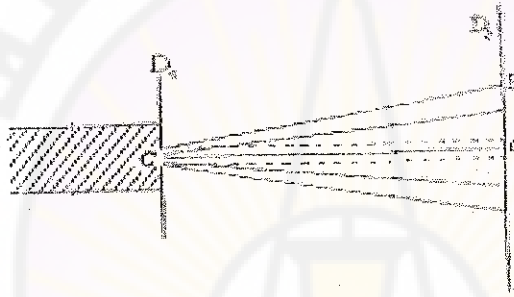


شكل 3- أنواع الحزم الضوئية (أ) متقاربة ، (ب) متباعدة ، (ج) متوازية

على مجموعة من الأشعة الضوئية المنطلقة من نقطة واحدة (حزمة مخروطية متباعدة) 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 تتقلب سطوح الموجة إلى مستويات متوازية عمودية على منحى الأشعة .

هذا وتتعين فتحة الحزمة بزوايتها الصلبة (أي بمساحة السطح الذي تقطعه الحزمة على سطح الكرة التي مركزها نقطة التقاء الأشعة ونصف قطرها يساوي واحدة الطول أو بنصف زوايتها الرأسية إذا كانت مخروطية منتظمة .

ملاحظة هامة : أن تعريف الشعاع الضوئي بالنص الذي أعطيناه هو تعريف هندسي ومن المفيد أن نذكر أنه ليس للشعاع الضوئي وجود فيزيائي (واقعي تجريبي) ذلك لأن الحصول عليه يستوجب ، مثلاً أن نقطع حزمة اسطوانة (آتية من الشمس مثلاً)



شكل 4- ظاهرة الانعراج

بحاجز D_1 (شكل 4) ذي كوة دائرية صغيرة جداً C . بيد أن تحقيق هذه التجربة يدل على أن الحزمة النافذة من الكوة تصبح مخروطية بدلاً من أن تكون اسطوانية رفيعة جداً ، وتزداد فتحة الحزمة المخروطية بتناقص مساحة الكوة ، يطلق على هذه الظاهرة اسم انعراج (حيود) الضوء ، وهي تتدخل في جميع التراكيب 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 بأن نضع على طريق هذه الأمواج حاجزاً ذا كوة صغيرة ، فنشاهد عندئذ أن الأمواج النافذة من الكوة أوسع زاوية من الأمواج الواردة عليها .

هذا وتتدخل حوادث الانعراج أيضا عندما نبذل الحاجز D_1 بقرص قائم (لا ينفذ منه الضوء) يأخذ مكان الكرة 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 المتجانسة المتناحية وذلك في سبيل تطبيق هذه القوانين على صنع وتحسين بعض الآلات الضوئية كالمجهر وآلات التصوير والنظارات الفلكية . فإذا استبعدنا وجود كوى ضيقة أو حواجز 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 المخيرية لنتائجها الحسابية :

- 1- مبدأ الانتشار المستقيم .
 - 2- مبدأ استقلال الأشعة الضوئية .
 - 3- قوانين ديكارت .
- وسنتكلم عن كل منها في فقرة خاصة .

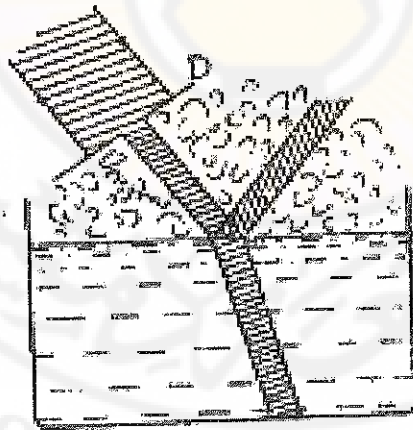
6-5 : مبدأ الانتشار المستقيم :

يجيب هذا المبدأ على السؤال التالي : إذا كنا إزاء نقطتين A و B من وسط متجانس يمر منهما شعاع ضوئي ، فما هو الشكل الهندسي للشعاع الضوئي بين هاتين النقطتين ؟ .

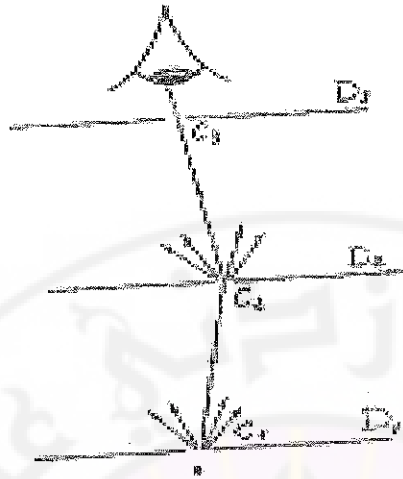
أن الشعاع الضوئي بين نقطتين من وسط متجانس هو خط مستقيم .

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 المتوغلة في الماء (ونسميها الحزمة المنكسرة) ترسم قضيباً ضوئياً مستقيماً , كما ترسم الحزمة المنعكسة قضيباً آخر نراه مستقيماً بفضل الدخان المستعمل .

ولنلاحظ هنا أيضاً أن هذا المبدأ يصبح باطلاً عندما يصادف الضوء في طريقه حواجز أو كوى صغيرة , كما تدل على ذلك تجربة الشكل (6) حيث تستطيع العين بفضل انعراج الضوء أن ترى المنبع S من خلال الثقوب الثلاثة رغم أن الثقب C_2 محروف قليلاً عن الخط المستقيم الذي يصل بين الثقوبين C_3 و C_1 . وهكذا نرى أن استبعاد أمثال هذه الثقوب والحواجز الصغيرة شرط أساسي لصحة قوانين الضوء الهندسي .



شكل 5- تجربة تبرهن على الانتشار 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 .

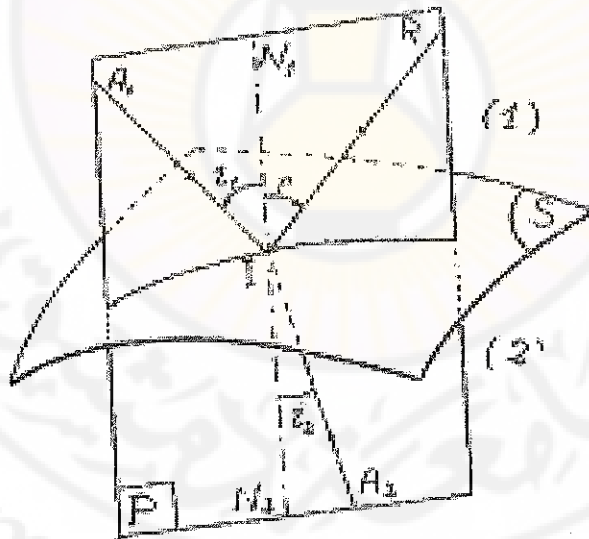
6-7 قوانين ديكارت :

سوف نفترض أن الأوساط المادية المفترضة شفافة (لا تمتص سوى جزء مهمل من الطاقة الضوئية المنتشرة فيها) ومتجانسة و متتاحة 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 AI على سطح مصقول S (شكل 7)
يفصل بين وسطين شفافين ، (1) و (2) ، قرينتا انكسارهما المطلقتان n_1, n_2
ويقطعه في النقطة I التي نسميها نقطة الورود . ولنرسم من هذه النقطة
مستقيماً N_1N_2 عمودياً على S ونسميه الناظم ، نسمي المستوي P الذي يحوي
الناظم والشعاع الوارد مستوي ورود الشعاع AI .

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 ، والآخر IA_2 يتوغل 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 . وبالطريقة نفسها
نعرف زاوية الانعكاس r وزاوية الانكسار i_2



الشكل (7)

تستهدف قوانين ديكارت تعيين 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 r تتعين بالمساواة :

$$r = -i_1 \quad (6-7)$$

ثالثاً : من أجل ضوء وحيد اللون يكون للجداء $n \sin i$ قيمة واحدة في الوسطين , أي أن زاوية الانكسار i_2 تتعين 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 جيبى 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 $n_2 > n_1$ فنجد $i_2 < i_1$) ، ينكسر مقترباً من الناظم والعكس بالعكس ، فنقول : إن الشعاع المنكسر يقترب من الناظم أو يبتعد عنه حسبما يكو الوسط الذاهب إليه أشد أو أضعف كسراً 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 صغيرة ، ويمكن عندئذ إلباس جيوب الزوايا بأقواسها وكتابة الدستور (6-8) على الشكل :

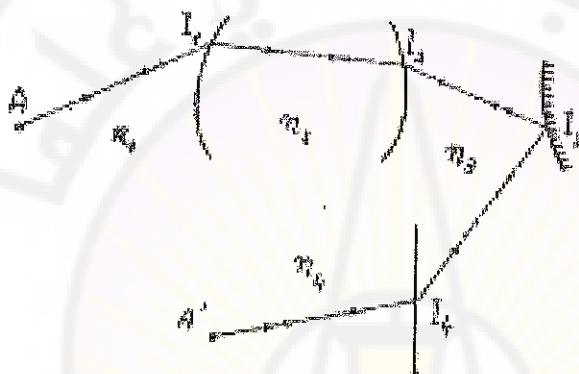
$$n_1 i_1 = n_2 i_2 \quad (6-10) \quad (i_1 \text{ صغيرة})$$

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 بقرائنها المطلقة .

6- ينتج من المساواة (6-7) أنه إذا ورد على النقطة I (شكل 7) شعاع وفق RI فإنه ينعكس حتماً وفق IA . كما ينتج من المساواة (8) أنه إذا ورد شعاع وفق A_2I فإنه ينكسر وفق IA . 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 أنه إذا انطلق من النقطة A (شكل 8) شعاع AI_1 وسلك للوصول إلى A' عبر سلسلة أوساط وسطوح عاكسة ، الطريق $A \rightarrow I_1 I_2 I_3 I_4 A'$ فإن الشعاع الذي ينطلق من A' وفق $A'I_4$ يسلك الطريق المعاكس $A' \rightarrow I_4 I_3 I_2 I_1 A$.

أن تطبيق هذا المبدأ يسهل حل كثير من المسائل في علم الضوء ويجنب المرء من ارتكاب الأخطاء ، وينتج منه مباشرة أنه إذا كنا إزاء شعاعين ينتشران في اتجاهين متعاكسين عبر سلسلة من الأوساط وكان لهما قسم مشترك فإنهما يكونان حتماً منطبقين على طول الطريق .

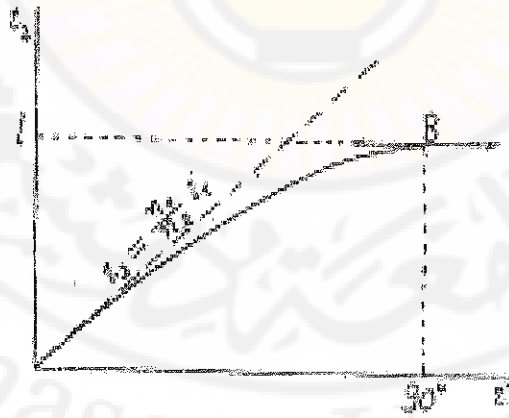
9-6 دراسة تفصيلية للانكسار . الانعكاس الكلي .

ندرس في هذا الفقرة تغيرات زاوية الانكسار بدلالة زاوية الورود ، ومن أجل ذلك نفترض أننا إزاء سطح فاصل بين وسطين يحققان دوماً المتراجحة $n_2 < n_1$ ، فنميز بهذا الصدد حالتين :

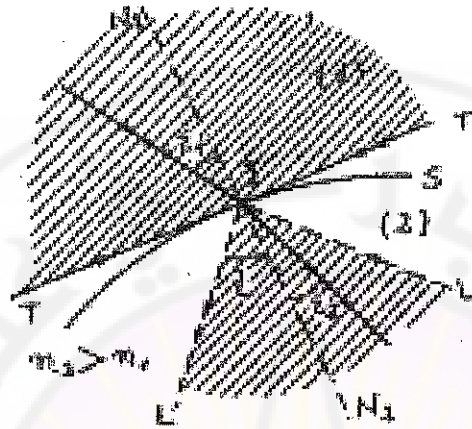
1- الضوء يتجه نحو الوسط الأشد كسراً : أي أن الشعاع الضوئي يذهب الوسط (1) إلى الوسط (2) . نلاحظ عندئذ أنه مهما كانت قيمة i_1 يوجد دوماً قيمة i_2 معطاة بالدستور :

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 < 1$$

لأن كلاً من $\sin i_1$ و $\frac{n_1}{n_2}$ أصغر من الواحد ، وهذا يدل على وجود شعاع منكسر مهما كان منحنى الورود ، فندما تتزايد i_1 من الصفر (ورود ناظمي) إلى 90°



شكل (9)



شكل 10 - زاوية الانكسار الحدي 1

(ورد مماسي) تتزايد i_2 من الصفر إلى قيمة 1 نحصل عليها من العلاقة السابقة بملاحظة أن $\sin 90 = 1$ فنجد :

$$\sin I = \frac{n_1}{n_2} \quad (6-11)$$

ونرسم منحنى الشكل (9) الذي ينطلق من نقطة الأصل O مماساً للمستقيم

(لأن هذا المستقيم يمثل تغيرات i_2 صغيرة عندما تكون i_1 صغيرة، $i_2 = \frac{n_1}{n_2} i_1$)

دستور كبلر) وينتهي بالنقطة B مماساً للمستقيم $i_2=1$ 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 ينتج أن زاوية الانكسار هي دوماً أصغر من α المعطاة بالدستور (6-11) فنقول : إذا ورد على نقطة من السطح الكاسر حزمة مخروطية ذاهبة نحو الوسط الأشد كسراً فإن جميع الأشعة المنكسرة تنحصر داخل مخروط ذروته نقطة الورود وزاويته تساوي 1 أي أن المنطقة البيضاء من الشكل (10) لا تحوي شعاع منكسر ينطلق من α وذلك مهما كانت فتحة الحزمة الواردة على α .

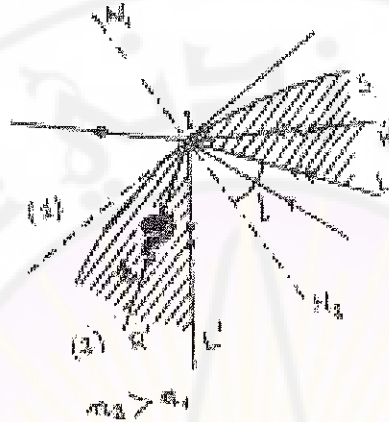
تسمى الزاوية 1 المعطاة بالدستور (6-11) زاوية الانكسار الحدي .
ولنلاحظ أخيراً على الشكل (9) أن i_2 تقترب من 1 ببطء شديد عندما تقترب i_2 من 90 .

2- الضوء يتجه نحو الوسط الأضعف كسراً : أي أن الشعاع الضوئي يذهب من الوسط (2) إلى الوسط (1) وتكون عندئذ i_2 هي زاوية الورود , وببدل مبدأ الرجوع المعكوس أن جميع الأشعة الواردة على α ضمن الزاوية 1 تنكسر في الوسط الآخر خاضعة لقانون ديكارت . وبصورة خاصة أن الشعاع L الذي يرد بالزاوية α ينفذ في الوسط (1) مماساً للسطح الكاسر وفق IT , أما عندما تكون زاوية الورود $i_2 < i_1$ فإن دستور ديكارت لا يعطي حلاً مقبولاً , لأننا نحصل عندئذ على $\sin i_1 > 1$ وهذا مستحيل .

فما يحدث إذن للشعاع الذي يرد بزاوية أكبر من α ؟

تدل التجربة فعلاً أن هذا الشعاع لا يعطي أي شعاع منكسر في الوسط الآخر وإنما ينعكس بكامله في الوسط الذي أتى منه حسب قانون ديكارت في الانعكاس , أي أن جميع الأشعة التي ترد على α ضمن المنطقة المخططة من الشكل 11 تعاني انعكاساً كلياً في الطرف الآخر من الناظم حاملة معها جميع الطاقة الضوئية التي تملكها فنقول :

أن الأشعة الزاهية نحو الوسط الأضعف كسراً إما أن تنكسر جزئياً في هذا الوسط أو أن تنعكس 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 تجرّفها الحزمة الواردة .

لنرمز إذن بـ W_t للطاقة التي تصل إلى نقطة الورد وبـ W_r و W_t للطاقتين اللتين تحملهما الحزمتان المنعكسة والنافذة في النقطة نفسها ، فيكون لدينا بموجب مبدأ انحفاظ الطاقة :

$$W_i = W_r + W_t$$

شكل 12 - تغيرات المقدرة العاكسة لسطح يغصل بين
وسطين شفافين بدلالة زاوية الورود ، (I) الضوء
يذهب نحو الوسط الأشد كسراً ، (II) 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 :

$$T = \frac{W_t}{W_i} = 1 - R$$

تدل التجربة أن قيمة R تتعلق بطبيعة الوسطين المفصولين بالسطح S وأن
تغيراتها بدلالة زاوية الورود i تتمثل بمنحنيات من الشكل 12 حيث نرى أنها
ثابتة من أجل زوايا ورود صغيرة لا تتجاوز 10 درجات وهي تخضع في هذا
المجال للدستور:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (\text{من أجل ورود شبه ناظمي})$$

وذلك مهما كانت جهة انتشار الضوء ، فلدينا مثلاً ، من أجل السطح
الفاصل بين الهواء والزجاج العادي ، $R = 0.04$ ، $T = 0.96$ ، أي أنه لا
ينعكس عن الزجاج سوى 4 في المائة من الضوء الوارد على الزجاج وروداً
شبه ناظمي . أما القسم الأكبر الباقي فيمر إلى الوسط الآخر .

ونرى أيضاً على الشكل 12 (منحنى II) أن R تقترب من الواحد عندما
يذهب الضوء نحو الوسط الأضعف كسراً بزاوية قريبة من 1 حيث يحدث

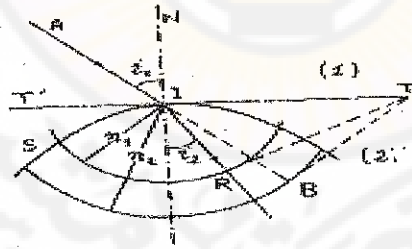
الانعكاس الكلي الذي يحمل جميع الطاقة الواردة ويختفي الشعاع المنكسر كما نرى على المنحني I أن الورود شبه المماسي يصحبه انعكاس شبه كلي مما يدل على أن الطاقة التي يحملها الشعاع IL (شكل 10) معدومة , أي أن الشعاع TI يتابع عملياً طريقه , فإذا استقبلنا الحزمة المخروطية LIL' على لوحة عمودية على الناظم فإننا نرى عليها دائرة تتناقص إنارتها من المركز حتى تنعدم في المحيط .

11-6 الإنشاء 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 بصدد الشعاع المنكسر فنكتفي بشرح الطريقتين التاليتين :

طريقة هايجنز HUYGENS

نفرض أن مستوي الورود هو مستوى الورقة (شكل 13) . لنرسم دائرتين مركزهما نقطة الورود ونصفا قطريهما n_2, n_1 , ثم لنمدد الشعاع الوارد



شكل 13 - إنشاء هايجنز

حتى يقطع دائرة الوسط الذاهب إليه (أي دائرة n_2 في هذه الحالة) في النقطة B لنرسم عندئذ من B مماساً لهذه الدائرة فيقطع المستقيم TIT' (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 الناظم لوجدنا بسهولة أن :

$$\sin i_1 = \frac{IB}{IT} = \frac{n_2}{IT}$$

$$\sin i_2 = \frac{IR}{IT} = \frac{n_1}{IT}$$

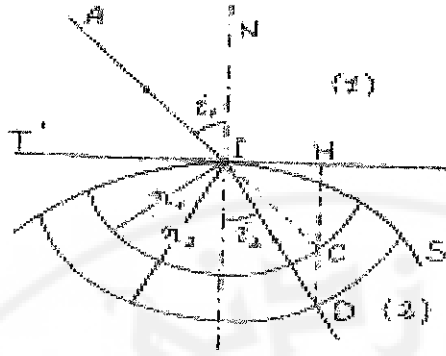
ولحصلنا بتقسيم هاتين المساواتين , طرفا على طرف , على قانون ديكارت في الانكسار .

طريقة سطوح القرينة

ننشئ 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 T'I فيقطع الدائرة الأخرى في النقطة D فنرى أن DI هو الشعاع المنكسر المطلوب , إذ لو قسمنا المساواتين :

$$\sin i_2 = \frac{IH}{ID} = \frac{IH}{n_2} \quad \sin i_1 = \frac{IH}{IC} = \frac{IH}{n_1}$$

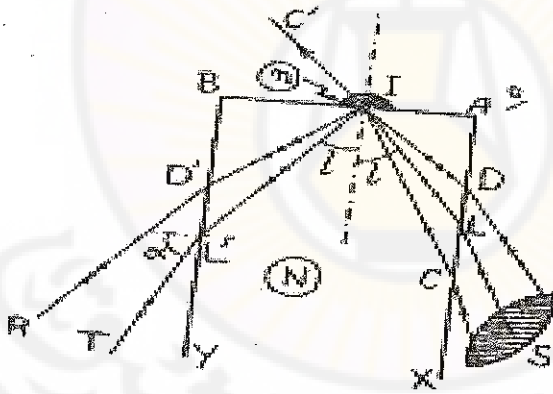
طرفا على طرف لحصلنا على القانون ديكارت في الانكسار .



شكل 14 - طريقة سطوح القرنية

6-12 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 وجوهها AD قطرة من سائل قرينة انكسارها $N > n$ فمن بين الأشعة الواردة من المنبع

الضوئي S على سطح التماس بين الزجاج والسائل توجد أشعة , مثل LI , ترد تحت زاوية الانكسار الحدي 1 وتشكل مخروطاً ذروته I وزاويته الرأسية 21 . وكل الأشعة الواردة خارج هذا المخروط , مثل DI تنعكس وتخرج من الوجه BY

أما الأشعة الواردة ضمن هذا المخروط , مثل CI , فتتخذ في السائل لتخرج وفق IC' وتكون 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 رمزنا بـ α لزاوية بروز هذا الشعاع كان لنا (بتطبيق قانون ديكارت في النقطة L') :

$$\sin \alpha = N \sin(90^\circ - I) = N \cos I = N \sqrt{1 - \sin^2 I}$$

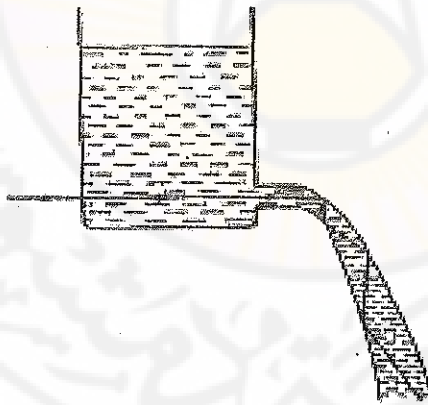
وبالاستفادة من أن $\sin I = \frac{n}{N}$ نجد العلاقة :

$$\sin \alpha = \sqrt{N^2 - n^2}$$

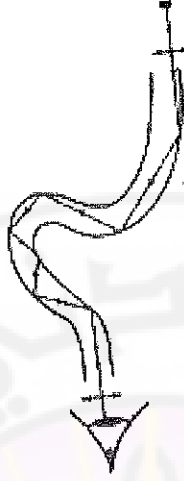
التي تسمح , بعد قياس α بوسيلة ما , بحساب إحدى القرينتين بدلالة الأخرى . ونلاحظ أن الشروط $0 \leq \sin \alpha \leq 1$ يستوجب أن تتحقق المتراجحتان $N \geq n$ (شرط الانعكاس الكلي) و $n > \sqrt{N^2 - 1}$. ويلجأ عادة إلى استعمال زجاج قرينة انكساره كبيرة ومعلومة . فمن أجل $N = 1.626$ مثلاً نجد أن هذه الطريقة تسمح بقياس قرائن انكسار السوائل المحصورة في المجال $1.202 > n > 1.626$. 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 , فتعاني , على جوانب أنبوب الماء المتدفق من ثقب الإناء , انعكاسات كلية متوالية نتيجتها أن مسير 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 تعرج السلك . ودليل الضوء كثير الاستعمال في التنظير الطبي لفحص أعضاء الجسم الداخلية كالقصبات أو المعدة ويجهز لهذا الغرض في طرفيه بعد ستين أو أكثر تُولفان مجهرأ يشكل للمنطقة المفحوصة خيالاً مكبراً تراه العين , كما يستعاض عن السلك الغليظ , لالتقاط أكبر كمية من الضوء , بمجموعة أسلاك شفافة دقيقة تشكل حبلاً طويلاً يدخل من فم المريض مثلاً نحو العضو المدروس .



شكل 16 -- نافورة ضوئية



شكل 17 - دليل الضوء

13-6 دراسة موجزة عن العين :

العين هي العضو من جسم الإنسان الذي يقوم بنقل الصور والمرئيات إلى المخ ، فيتم الإحساس بها .تسكن العين داخل جوف الحجاج في الجمجمة ويفصلها عنه وسادة شحمية تحمي العين انظر الشكل 18 ، والعين حساسة للطاقة الفوتونية في منطقة الطيف الكهرطيسي تسمى بمنطقة الطيف المنظور . وتتكون العين من قسمين هما :

ملحقات العين .

كرة العين .

ملحقات العين :

الحاجبان : يمنعان وصل عرق الجبهة إلى العينين .

الجفنان والأهداب : لتخفيف شدة الضوء الوارد إلى العينين ، وإعاقة دخول الغبار إلى العين .

الغدتان الدمعيتان : تفرزان الدموع التي تدفئ ، وترطب كرة العين وتغسلها من الغبار ، وتقودها إلى القناة الدمعية ، ثم إلى الحفرتين الأنفيتين .

الملتحمة : غشاء جلدي رقيق شفاف ، يلتصق على الوجه الأمامي للعين .

العضلات المحركة : ست عضلات أربع مستقيمة وعضلتان منحرفتان تتركز هذه العضلات من جهة على كرة العين ، ومن جهة أخرى على جدران الحجاج ، وتقوم هذه العضلات بتحريك كرتي العينين بكافة الجهات .

ب- كرة العين :

تشمل كرة العين :

1 - جدران العين .

2 - الأوساط الشفافة .

1 - الطبقات المكونة لجدران كرة العين :

وهي من الأمام إلى الخلف :

الصلبة أو البياض : واقية تتحذب من الأمام قليلاً لتشكل القرنية الشفافة ، وهي غشاء صلب ، ومقاوم سماكته 1mm ، وقرنية انكساره تختلف قليلاً عن 1.35

ب- المشيمة : طبقة غنية بالأوعية الدموية ، وجهها الداخلي اسود يجعل جوف كرة العين مظلماً ، ووجهها الأمامي مسطح يدعى القرحية ، وهو ملون بحسب الأشخاص ، وفي وسطها الحدقة وهي فتحة متغيرة القطر ، كما نجد خلف القرحية الجسم الهدبي المكون من ألياف عضلية لا إرادية ، وأوعية دموية وفي مركز طبقة القرحية هنالك ثقب يسمى الحدقة ، أو البؤبؤ وبالتالي فإن القرحية تقوم بدور حجاب الفتحة في منظومة العين الضوئية .

حيث أن هذه الفتحة يمكن أن يتغير اتساعها بواسطة عضلات موجودة في القرحية ، وتخضع لتأثير الجملة العصبية المركزية ، فتقلص هذه العضلات وانبساطها يغير فتحة الحدقة من 2-3 mm في حالة الإضاءة القوية ومن

6-8 mm في جالة الإضاءة الضعيفة , وبذلك يتم التحكم بمقدار التدفق الضوئي الساقط على العين .

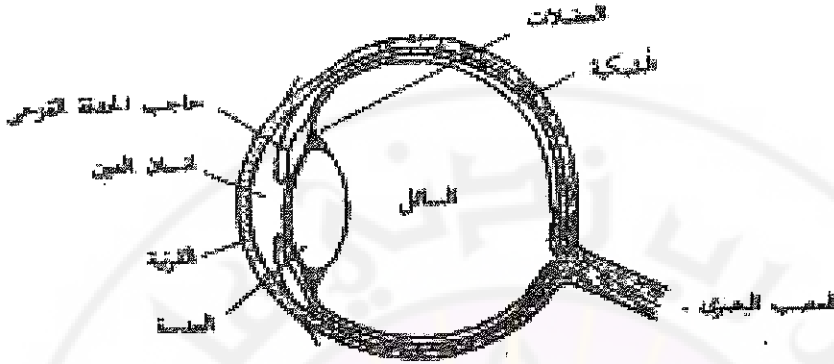
ج - الشبكية : تتألف شبكية عين الإنسان من عدة طبقات تحميها بشرة سطحية , وتضم المستقبلات الضوئية المؤلفة من المخاريط والعصييات . كما يخرج من الشبكية ألياف العصب البصري الذي يتصل بالمخ . تسمى منطقة خروج ألياف العصب البصري النقطة العمياء لخلوها من العصي , والمخاريط , وفي الشبكية انخفاض صغير مقابل للحدقة 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 والقرنية .
الجسم البلوري (عدسة العين) : عدسة محدبة الوجهين , ووجهها الخلفي أكثر تحدباً من وجهها الأمامي , يثبتها في مكانها أربطة معلقة متصلة بالجسم الهدبي .
4-الخلط الزجاجي : إن حجرة العين الخلفية مملوءة بمادة هلامية شفافة تسمى الخلط الزجاجي , حيث تلتصق هذه المادة عند قعر العين بطبقة الشبكية , التي تحتوي على مستقبلات الضوء العضوية .
وأخيراً فإن مقلة العين بكاملها , 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 .



شكل (18)

14-6 دور وبنية الشبكية :

هي الطبقة المستقبلة للضوء ، وتحتوي المستقبلات الضوئية على أصبغة حساسة ، يزول لونها بتأثير الضوء وتولد كمونات فعل تسري 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 لونها وتكون بكثافة عالية في اللوحة 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 .

15-6 المطابقة :

وهي عملية ضبط وإحكام آلي لتوضع الخيال على الشبكية وهي فعل انعكاسي ، وتنتم المطابقة بواسطة الجسم البلوري الذي يتمتع بمرونة طبيعية ، بتأثير الجسم الهديبي .

وبدراسة العمل الوظيفي للعين ، تبين أنه أثناء عملية المطابقة فإن المسافة ما بين المركز البصري ، والشبكية تبقى ثابتة ، والذي يتغير هو تحذب وجوه الجسم البلوري ، لذا فإن الجسم البلوري قادر على تغيير بعده المحرقى بحيث يستطيع إعادة الترافقات الضوئية للمستوي الجبهي الملاحظ (الجسم) ، ومستوي الشبكية (الخيال) .

فعملية المطابقة تتلخص في أن العين تقلص بعدها المحرقى لدى اقتراب الجسم منها وتمدده لدى ابتعاده عنها بحيث يرسم الخيال دوماً على الشبكية . والشكل (19) يوضح لنا حدود مطابقة العين السليمة .

كما أن قدرة العين على المطابقة تختلف باختلاف الأشخاص ، وتتناقص مع تقدم الإنسان بالعمر ، وترتبط بكمية الإضاءة ونوعيتها .

تعد حساسية العين في أعلى درجاتها من أجل ضوء وحيد اللون ، وإضاءة مقدارها 10000 لوكس .

16-6 شذوذ البصر وإصلاحه :

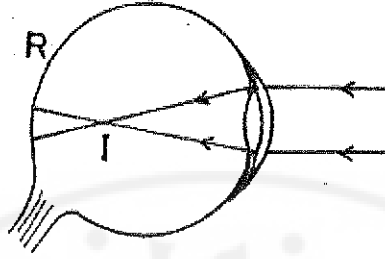
نقول عن العين أنها شاذة إذا كان محرقها الخيال F' وهي في حالة الراحة غير واقع على الشبكية والشذوذ نوعان :

العين الحسيرة (قصر النظر)

نطلق هذه الصيغة على عين يقع محرقها الخيال ، وهي مرتاحة أمام الشبكية (شكل 20) أي أن العين الحسيرة أشد تقريباً من السليمة فهي في حالة الراحة لا ترى أجسام اللانهاية بوضوح ولو طابقت لاستفحل الأمر .

ولكن إذا اقترب الجسم تدريجياً اقترب خياله من الشبكية حتى يرسم عليها ، دون مطابقة ، عندما يصبح الجسم في نقطة المدى .

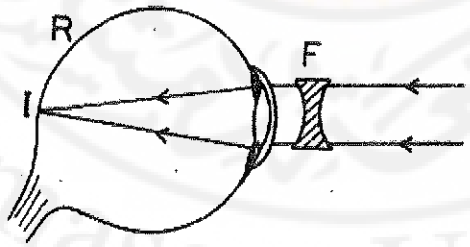
فنقطة المدى في العين الحسيرة واقعة إذن على مسافة محدودة أمام العين ، وينتج من ثبات سعة المطابقة أن نقطة الكتب أقرب أيضاً إلى العين الحسيرة منها إلى العين السليمة



شكل (20)

أي أن النقطة البعيدة لمثل هذه العين المصابة بقصر النظر تكون أقل من اللانهاية ، وكذلك تكون النقطة القريبة لها أقل من 25cm ولإصلاح التقريب الكبير للجسم البلوري ، يجب وضع عدسة مبعدة على بعد من 1 إلى 2 سنتيمتر من قرنية العين (نظارات عادية) ، 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 الأجسام القريبة .



شكل (21)

العين الطامسة (بعد النظر)

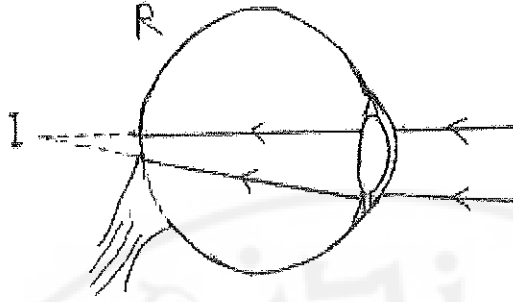
نطلق هذه الصفة على عين يقع محرقها الخيال ، وهي مرتاحة ، وراء الشبكية شكل (22) أي أن العين الطامسة أقل تقريباً من السليمة ، ويجب عليها أن تطابق لكي يعود F'' إلى الشبكية ولكي نرى أجسام اللانهاية بوضوح . أما في حالة الراحة ، ولكي يتشكل خيال حقيقي على الشبكية يجب أن يكون الجسم وهمياً وواقعاً وراء F' في نقطة معينة هي نقطة المدى حسب تعريف هذه النقطة أي أن نقطة المدى في العين الطامسة هي نقطة وهمية واقعة على مسافة محدودة وراء المحرق الخيال . وينتج أيضاً من ثبات سعة المطابقة أن نقطة الكئب 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 اللانهاية خيالات واقعة في نقطة المدى .

فإصلاح الحسر أو الطمس يتم إذن باستعمال عدسة ينطبق محرقها الخيال على نقطة مدى العين .

أي أن تقريب العدسة المصلحة يساوي $\frac{1}{\Delta}$ (حيث Δ البعد الأعظمي للرؤية

الواضحة) . فمن أجل عين حسيرة (Δ سالب) يجب استعمال عدسة مبعدة فتخفف من شدة تقريب العين وغالباً ما يستعمل هلال مبعد أما من أجل عين طامسة (Δ موجب) فيجب استعمال عدسة مقربة . فتعدل ضعف تقريب العين وغالباً ما يستعمل هلال مقرب .



شكل (22).

ح - مد البصر الشيخى (القدح)

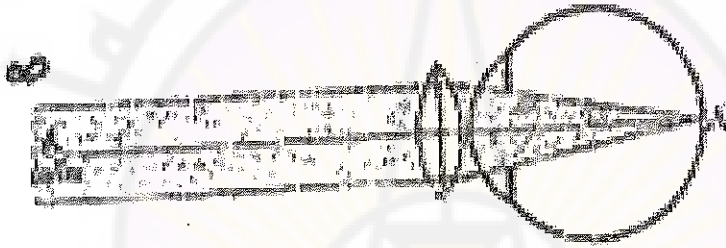
يصاب به الإنسان بعد سن (50-45) سنة حيث تقل مرونة الجسم البلوري تدريجياً مع تقدم العمر، وتفقد العضلات التي تتحكم في تحدب الجسم البلوري قوتها، لذا فإن العين تفقد تدريجياً قدرتها في المطابقة، ويعود سبب ذلك بأن نقطة المدى ثابتة، بينما نقطة الكثب تبتعد تدريجياً.

وبالتالي فإن التقدم في السن يتسبب في جميع أنواع العيوب، أي توجد عيون سليمة قاذعة، وعيون حسيمة قاذعة، وعيون طامسة قاذعة. فعندما تكون العين سليمة يجب أن نبعد الكتاب أثناء القراءة، وذلك بغية الرؤيا الواضحة. وحسير البصر إذا قدعت عينيه، يستعمل نظارات مبعدة لرؤية الأجسام البعيدة، ونظارات مقربة للقراءة.

ع- 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 قاعدة ولما كان محرق هذه العين المصابة بالساد يقع على بعد 5 أو 6 سنتيمتر خلف الشبكية، فإنها تصلح بوساطة عدسة مقربة تشكل لنقطة بعيدة B خيلاً يقع على بعد 5 أو 6 سنتيمتر خلف العين ومن ثم تقوم القرنية بكسر الأشعة المتقاربة خلف العين ، وتجمعها في B' الواقعة على الشبكية ، فترى العين النقطة B بوضوح تام انظر الشكل (23)



الشكل (23)

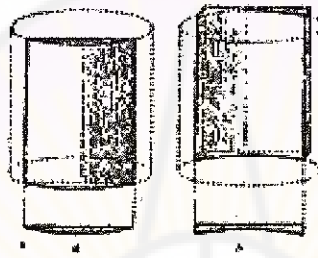
هـ- العين المتصفة بالانقطعية (العين الشوشاء)

الانقطعية هي إحدى عيوب العين ، وهي العين التي لا تشكل خيال نقطي واقع على المحور لجسم نقطي ، وسبب الانقطعية أن العين المصابة بها لا تؤلف جملة دورانية حول محورها ، أي أن السطوح التي تحدد أوساط 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 إحداها عظمى والأخرى صغرى .

فالجملة الضوئية التي تتألف منها العين المصابة بالانقطعية ، تكون متناظرة بالنسب لمستويي تناظر يمران بخط البصر ويكونا متعامدين 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 مقعرة (a) عدسة مستوية اسطوانية محدبة
عدسات اسطوانية :

الشكل (24)

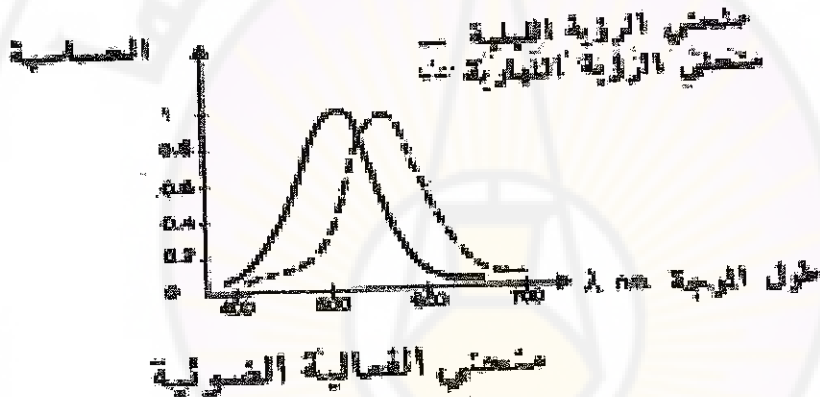
17-6 منحنى الفعالية الضوئية .

إن العين غير حساسة للأشعة فوق البنفسجية , وتحت الحمراء , بينما تمتلك حداً أعلى من الحساسية من أجل الأشعة الخضراء , ذات الأطوال الموجة 555 نانومتراً .

ونطلق على العلاقة ما بين الضوء التي تعطي الحساسية نفسها من أجل الأشعة ذات الأطوال λ والأشعة λ_m اسم معامل الفعالية الضوئية .

ويتبدل هذا المعامل عندما تتبدل λ من 400 انغستروم إلى 800 انغستروم ونلاحظ في الشكل (25) أنه يأخذ القيمة (1) عندما تكون $\lambda = \lambda_m$ ، بينما يعطي الرقم (0.5) من أجل طول موجة 500 انغستروم (الأزرق) ، وطول موجة مساوٍ 600 انغستروم (الأصفر) .

وللحصول 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)

18-6 تصنيف الآلات الضوئية ومميزاتها :

الآلات الضوئية جمل ضوئية تتألف من كواسر ومرايا (مستوية أو كروية غالباً) تستعمل للتصوير أو لفحص الأشياء الصغيرة أو الأجرام البعيدة ، وهي في معظم الأحيان جمل محورية تشكل للجسم المدروس خيلاً حقيقياً أو وهمياً تتخذ جميع الاحتياطات لتخليصه من الزيوغ حتى يكون محاكياً للجسم بقدر الإمكان . وتنتمي هذه الآلات إلى أحد الصنفين الرئيسيين التاليين :

1 - الآلات البصرية :

وتهدف إلى مساعدة العين البشرية في فحص الأشياء فتعطي للجسم المدروس خيالاً وهمياً تشكل له العين خيالاً حقيقياً على شبكيتها . وعلى هذا الأساس تتعلق مزايا هذه الآلات بخواص العين الفاحصة . وينتمي لهذا الصنف المكبرة والمجهر والنظارة الفلكية .

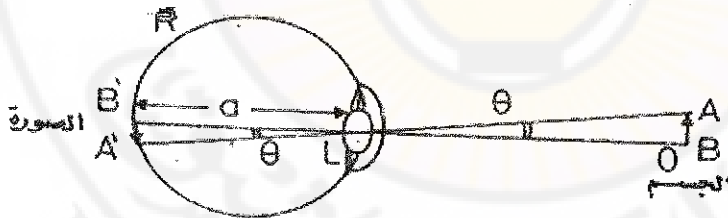
2 - آلات الإسقاط :

وتعطي للجسم المدروس خيلاً حقيقياً يستقبل على لوحة أو فلم تصويري .
وينتمي لهذا الصنف آلة التصوير وآلات الإسقاط السينمائية .

1 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) .



شکل (26)

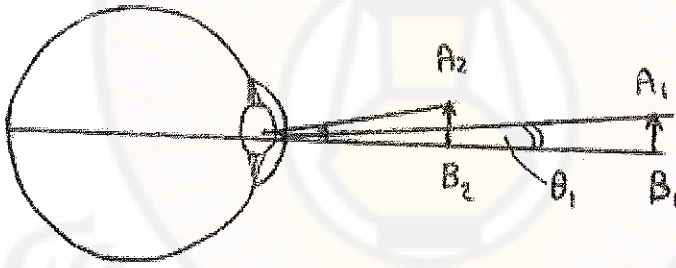
نفرض جسماً ab موضوعاً عند نقطة (O) أمام العين ، يتكون للجسم خيال $a'b'$ على شبكية العين . نفرض أن θ هي الزاوية التي يصنعها الجسم عند العين .

إذا كان قطر كرة العين A ، من الشكل (26) نجد أن :

$$\theta = \frac{a'b'}{A} \quad (6-12)$$

حيث θ تقاس بالراديان .

أي أن طول الخيال $a'b'$ على شبكية 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 الشبكية وبالتالي ازداد وضوح رؤية الجسم . وذلك ما يحدث عندما نقترّب 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 إحصار الجسم المراد رؤيته ، باستخدام مجموعة من عدسات تكون للجسم خيلاً أمام العين ، بحيث تكون الزاوية البصرية كبيرة فتراه العين بوضوح الشكل (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 نوجد تكبير الجهاز البصري من العلاقة التقريبية :

$$E \approx \frac{tg\varphi}{tg\varphi_0} \quad (6-14)$$

ج - العدسة المكبرة :

هي أحد أبسط الأجهزة البصرية ، وهي عدسة مقربة مخصصة للنظر إلى الأخيطة المكبرة لأجسام صغيرة ، يوضع الجسم المنظور بالعدسة المكبرة عادة في المستوي المحرقي 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 مستواها المحرقي شكل (28 - ب) تقع عندئذ من كل نقطة من الجسم AB على العين بعد العدسة المكبرة حزمة من الأشعة المتوازية .

فتجتمعها 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 اللانهاية , 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 عندئذ الحصول على خياله $A'B'$ على مسافة أفضل رؤيا (L). وبما أن زاوية النظر تكون في هذه الحالة أكبر بشيء ما مما كانت عليه في الحالة السابقة , لذا يكون التكبير أيضاً أعظمي :

$$E = \frac{L}{F} + 1 \quad (6-16)$$

من الشكل (27 ، حـ) نجد:

$$\tan \varphi = AB/d$$

$$E = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_0} = \frac{AB}{d} / \frac{AB}{L} = \frac{L}{d} = \frac{1}{d} L$$

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 :

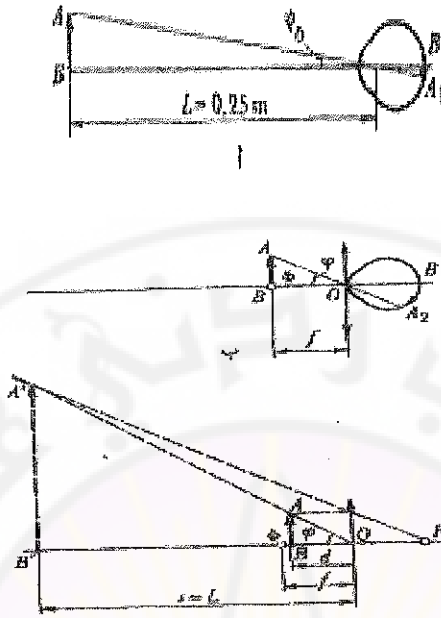
$$\frac{1}{d} = \frac{L+F}{LF}$$

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 المكبرة 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 المكبرة تتكيف العين ذاتها بسرعة على اللانهاية وهذا يعني أن تكبير العدسة المكبرة يتحدد عملياً بالمعادلة (6-15) .



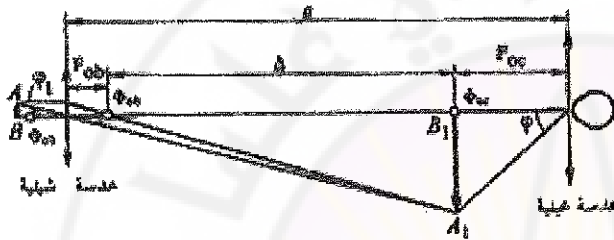
(شكل 28 أ، ب، ج -)

٤ - المجهر :

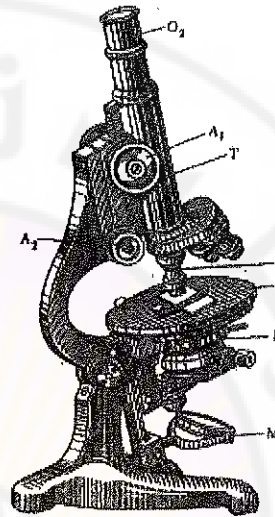
إن الجهاز الذي يمكن من الحصول على تكبير كبير عند النظر إلى أجسام صغيرة يدعى المجهر (شكل 29) ، وهو يتكون من عدستين مجتمعتين بقوة بصرية عالية . والعدسة التي يوضع أمامها الجسم تسمى عدسة جسيمية (O_1) ، والعدسة التي ينظر خلالها بالعين تسمى عدسة عينية (O_2) .

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 المرآة (M) ، ومجموعة العدسات (L) وللحصول على خيال واضح تحرك الأنبوبة بواسطة لولبي A_1 أو A_2 يبين (الشكل 30) ، مسير الأشعة داخل المجهر يوضع الجسم AB خلف المحرق الأساسي للعدسة

الجسيمية , في المحرق الأساسي تقريباً . وتركب العدسة العينية بحيث يقع الخيال المقلوب والحقيقي للجسم في محرقها الأساسي , وتعمل كعدسة مكبرة (انظر الشكل 28-ب)



شكل (30)



شكل (29)

لنوضح الآن كيف يحدد تكبير المجهر. فالشخص الذي ينظر في العدسة العينية يرى الخيال A_1B_1 بزاوية φ الشكل (30)

نجد :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 B_1}{F_{oc}}$$

$$A_1 B_1 = ((a - F_{oc}) \operatorname{tg} \varphi_1$$

وبما أن :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 \approx AB / F_{ob}$$

$$A_1 B_1 = (a - F_{oc}) AB / F_{ob}$$

لذا فإن

$$tg\varphi = \frac{A_1 B_1}{F_{oc}} = \frac{(a - F_{oc})AB}{F_{oc} \cdot F_{ob}}$$

بما أن $tg\varphi_0 \approx AB/L$ (حيث L مسافة أفضل رؤيا) .لذا فإن تكبير المجهر :

$$E = \frac{tg\varphi}{tg\varphi_0} = \frac{(a - F_{oc})AB.L}{F_{oc} \cdot F_{ob} \cdot AB} = \frac{(a - F_{oc})L}{F_{oc} \cdot F_{ob}}$$

وعند الأخذ بعين الاعتبار أن البعد المحرقي للعدسة الجسيمية صغير يمكن اعتبار المقدار $(a - F_{oc})$ مساوياً تقريباً للمسافة بين محراقي العدستين الجسيمية والعينية التي يرمز لها بـ Δ , وتسمى طول أنبوبة المجهر ويمكن عندئذ 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 :

$$E_{x1} = \frac{\Delta}{F_{ob}}$$

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 خيلاً وهمياً ومكبراً ومقلوباً للجسم المنظور , وتعطي المجاهر البصرية تكبيراً لا يزيد على 1000 مرة .

هـ - نظارة كبلر .

إن الجهاز المخصص لرصد الأجسام البعيدة التي لا يمكن تقريبها للعين يسمى النظارة الفلكية وقد صنعت أول نظارة فلكية عام 1609 م من قبل العالم الإيطالي غاليليو والعالم الألماني كبلر .

تسمى النظارة الفلكية التي يتم فيها تكبير الزاوية البصرية بواسطة عدسات نظارة كاسرة والنظارات التي يمكن فيها إدراك هذه الظاهرة نفسها بواسطة مرآيا كروية ، تسمى بنظارات عاكسة .

تتكون نظارة كبلر من عدستين مقربتين ، عدسة جسيمية وعدسة عينية والشكل (31) يبين مسار الأشعة في نظارة كبلر ، يكون للعدسة الجسيمية عادة حجم كبير ، وقوة بصرية صغيرة ، بينما تعمل العدسة العينية كعدسة مكبرة ، ينظر من خلالها إلى الخيال الذي تكونه العدسة الجسيمية ، ويتكون خيال الجسم AB عملياً في المحرق الأساسي للعدسة الجسيمية ϕ_{oc} بينما تتركب العدسة العينية بحيث يقع هذا الخيال في محرقها الأساسي ، كذلك ϕ_{oc} و بالتالي فإن المسافة بين العدستين الجسيمية والعينية تساوي مجموع المحرقين F_{oc}, F_{ob} ، أي أن طول نظارة كبلر (a) يساوي :

$$a = F_{oc} + F_{ob} \quad (6-19)$$

لنجد تكبير نظارة كبلر فالشكل (30) يبين أشعة آتية من جسم بعيد جداً ، يرى بالعين المجردة بزاوية φ_0 وعندما ينظر الإنسان إلى هذا الجسم ، خلال نظارة كبلر ، فإنه يرى في العدسة العينية خياله A_1B_1 بزاوية φ ، وبما أن

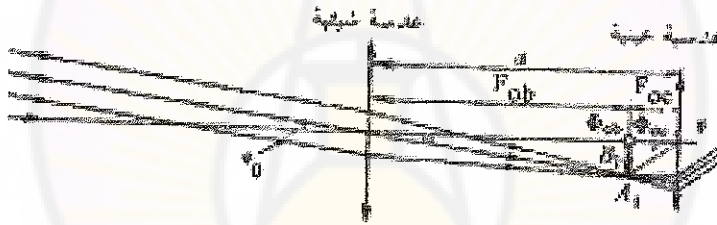
$$tg\varphi_0 = \frac{A_1B_1}{F_{oc}}$$

$$tg\varphi = \frac{A_1B_1}{F_{ob}}$$

لذا يكون تكبير نظارة كبلر :

$$E = \frac{tg\varphi}{tg\varphi_0} = \frac{A_1 B_1}{F_{oc}} / \frac{A_1 B_1}{F_{ob}} = \frac{F_{ob}}{F_{oc}} \quad (6-20)$$

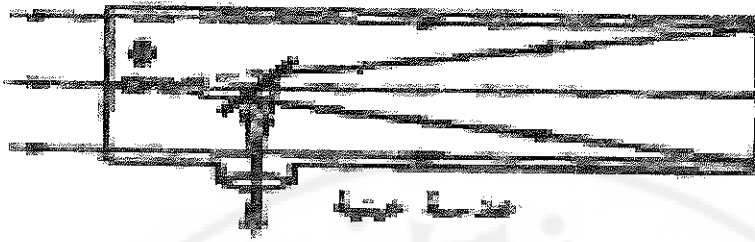
من العلاقة (6-20) ينتج أنه للحصول على تكبيرات عظيمة يجب أخذ العدسة الجسيمية لنظار كبلر بمحرق بعيد ، والعدسة العينية بمحرق قريب . والنظارة الفلكية المخصصة لرصد الأجرام السماوية تسمى المرقب وللعدسات الجسيمية في النظارات الكاسرة الحديثة قطر أكبر من المتر ، وبعد محراقي يقارب لـ 20m .



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

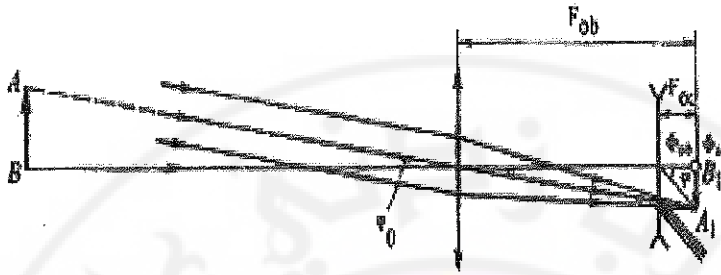
يكون خيال الجسم في نظارة كبلر مقلوب وليس لذلك أهمية في رصد الأجرام السماوية ، ولكنه غير ملائم لرصد الأجسام الواقعة على سطح الأرض لذا توضع في النظارات البصرية المخصصة للرصد على الأرض بين العدسة الجسيمية والعدسة العينية عدسة إضافية ، تتحصر مهمتها في قلب الخيال .

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) وتركب فيها العدستان الجسيمية والعينية بحيث ينطبق محرقاهما ، 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 كبلر .

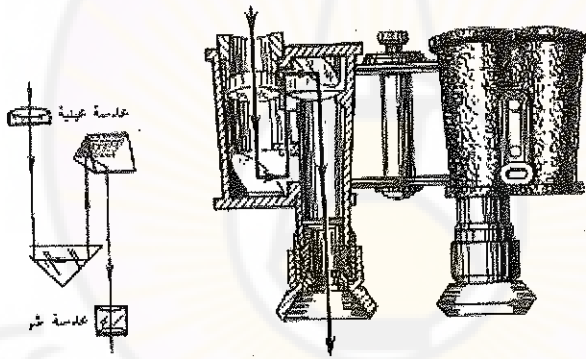
أما المنظار المسرحي فيتكون من اتحاد نظارتي غاليليو ، وهو ملائم لكونه صغير الحجم ، ويعطي المنظار المنشوري تكبيراً أكثر قوة

(شكل 34) ، وهو عبارة عن اتحاد نظارتي كبلر . ويقلب الخيال في هذا المنظار ليس بواسطة عدسة ، بل بواسطة منشورين بانعكاس كلي موجودين في

كل نظارة وبضمن هذا حجماً صغيراً للمنظار المنشوري مع تكبير عظيم
للأجسام المنظورة .



شكل (33)



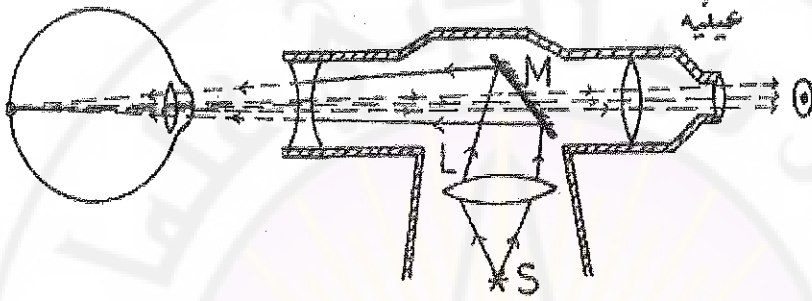
شكل (34)

ي- منظار فحص العين :

هو منظار يستخدمه أطباء العيون ، لفحص قاع العين ، والكشف عن
حالة الرؤية 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 جزؤها
الأوسط نصف مفضض وذلك ليسمح بالرؤية خلالها . تنعكس الأشعة على

المرآة M لتسقط على عدسة العين ، وتتجمع في نقطة داخل العين إذا كانت هذه النقطة على شبكية العين ترتد عليها الأشعة ، وتخرج من العين على شكل حزمة متوازية ، وتنفذ من الجزء غير المفضض ، من وسط المرآة إلى عين الطبيب ، فيرى خيال الشبكية واضحاً ومكبراً، الشكل (35) .



شكل (35)

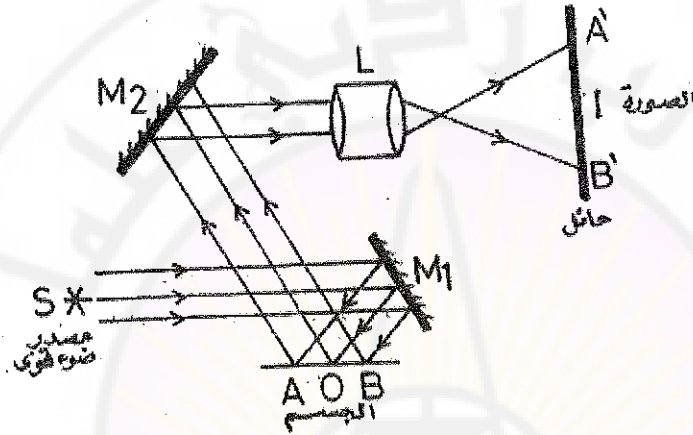
وإذا كانت العين غير سليمة ، تتجمع في نقطة قبل الشبكية في حالة قصر النظر ، وتتجمع بعدها في حالة بعد النظر ، وفي كلتا الحالتين لا يبدو خيال الشبكية واضحاً لعين الطبيب

ولإصلاح عيوب النظر (الرؤيا) ، يضع الطبيب ما يلزم من عدسات أمام عين المريض ، حتى يرى أن الأشعة قد تجمعت تماماً على الشبكية ، وبذلك على أن خيال المرئيات سوف يتكون عليها أيضاً، إذا استخدم المريض هذه العدسات ، وبذلك نرى المرئيات واضحة

ت - الإبيدياسكوب (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 الجسم (O) على مرآة ثانية M_2 ومنها ينعكس إلى عدسة (L) ، حيث يتكون بواسطتها خيال حقيقي للجسم (O) على حاجز بعيد (I) .



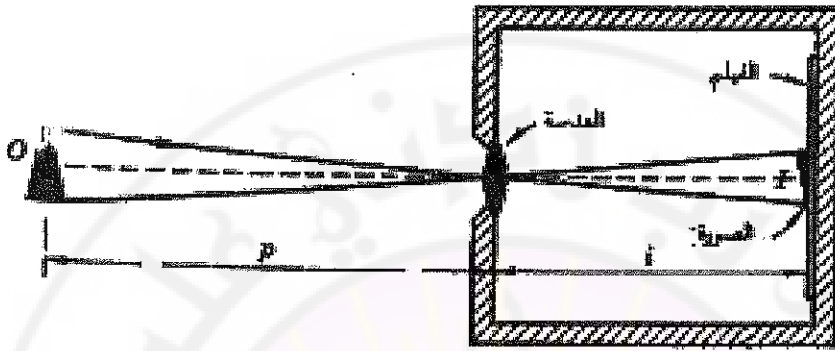
شكل (36)

2 - آلات الإسقاط

- آلة التصوير البسيطة .

تعمل آلة التصوير كالعين البشرية ، فهي تستخدم عدسة لتكوين خيال جسم ما على الفيلم والفيلم هنا يقوم مقام الشبكية في العين والشكل (37) يبين آلة تصوير بسيطة . يكون الخيال مقلوب وحقيقي 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 تحرك للأمام وللخلف حين تتغير مسافة الجسم . وآلات التصوير التي لا تمتلك عدسات متحركة يكون لديها ثقب

صغير مفتوح أمام العدسة , أي أنها تعمل كآلة التصوير ذات الثقب 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
 - ح - علم الضوء الهندسي
 - ء - ظاهرة انعراج الضوء
- 2- احسب تواتر وطاقة الفوتون البنفسجي الذي طول موجته 0.4 ميكرون يدخل شعاع بسيط في كرة شفافة متجانسة ويعاني 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 .
 - ح - الأوساط الشفافة .
 - ء - 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 الشيخي (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 كبلر , وكيف نحدد تكبير أنبوبة كبلر .
- 15- صف أنبوبة غاليلو .
- 16- صف منظار فحص العين , وكيف يصلح الطبيب بواسطته عيب 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 لا تكفي لتأيين الوسط المحيط بها , وهي طاقات منخفضة لا تسبب تلفاً مباشراً للمواد البيولوجية , وإن كانت الأبحاث 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

تبدأ ترددات الأمواج الميكروية وأمواج الراديو ν من القيمة 100 K Hz وحتى التردد 300 G Hz تقريباً وتتناسب طردي مع الطاقة - وفق العلاقة $E = h\nu$ -

إن مصادر الأمواج السابقة , هي إما طبيعية , آتية 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 طاقتها عادة في حدود 300 watt . وللامواج الميكروية

والقصيرة استخدامات متعددة. في الصناعة مثلا ,بالمسرعات الخطية , وفي اللحام , والتجفيف , وإنتاج البوليميرات 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 , والمغناطيسي لتلك الأمواج

1-1-7- التأثير البيولوجي للموجات الميكروية وموجات الراديو :

نتيجة للاستخدامات الواسعة لتلك الأمواج , تبين أن لها تأثيرات بيولوجية في جسم الإنسان .

تؤثر الموجات الميكروية , وموجات الراديو على جسم الإنسان نتيجة لا متصاص الجسم للطاقة المصاحبة تأثيرا حراريا وتأثيرا ناتجا عن المجال الكهربيسي 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 اذا استمرت هذه الزيادة , وهذا ما اثبتته التجربة التي أقيمت على أرنب .

ومن التأثيرات التي تسببها الموجات الميكروية والراديوية في الكائن الحي , عمامة العين والتأثير على الجهاز التناسلي عند الرجل , والتأثير في الأجنة , والخلايا , والكروموسومات , والغدد الصماء , والجهاز العصبي الخ.....

2-1-7- 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 :
 $0,8W.kg^{-1} \rightarrow 0,08W.Kg^{-1}$ على التوالي لكل من الجسم ككل وواحد غرام من
الأنسجة المعرضة للإشعاع من الجسم المدروس.

للموقاية من الإشعاعات الناتجة عن مصادر الموجات الميكروية والراديوية
ينبغي قياس مستوى شدة الموجات والمجالات الكهربائية والمغناطيسية المرافقة ,
من قبل أشخاص متدربين , 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 , وليس 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 , كمصانع 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 وحتى
3 ميكرو متر

ج- الأشعة تحت الحمراء ذات المجال C وتتراوح أطوال موجاتها من 3 ميكرو متر وحتى 1 ميلي 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 أصلا ببعض الأمراض . ويكون التأثير هنا ، عن طريق أكسدة الدهون المكونة لأغشية طبقة 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 ذا شدة عالية ، ويكون مركزاً على نقطة محددة على الشبكية ، ولهذا ينبغي أن تكون مدة فحص العين قصيرة جداً ، وأن لا يعطى المريض أي نوع من قطرات العين التي تسبب في زيادة اتساع حدقة العين ، ومن ثم تعطل الأثر الانعكاسي لها في حماية ذاتها .

ومن الأخطار 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 العمياء blind spot . وقد وجد أن الضرر الذي يحدث في شبكية العين يكون عند الضوء المرئي ، ذو الشدة $2,8 \times 10^4 W.Cm^2$ تقريباً.

4-1-7- الأشعة فوق البنفسجية: U.V. radiation

تقسم الأشعة فوق البنفسجية وفقاً للوكالة 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 لاتصل إلى الأرض بسبب امتصاصها الشديد ، بواسطة الغلاف الهوائي المحيط بها .

كما تتولد الأشعة فوق البنفسجية إضافة لأشعة الشمس ، من المصادر الأخرى التالية:

- 1- المصادر المتوهجة ، مثل لمبات الهالوجين الكوارتزية .
- 2- لمبات التفريغ الكهربائي الغازية ، وهي لمبات مفرغة من الهواء وتحتوي على غازات معينة تحت ضغط معين . يوضع بين طرفيها جهد كهربائي عالي ، يسبب تأيين 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 تتعدى عدة ميليمترات ، وهذه اللمبات تتميز بالشدة المناسبة لأشعتها ، مما يجعلها مثالية للأغراض الطبية المختلفة .
- 4- اللمبات الفلورية : وهي لمبات يطلّى جدارها الداخلي بمادة فلورية وتحتوي على بخار الزئبق ، الذي يصدر طيفا تحت تأثير جهد كهربائي وهذا الطيف يثير المادة الفلورية الموجودة على جدار اللبة ، مما يجعلها تولد الإشعاعات فوق البنفسجية.

5- اللمبات عديمة الأقطاب : وتحتوي هذه اللمبات على بخار الزئبق ، أو مزيج من غازات متنوعة ، حيث يثار الغاز بواسطة الطاقة الممتصة من الموجات الميكروية الساقطة عليها .

للأشعة فوق البنفسجية فوائد كثيرة ، وتطبيقات طبية عديدة تعتمد على الطول الموجي ، وفي الوقت نفسه لها تأثير ضار في الكائنات الحية ، مما ينبغي أخذ الحيطة 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 ، وتكون النتيجة إصدار عدداً أكبر من الفوتونات ذات الطاقة نفسها ، وبذلك يتم التضخيم . وتمتاز أشعة الليزر بأنها أشعة ذات كثافة طاقة عالية-وحيدة اللون monochromatic ولا تعاني من الانحراف ، وهي وحيدة الطور coherent . لذا فإن لأشعة الليزر تطبيقات عديدة في حياتنا اليومية .

تقسم أجهزة الليزر على أساس مادة إنتاجها ، إلى ليزرات غازية ، أوصلبة . 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 . وتمتاز الجراحة الليزرية عن تلك التقليدية بالميزات التالية:

1- استخدام تقنية 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 بإتلاف الأورام السرطانية ، يمكن القضاء على الخلايا السرطانية المجاورة للورم
- 6- الدقة اللامتناهية في الجراحة .

لكل نوع من الأمراض ، طول موجي ليزري خاص به، فمثلا تستخدم ليزرات النيوديموم ياج ذات الطول الموجي 515nm في مجال جراحة العيون ، وبالرغم من أن أشعة الليزر غير مؤينة ، لكن بسبب ترابطها وتركيزها يمكن أن تسبب ضررا كبيرا ، وخاصة للعين . فمثلا درجة سطوع ليزر الهيليوم - نيون ذو الطاقة 1m.W يعادل 1500 مرة سطوع لمبة الضوء العادي ذات ال 100 Watt . وبمقدار 50 مرة سطوع الشمس .

ولأشعة الليزر تأثير كبير في شبكية العين التي يفقد فيها الإنسان نعمة البصر . وبسبب خطورة أشعة الليزر ، وضعت قواعد للحماية منها ، وعلى هذا الأساس تقسم أجهزة الليزر الى أربعة أنواع كالتالي :

- 1- ليزرات ذات طاقة أقل من $0.4\mu\text{watt}$ وهي لا تمثل خطورة ، ولكن لا ينصح بتسليطها على العين أو النظر إليها لفترة طويلة .
- 2- ليزرات ذات طاقة أقل من 1mwatt وهنا 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 فترة التعرض قصيرة المدة .

3- ليزرات ذات طاقة متوسطة , أكبر من $3m.watt$ وهذه الليزرات تسبب ضررا للعين , لان تأثيرها يكون أسرع من رد الفعل الانعكاسي للعين , ولهذا ينبغي اتباع القواعد التالية :

أ- عدم تسليط الليزر الى 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 , والمستخدم في الليدار LIDAR

(لتحديد 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 تأيين ذرات المادة عند التفاعل معها , أي تحويلها إلى أيونات موجبة , وأخرى سالبة .

أنواع الإشعاع المؤين :

يقسم الإشعاع المؤين إلى قسمين رئيسيين :

1-2-7- الإشعاع الكهرومغناطيسي الصادر عن:

- المستوى الذري للمواد , مثل الأشعة السينية X-Ray

- المستوى النووي , وذلك أثناء التفكك النووي Radioactive Decay مثل

أشعة γ

2-2-7- جسيمات مشحونة ، وتشمل الإلكترونات فائقة السرعة (جسيمات β السالبة والموجبة) بالإضافة إلى جسيمات α (نوى الهليوم) والبروتونات . بالإضافة إلى الجسيمات المشحونة ، هناك جسيمات أخرى غير مشحونة، أهمها النيوترونات السريعة والبطيئة ، وكلها تتولد أثناء التفاعلات النووية .

سنتناول فيما يلي وبايجاز ، 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 الإلكترونات في مدارات الذرة المثارة . فعند انتقال الإلكترون من مدار ذي طاقة عالية إلى مدار ذي طاقة أخفض ، فإنه ينبعث منه فوتون (موجة كهرومغناطيسية) طاقته تساوي فرق طاقتي المدارين . وبما أن طاقات مدارات الذرة تختلف من عنصر لآخر . فإن ذرات العنصر الواحد تصدر أشعة

سينية بطاقات محددة القيم 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 الانكباحية :

وتصدر هذه الأشعة نتيجة لحدوث انكباح شديد للإلكترون عند تصادمه بذرة ما نتيجة لتأثير الحقل الكهربائي الخاص بتلك الذرة ، حيث يحدث للإلكترون انكباح بسبب قوى التنافر 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 الانكباحية . وهذه الأشعة يتم توليدها عادة في أنابيب الأشعة السينية المستخدمة لأغراض التشخيص الطبي وفي بعض الأغراض الصناعية .

إن طاقة الأشعة السينية الانكباحية تتفاوت في قيمتها ، حيث إنها تتولد عن المصدر نفسه إشعاعات 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 الانكباحية هو طيف مستمر ، لا يدل على العنصر الصادر منه ، وذلك بعكس الأشعة السينية المميزة .

جسيمات ألفا α : تكون جسيمات α مشحونة كهربائياً ، بشحنة موجبة ، وتتميز عن غيرها من الجسيمات المؤينة بكبر كتلتها ، وماجسيم α إلا نواة ذرة الهيليوم التي تتكون من بروتونين ونيوترونين .

تصدر جسيمات α عند تفكك بعض النظائر الأثقل من الرصاص 208 . ويحمل جسيم α طاقة محدودة 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 :

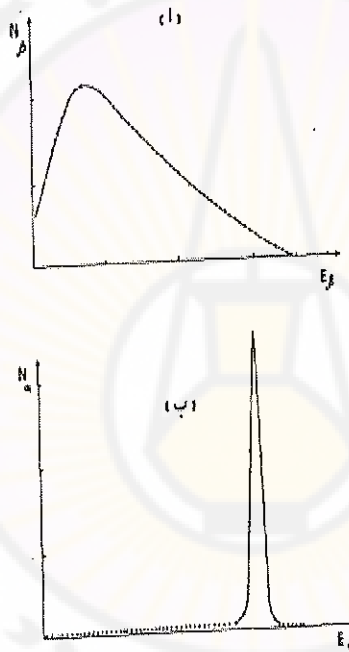
1- جسيمات بيتا السالبة β^- وهي عبارة عن إلكترونات صادرة عن النواة .

2- جسيمات بيتا الموجبة β^+ وتسمى البوزيترونات ، وكتلتها تساوي كتلة

الإلكترون أما شحنتها فموجبة .

تصدر جسيمات β بنوعيهما عند التفكك التلقائي لنوى بعض النظائر ، سواء الأخرى من الرصاص أو الأثقل منه إذا اختلفت النسبة بين عدد النوترونات والبروتونات في النواة عن نسبة معينة ، تعرف بنسبة الاستقرار ، هذه النسبة أكبر من واحد بالنسبة للنوى الخفيفة ، وتساوي 1,6 تقريبا بالنسبة لنوى العناصر الثقيلة .

تتطلق جسيمات β الصادرة عن نظير مشع ، بطاقات متفاوتة ، أي أنها تتميز بطيف مستمر للطاقة ، وهذا ما يميزها عن طيف جسيمات α . الشكل (1-6)



الشكل (1-7)

أ- العلاقة بين عدد جسيمات بيتا وطاقاتها

ب- العلاقة بين جسيمات ألفا وطاقاتها

7-2-3 إشعاعات γ

هي عبارة عن إشعاعات ذات طاقة عالية ، صادرة عن النواة ، وتنتقل هذه الإشعاعات عادة بعد انطلاق إشعاعات α أو β من النواة . فبعد تفكك النواة الأصلية (الأم) وصدور جسيمات α أو β تكون النواة الوليدة في حالة مثارة (غير مستقرة) ، وفيها كمية من الطاقة التي تنتقل 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 السيزيوم 137 ، فالمقصود أن السيزيوم يتفكك مصدرا جسيمات β ومكونا الباريوم 137 في حالة مثارة ، فيصدر عندئذ فوتون γ . وتعد اشعاعات γ بصمة من بصمات النظير الذي يصدرها . أي أنه بقياس طاقة اشعاعات γ ، يمكن التعرف بسهولة على النظير المشع الذي يصدرها .

7-2-4- النترونات :

إن النترونات ، هي أحد المكونات الرئيسة للنواة ، وهي جسيمات متعادلة الشحنة ، ولا يوجد في الطبيعة مواد مشعة تصدر النترونات . ولكن يتم صناعيا تحضير مصادر تصدر نيترونات لاستخدامها في تطبيقات عدة .

7-2-5- الآثار البيولوجية للإشعاعات المؤينة:

إن تأيين الخلايا الحية في جسم الإنسان ، إما أن يكون مباشرا ، وإما أن يكون غير مباشر . فمثلا 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 ، تتكون نوى جديدة ، فتنتقل أشعة γ التي تؤدي إلى تأيين ذرات الجسم .

هذه الإشعاعات سواء كان مصدرها خارجيا أم داخليا , كان مصدرها عن طريق التلوث الداخلي للجسم بالمواد المشعة كلها تؤدي إلى تأثير بيولوجي يؤدي الى حالات مرضية متفاوتة في خطورتها , حسب كمية الإشعاعات الممتصة , وكذلك معدل امتصاصها . وعلى هذا الأساس , تقسم التأثيرات البيولوجية للإشعاعات في الكائنات الحية إلى نوعين :

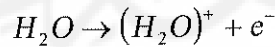
1- ذاتية **somatic** : وهي التأثيرات الناتجة في الكائن الحي نفسه, الذي يتعرض لجرعات إشعاعية كبيرة , وعادة ما تكون هذه التأثيرات حتمية أو عشوائية .

2- وراثية **genetic** : وهي التأثيرات في ذرية الكائن الحي , نتيجة للتلف الإشعاعي للخلايا الوراثية أو للأعضاء التناسلية .

6-2-7- التأثيرات الحتمية والعشوائية للإشعاع :

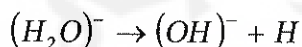
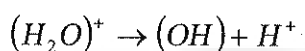
عند مرور الإشعاعات المؤينة خلال خلايا الأنسجة الحية , فإنها تؤدي إلى إتلافها , إما عن طريق تأيين مكوناتها مباشرة , أو عن طريق تأيين جزيئات محتوياتها من الماء , والذي تقوم نواتجه بعد ذلك , بإتلاف المكونات الأخرى لها. وتأيين جزيئات الماء بالخلية بواسطة الإشعاع , يحدث من خلال عدة مراحل , نوجزها بما يلي :

1- المرحلة الفيزيائية : في هذه المرحلة تنتقل طاقة الإشعاعات المؤينة إلى جزيئات الماء في الخلية حسب التفاعل التالي :

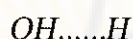
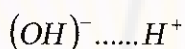


مدة هذه المرحلة لا تتجاوز $10^{-16} s$

2- المرحلة الفيزيوكيميائية : في هذه المرحلة يتم تفاعل الايونات الموجبة والسالبة , والنتيجة في هذه المرحلة (أ) مع جزيئات الماء الأخرى , فينتج عن هذا التفاعل مركبات جديدة , حسب التفاعل التالي :



وهكذا تؤدي هذه التفاعلات الكيميائية إلى النواتج :



و

توجد الأيونات H^+ و (OH) بشكل واسع في الماء المعتاد , 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 عاملا مؤكسدا قويا .

تحتاج هذه المرحلة إلى مدة لا تزيد عن 10^{-6} 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 نووية (والتي تمثل المادة الوراثية) وغيرها , يؤدي

هذا التفاعل إلى تفسير تراكيبها السلسلية الطويلة , وأحداث بعض التغيرات في الجينات .

تحتاج هذه العملية لعدة ثوان .

د- المرحلة البيولوجية: يتراوح زمن هذه المرحلة ما بين عدة دقائق , وعشرات السنين . وتكون نتيجة الآثار الإشعاعية , أما موت الخلية , أو منع , أو تأخير انقسام الخلية , أو زيادة معدل انقسام , أو حدوث تغيرات ميستديمة في الخلية , تنتقل وراثيا 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 (لمدة ساعات قليلة) وتؤدي إلى إصابته بالعديد من الأمراض الإشعاعية . ويرجع السبب في ذلك إلى تلف خلايا نخاع العظمي , أو الخلايا المعوية , أو الخلايا العصبية .

يزداد احتمال الوفاة المبكرة للإنسان بهذه الأمراض , كلما زادت الجرعة الممتصة . فإذا كانت الجرعة الممتصة في حدود 2 جر أي . فانه 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, بدءا بالجرعات الصغيرة , ويزداد احتمال حدوثها بزيادة الجرعة .

يقصد بالتأثيرات العشوائية في أمراض السرطان بأنواعه , وفي الأمراض الوراثية , في أبناء , وأحفاد المتعرضين 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 للخلية ، وعند وصول هذه التغيرات حد معين ، فإنه عند التزاوج ينشأ عنها أجنة مشوهة .

ونظرا 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 لعموم 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 أحيانا ، فله تطبيقات كثيرة جدا في الصناعة والزراعة والطب . والإشعاع المؤين مثله 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 لتفسير وتحليل ما يحدث من إحساس وتنبية في الأجسام الحية المختلفة ومن الظواهر التي تستحق الذكر هي ظاهرة سمكة ثعبان الماء التي تقتنص فريستها عن طريق الصعق الكهربائي بشحنة قد تصل إلى مئات الفولتات فمن أين لها هذه الشحنة وكيف تشكلت ، وهل يمتلك جسم الإنسان شحنات كهربائية مشابهة .

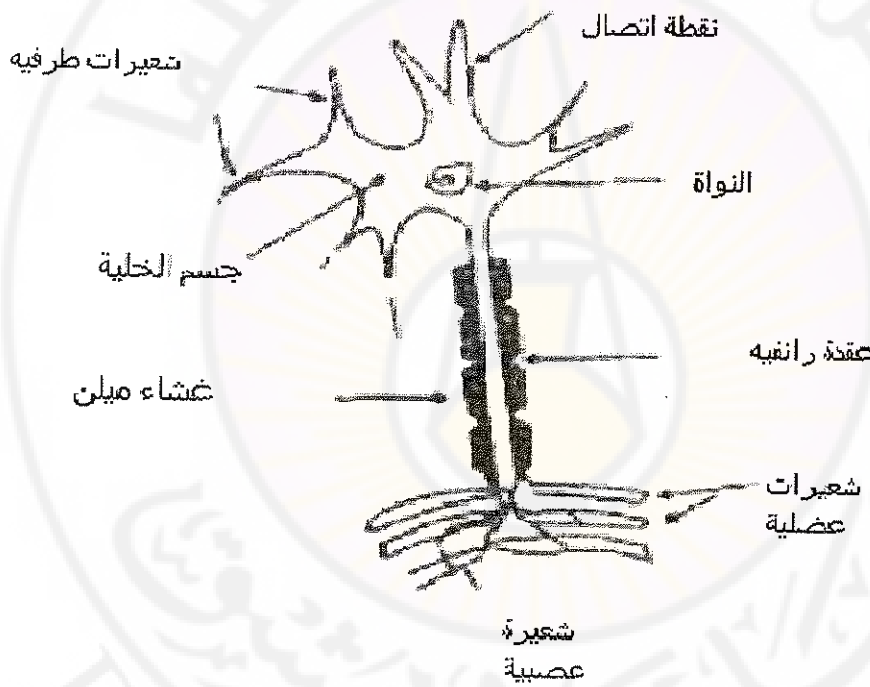
أجريت الكثير من الدراسات على جسم الإنسان بغية تسجيل نشاطاته الكهربائية ، فوجد أن للقلب نشاطا كهربائيا ، وكذلك للمخ والعضلات ، وتكون الكهرباء في هذه الحالة متحركة لأنها ترافق حركة الدم في الشرايين .

مادما نتحدث عن كهرباء متحركة في جسم الإنسان، فهذا يعني أنه يوجد أيضا كهرباء ساكنة ، و تتمثل تلك الكهربائية في استقطاب الخلايا العصبية ، نلاحظ هذا النوع من الكهربائية في خلايا مختلفة بجسم الإنسان :

أ- خلايا الجهاز العصبي المركزي (الدماغ) .

ب- خلايا الجهاز العصبي اللاإرادي 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 .

تتكون الخلية العصبية من جسم يستقبل نبضات التنبيه عن طريق نهايات توصيل تسمى نقطة الاتصال العصبية وهذه موجودة على سطح الخلية أو على أطرافها المختصة بتلقي المعلومات من الخلايا العصبية المجاورة ، كما هو موضح في الشكل رقم (1-8) فإذا كانت الإثارة كافية فإن الخلية تنتج نبضة كهربائية تصل إلى الخارج عن طريق الشعيرة العصبية المتصلة بها .



الشكل رقم (1-8) رسم تخطيطي للخلية العصبية الحركية

يمكن أن يصل طول المحوار العصبي إلى متر كامل، وهو ينقل النبضات الكهربائية (التنبيهات) إلى العضلات، أو الغدد، أو الخلايا العصبية الأخرى، ولكي نفهم تشكل النبضة العصبية، والذي يسمى الكمون الكهربائي النشط يجب علينا فهم الكمون الكهربائي الساكن.

1-8- 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 تقريبا 50 ميلي فولط، أطلق على فرق الكمون هذا، الكمون السكوني، أو الجهد الساكن للخلية أو بالاحرى كمون الغشاء، وذلك لأنه ناتج عن توزيع شحنات سالبة مركزة حول الغشاء و من الجهة الداخلية له.

2-8- مبادئ تشكل الكمون الحيوي

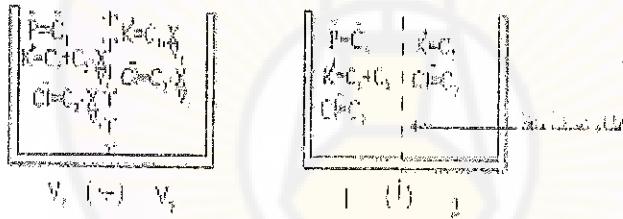
رأينا سابقا أن الخلايا العصبية، عندما تكون في حالة السكون، تكون حاملة لكمون ساكن نتيجة تراكم الشحنات السالبة على السطح الداخلي لغشائها، وهذا الغشاء الذي يحمل هذه الشحنات، يؤدي دورا أساسيا في تشكلها لما يحمله من المواصفات التالية:

أ- إن الغشاء في هذه الحالة هو نصف نفوذى، وذلك لسماحه بمرور الشوارد باتجاه وعدم سماحه بمرورها باتجاه معاكس، وذلك تبعا لحالة الخلية، إن كانت في حالة السكون أو في حالة النشاط.

ب- تركيز الشوارد في داخل الخلية يختلف عن تركيزها خارجها.

3-8- توزيع 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 بسلاسل عضوية طويلة) . في الشكل رقم (2-8 ، أ) نرى أن تركيز شوارد البوتاسيوم من الناحية اليسرى أكبر منه في الناحية اليمنى ولهذا فان الشوارد تبدأ في التحرك من الناحية اليسرى الى اليمنى كما تتحرك شوارد الكلور أيضا في نفس الوقت ليحصل التوازن في النهاية على طرفي الغشاء كما في الشكل (2-8 ، ب) نتيجة تراكم الشحنات السالبة على سطح الغشاء .



الشكل (2-8 أ ب) -أ- بداية تشكل غشاء شبه نفوذى يفصل بين وسطين مختلفي التركيز ب- الوصول إلى حالة التوازن

4-8- دراسة ترموديناميكية لكمون الغشاء السكوني :

إذا أردنا دراسة ظاهرة الغشاء وكمونه السكوني من وجهة نظر ترموديناميكية فيجب علينا البدء بدراسة الطاقة الحرة 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 الحرة اللازمة لتحريك شاردة البوتاسيوم

$$\Delta F_{cl} = RT \ln \frac{Cl_1}{Cl_2} \quad (8-2)$$

الطاقة الحرة اللازمة لتحريك شاردة الكلور

تكون الطاقة الحرة النهائية في حالة التوازن مساوية 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 النفوذية للغشاء الحي تعتمد على سماحية الانتقائية التي تعتمد دورها على تركيز الشوارد خارج غشاء الخلية، كما أن وجود شوارد $(COO)^-$ و $(NH_4)^+$ داخل الخلية يمكن أن تؤدي دوراً هاماً في سماحية الغشاء الانتقائية.

يمكن تعريف السماحية أو النفوذية الانتقائية بالعلاقة:

$$S = \frac{n_K}{n_a} \quad (8-4)$$

n_K تمثل عدد الشوارد الموجبة المارة من خلال الغشاء خلال واحدة الزمن

n_a وتمثل عدد الشوارد السالبة المارة من الغشاء خلال واحدة الزمن

فإذا كان المحلول كهربائياً 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 مساوياً :

$$Y + A$$

وبتطبيق شروط التوازن داخل وخارج الخلية فإننا نحصل على :

$$\frac{Na_1}{Na_2} = \frac{Cl_2}{Cl_1} \quad (8-5)$$

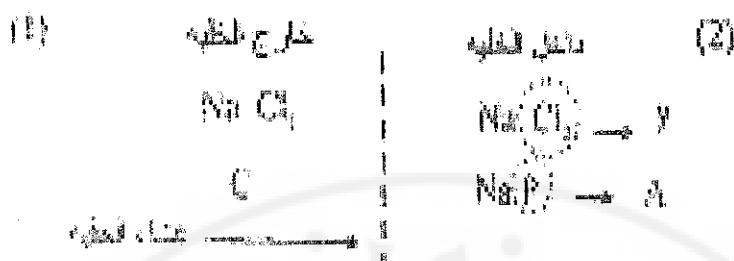
وبالتعبير عن المعادلة السابقة بالتراكيز يكون :

$$\frac{C}{Y + A} = \frac{Y}{C}$$

$$C^2 = Y(Y + A) \quad \text{أو :}$$

وبحل المعادلة السابقة عن طريق المميز نجد:

$$Y = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4C^2}}{2}$$



شكل رقم (8-3) يبين تركيز الشوارد المختلفة داخل وخارج الخلية

وبذلك يعبر عن علاقة السماحية أو النفوذية الانتقائية بأنها معدل حمل الشوارد وهذا المعدل يتناسب مع سرعة جريان هذه الشوارد (V) مضروباً بتركيزها . وبذلك تكتب العلاقة (8-4) على الشكل :

$$S = \frac{n_K}{n_a} = \frac{V_K(Y + A)}{V_a(Y)}$$

وإذا عوضنا عن Y 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 :

$$S = \frac{V_K(\sqrt{A^2 + 4C^2} + A)}{V_a\sqrt{A^2 + 4C^2} - A} \quad \text{تبين المعادلة (8-7) أن}$$

السماحية أو النفوذية الانتقائية تعتمد على تركيز شوارد المحلول الكهرليتي خارج الخلية , وعندما يكون هذا التركيز صغيرا أي $C \rightarrow 0$ فان قيمة (S) تؤول إلى اللانهاية :

$$S = \frac{2A}{0} = \infty$$

أي أن النفوذية لهذه النوعية من الشوارد تصبح لانهاية , وهذا يعني بالنسبة للنباتات , عندما تكون بحاجة إلى نوع معين من الشوارد الموجودة بتركيز ضعيف في التربة , فانه بهذه الحالة , يجب أن تكون نفوذية خلايا جذوره لهذا النوع من الشوارد كبيرا جدا 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 الحرة للانتقال ΔF في خلية كهرليتيية مكونة من مول واحد , حيث تكون :

$$\Delta F = nFE \quad (8-8)$$

n = عدد المولات , E = فرق الكمون الناجم عن انتقال الشوارد . أما F فتتمثل ثابتة فراداي .

من جهة أخرى تعطى الطاقة الحرة لتفاعل كيميائي لمول واحد من الشوارد الموجبة C_K , C_a بالعلاقة :

$$\Delta F = nEF = RTL \ln K - RTL \ln C_K C_a f^2 \quad (8-9)$$

تمثل R ثابتة الغازات العام ، T درجة الحرارة المطلقة ، K ثابتة التوازن f ثابتة التنشيط .

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 غلفانية ، وإذا تصورنا أن هناك خليتين متصلتين ببعضهما بحيث تكون الأقطاب المتشابهة متصلة ببعضها (وصل على التوازي) في هذه الحالة لا تنتقل الشوارد من خلية الى أخرى ، أما إذا كان تركيز الشوارد ، C_1 ، C_2 داخل الخليتين مختلف ، فيكون هناك جريان للشوارد ، مما يؤدي إلى نشوء قوة محرقة ، تعطى بالعلاقة :

$$E = \frac{RT}{nF} \left[\ln C_1^2 f_1^2 - \ln C_2^2 f_2^2 \right]$$

$$= \frac{2RT}{nF} \left[\ln \frac{C_1 f_1}{C_2 f_2} \right] \quad (8-12)$$

وإذا تم وصل هاتين الخليتين بغشاء نفوذى بحيث يمكن انتقال الشوارد من خلية إلى أخرى ، فإن هذا النظام يسمى بالخلية الانتقالية . ويجب إضافة حد تصحيحي إلى المعادلة يسمى بالعدد الانتقالي 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 :

$$T_a = 1 - T_K \dots\dots, T_a + T_K = 1$$

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 مساويا للصفر , وتؤول المعادلة السابقة إلى الشكل :

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1 f_1}{C_2 f_2} \quad (8-16)$$

6-8- 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 النفوذ , 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^+) مساوية 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 بتوازن دونن باستخدام تراكيز الكلور داخل الخلية (Cl_i) وخارجها (Cl_o):

$$E_{Cl} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{(Cl)_o}{(Cl)_i} \quad (8-18)$$

أو باستخدام تراكيز البوتاسيوم (K_i) داخل الخلية و (K_o) خارج الخلية على الشكل:

$$E_K = \frac{RT}{nF} \ln \frac{(K)_i}{(K)_o} \quad (8-19)$$

بالتعويض بقيمة تركيز شوارد البوتاسيوم, داخل وخارج الخلية بالنسبة لليفة العصبية للحبار, وجد أن قيمة هذا الكمون تساوي 50 ميلي 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 تركيز البوتاسيوم داخل الخلية وخارجها.

إن الكمون الساكن للخلايا سالب القيمة دائما, كما عرفنا سابقا.

إن المعادلة (8-19), تبقى صحيحة من أجل تركيز (K_o) أكبر من 4 ميلي مول / ليتر, أما من أجل تراكيز أقل, فيكون الغشاء نافذاً لشوارد البوتاسيوم

، الكلور ، والصوديوم ومن ثم يمكن تصحيح المعادلة السابقة بإدخال تراكيز الشوارد الأخرى لتأخذ الشكل :

$$E_K = \frac{RT}{F} \ln \left[\frac{P_K(K)_i + P_{Na}(Na)_0 + P_{Cl}(Cl)_0}{P_K(K)_0 + P_{Na}(Na)_i + P_{Cl}(Cl)_i} \right] \quad (8-20)$$

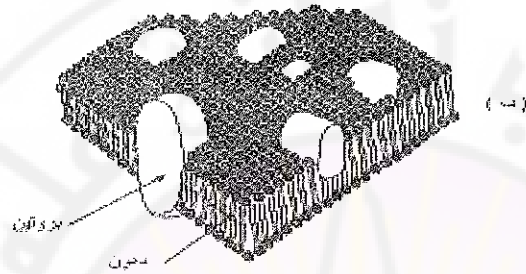
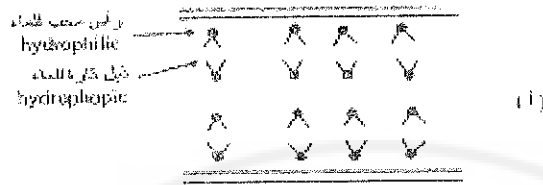
حيث، P_K ، P_{Na} ، P_{Cl} هي ثوابت النفوذية لكل من شوارد البوتاسيوم ، الصوديوم ، والكلور ، ولدى قياسها في الخيط العصبي لحبار ، وجدت القيم

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 يتخللهما بروتين ، وهذا البروتين هو المسؤول عن مرور الشوارد ، داخل وخارج الخلية ، وذلك وفق الشكل (4 - 8 أ) الذي يبين كيفية تكون طبقتي الدهون - أما الشكل (4 - 8 - ب) فيمث



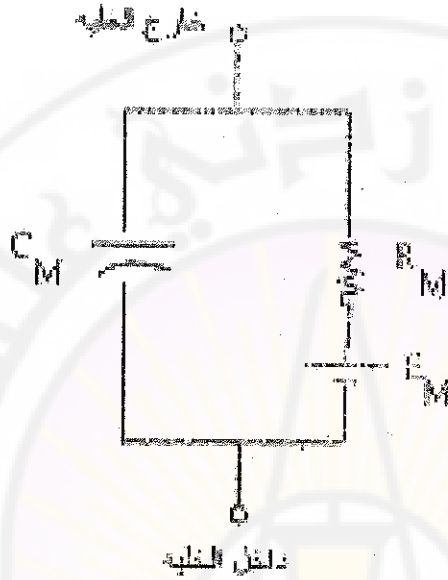
أ- نموذج (فسيفسائي) .

يبين الشكل (4-8 أ-ب) رسماً تخطيطياً لتوزع طبقتي الدهون في غشاء الخلية

ب- شكل نموذج فسيفسائي والذي يبين كيفية توزع البروتين داخل طبقات الدهون .

من الإشكال السابقة ، ونظرا لوجود الدهون بنسبة كبيرة في غشاء الخلية ، فإن هذا الشيء يعطي مقاومة كبيرة (من رتبة الميغا 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 الكهرليتي داخل الخلية وخارجها ، بذلك تكون قيمة السعة الكهربائية للغشاء تماثوي 1 ميكرو فاراد /سم² تقريبا بالنسبة لأكثر الخلايا .

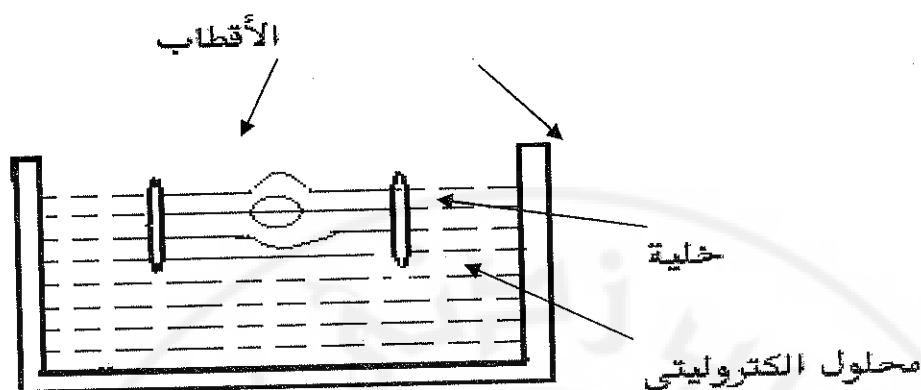
مما سبق يمكن نمذجة الخلايا على عنصرين فقط ، هما : المقاومة والسعة الكهربائية . ويمكن تمثيلها كهربائيا على شكل الدارة التالية :



الشكل (8-5) 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 كهربي محدد بلبوسي مكثفة فان هذا سيؤدي إلى مرور تيار بين اللبوسين ، يكون هذا كبيرا بين اللبوسين وضعيفا في الخلية وذلك حسب الشكل (8-6) .



الشكل (8-6) يمثل مسارات التيار الكهربائي المار في خلية محاطة بمحلول كهربي

هذه الفكرة تؤدي بنا إلى نموذج ماكسويل ، الذي درس معلقاً من البروتين والدهون في سائل كهربي ، وحسب المقاومة النوعية لهذا المعلق ، وذلك بافتراض الخلايا على شكل كرات موصلة معلقة في محلول كهربي ، والمعادلة المقترحة على الشكل

$$\frac{\frac{r_1}{r} - 1}{\frac{r_1}{r} + 2} = \oplus \frac{\frac{r_1}{r_2} - 1}{\frac{r_1}{r_2} + 2} \quad (8-21)$$

$\oplus$ = الحجم الكلي للمواد المعلقة (الخلايا)

r = المقاومة النوعية (خلايا + محلول كهربي)

r_1 = المقاومة النوعية للمحلول الكهربي

r_2 = المقاومة النوعية للمادة المعلقة (الخلايا)

قام بعض العلماء بتطوير هذا النموذج ، باقتراح معادلات أكثر واقعية ، على الشكل :

$$\Theta = \frac{\frac{r}{r_1} - 1}{\frac{r}{r_1} - 1 + F}$$

$$r = \frac{r_1 - \Theta F r_1}{\Theta - 1} \quad (8-22)$$

حيث يدعى F بمعامل التشكيل ، وقيمته أكبر من 1,5 في حال العلاقات بيضاوية الشكل .

قام العالمان كيرش وكول بتعديل المعادلة السابقة ، وذلك بعد اعتبار أن الخلايا ، لا تكون موصلة 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 ، ومحلول الخلية الداخلي والخارجي ذو مقاومة منخفضة لذا فإن المقدار r_2 يمكن أن ينقسم إلى قسمين ، الأول هو المقاومة النوعية للخلية (السيتوبلازما) r_2^+ والقسم الآخر لغشاء الخلية r_3 وهو يتعلق بمقاومة واحدة المساحة ، فإذا كان نصف قطر الخلية يساوي a فإن قيمة المقدار r_2 تصبح مساوية :

$$r_2 = r_2^+ + \frac{r_3}{a}$$

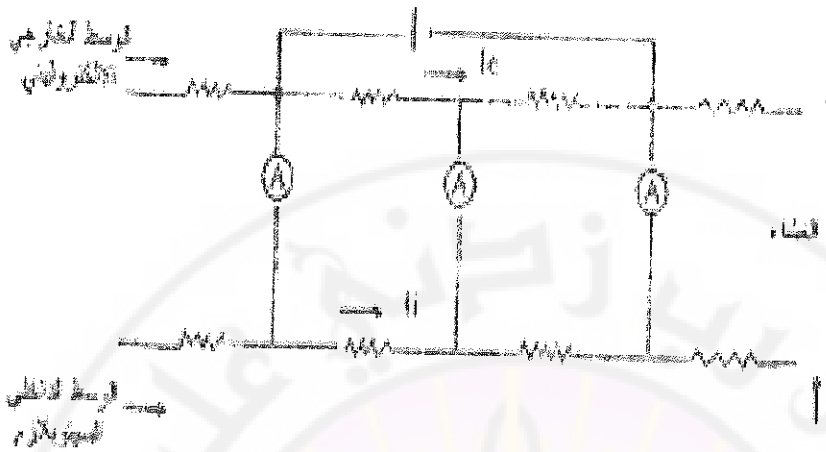
فإذا أخذنا بالتعديلات السابقة ، فإن المعادلة (8-23) تأخذ الشكل (8-24)

$$r = r_1 \frac{(1 - \Theta)r_1 + (F + \Theta)\left(r_2^+ + \frac{r_3}{a}\right)}{(1 + F\Theta)r_1 + F(1 - \Theta)\left(r_2^+ + \frac{r_3}{a}\right)} \quad (8-24)$$

بالتعويض العددي للقيم التجريبية في المعادلة السابقة نحصل على القيمة $1000 \Omega \text{ cm}^2$ للمقاومة النوعية السطحية ، أما إذا كان نصف قطر الخلية مساويا 10^{-3} cm فإن المقاومة النوعية لهذه الخلية r تساوي $10^6 \Omega \text{ cm}$

9-8- 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 رسماً توضيحياً لكيفية مرور التيار خلال الحبل العصبي (المحور)

يبين الشكل (7-8) نظاماً يسهل تحليله , إذا افترضنا أن داخل الشعرة العصبية موصلاً للتيار , وبتطبيق قانون أوم على الكمون $V_i I$ عند أي نقطة على السطح الخارجي للعصب و هي المسافة على طول العصب , R_e المقاومة لوحدة الأطوال للوسط الكهرليتي الخارجي

فان :

$$\frac{dV_e}{dX} = -I_e R_e \quad (8-25)$$

$$\frac{dV_i}{dX} = -I_i R_i$$

و

V_i = تمثل كمون السطح الداخلي للغشاء

R_i = مقاومة واحدة الأطوال لمادة السيتوبلازما

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 السيتوبلازما والمقاومة الخارجية للمحلول الكهرليتي 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 الكهرليتي خارج الحبل العصبي

r_2 المقاومة النوعية للسيتوبلازما

وبذلك تكتب المعادلة التي تعطي مقاومة الحبل العصبي على المسافة (s) بين قطبي القياس مساوية :

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} S + \frac{2r_1^2 \lambda}{(r_1 + r_2) \left(K + \text{COths} / 2\lambda \right)} \quad (8-28)$$

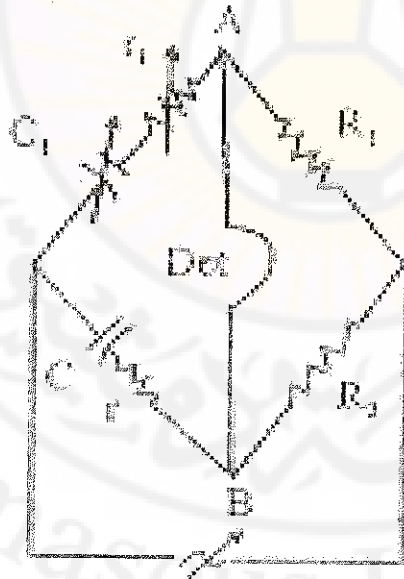
K = ثابتة تتعلق بطول الأقطاب المستخدمة , وبشكل عام يمكن القول أن المقاومة النوعية للسيتوبلازما تتراوح بين (30-300) أوم. سم بينما المقاومة النوعية السطحية لغشاء الخلية فانها تتراوح ما بين (100- 100,000) أوم. سم.

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 متناوب (AC) فإنه يظهر لنا عنصر كهربائي جديد يجب حسابه ، هو السعة الكهربائية ، وبما أن مقاومة الغشاء كبيرة ، فإن كلا من السعة (C) والمقاومة R تعيقان مرور التيار المتناوب ، ويمكن البرهان أن قيمة الممانعة الكهربائية تساوي :

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} \quad (8-29)$$

وتقاس 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 النقطتين 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 :

$$R_1 \left(r + \frac{1}{J\omega C} \right) = R_2 \left(r_1 + \frac{1}{J\omega C} \right)$$

وبتساوي الأجزاء الحقيقية نحصل على :

$$R_1 r = R_2 r_1$$

$$r = \frac{R_2}{R_1} r_1$$

وتساوي الكميات التخيلية نجد أن :

$$C = \frac{R_1}{R_2} C_1$$

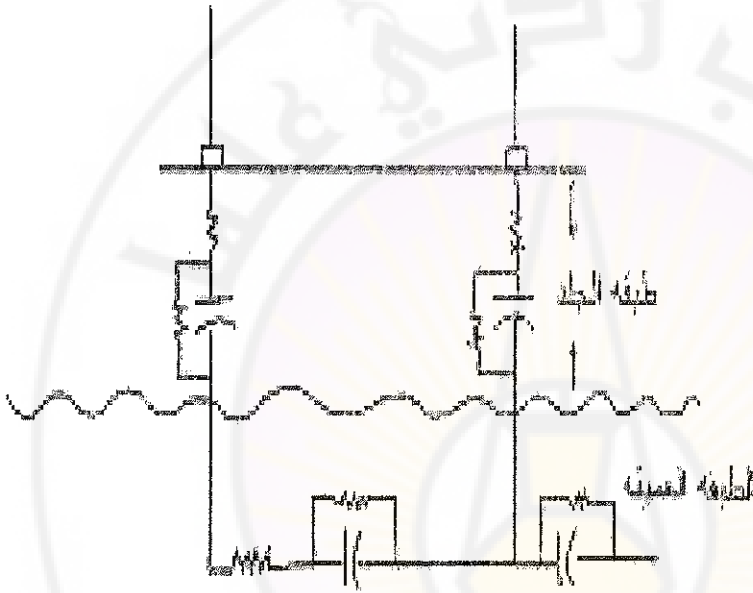
وكذلك

$$\frac{R_1}{J\omega C} = \frac{R_2}{J\omega C_1}$$

وبذلك نصل إلى الممانعة الكلية :

$$Z = \sqrt{r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \dots\dots, \tan \varphi = \frac{1}{\omega.c.r} \quad (8-31)$$

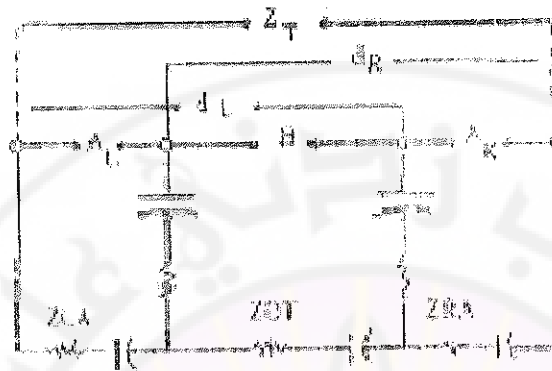
إن قياس الممانعة للأعضاء يفيد في تشخيص بعض الأمراض , كأمراض القلب مثلا , ويكون ذلك بقياس الممانعة عند قيم مختلفة لتواتر التيار , ويمكن تمثيل وضع الأقطاب عند قياس الممانعة للأعضاء الداخلية وربط ذلك بالمقاومة والسعة حسب الشكل (8-9):



الشكل (8-9) يبين نموذج للمكونات الكهربائية للأعضاء العميقة عند قياس ممانعتها .

8-10- قياس ممانعة الجسم

يمكن قياس الممانعة الكلية للجسم والأعضاء الداخلية باستخدام أربعة أقطاب , اثنان منهما على اليدين , واثنان آخران على الكتفين كما في الشكل (8-10)

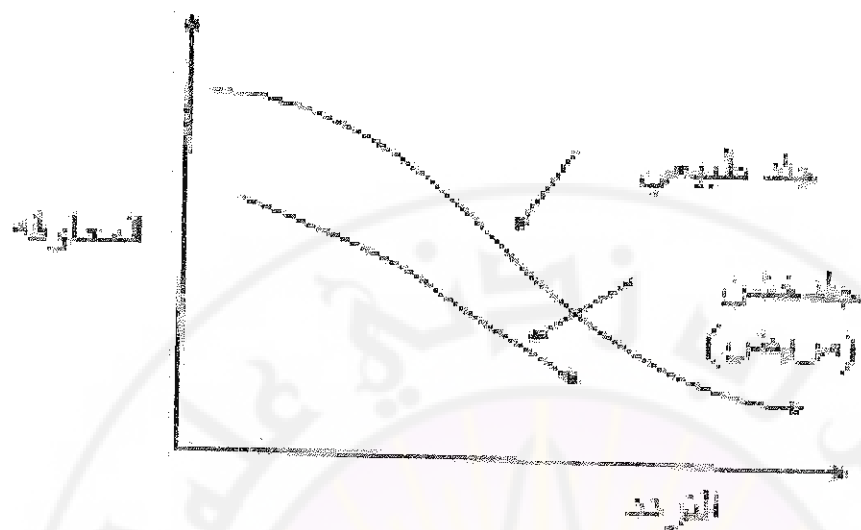


الشكل رقم (8-10) وفيه التخطيط الكهربائي المستخدم عند قياس الممانعة للأعضاء الداخلية للجسم باستخدام أربعة أقطاب

وتقاس الممانعة عادة بين اليد اليسرى والكتف الأيسر A_L ، وبين اليد اليمنى والكتف الأيمن A_R ، وبين الكتفين B ، أيضا 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 لكشف بعض الأمراض - الشكل (8-11)) يبين منحنى ممانعة جلد الإنسان عند قيم مختلفة من تردد التيار المستخدم في القياس ، وذلك لجلد سليم ، وآخر خشن نتيجة مرض معين



الشكل (8-11) يبين العلاقة بين الممانعة والتواتر لجلد إنسان طبيعي وآخر 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 الاثارات تأخذ أشكالاً مختلفة ومنها:

1-9- الإثارة الميكانيكية:

وهي خاصة بالخلايا السمعية إذ أن الأمواج الصوتية تسبب انضغاطاً وتخلخلاً في الهواء الحامل لهذه الأمواج ، وحين تصل إلى الأذن تسبب اهتزاز غشاء الطبل ، وبذلك تحدث الإثارة . كما أن الجلد يتحسس بالمشيريات الميكانيكية فيتغير شكله تحت تأثير أي قوة خارجية .

2-9- الإثارة الضوئية :

وهي تؤثر في خلايا شبكية العين فتحدث الرؤيا عند الإنسان شرط أن تكون الإثارة ضمن المجال المرئي ، وطول موجتها يقع بين $3500 \text{ \AA} \rightarrow 7500 \text{ \AA}$ ، أما الأطوال الموجية التي هي أدنى أو أعلى من هذا المجال ، فهي لا تنثير الرؤيا عند الإنسان وإنما تحدث أضراراً تختلف باختلاف المؤثر .

3-9- الإثارة الكيميائية :

المسؤول عن استقبال هذه الإثارة هي خلايا الشم , كما يمكن للجلد أن يتأثر بهذا المؤثر الكيميائي .

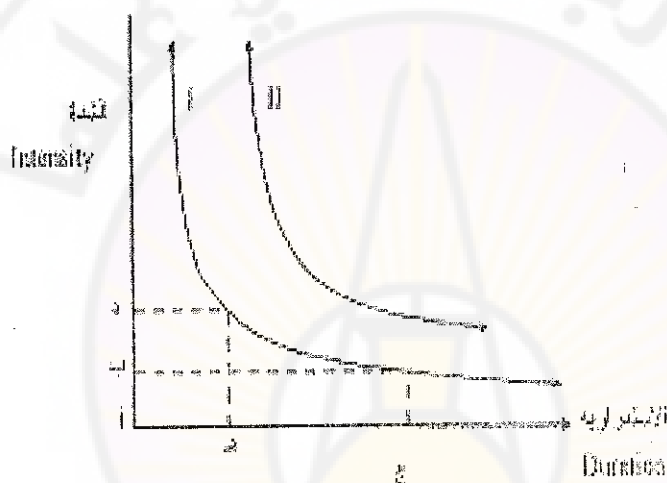
4-9- الإثارة الكهربائية :

وهذا المؤثر تتأثر به الأعصاب بشدة , ولذلك يتم استخدامه بشدة في المخابر لسهولة تواجده والتكيف 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 هنالك 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 تزداد خطياً. في الشكل رقم (1-9) أوردنا أشكال المثيرات الكهربائية المختلفة ,



الشكل رقم (1-9) 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 لصعودها 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 (ا ب) 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 تعيين هذا الزمن يمكن تحديده بدقة , لأنه يقع في الجزء المتغير من المنحني , 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 ازدادت الشدة , وبالعكس أي أنه إذا انخفضت الشدة عن قيمة محددة , فإنه مهما ازدادت الاستمرارية , فإن النسيج لا يمر إلى المرحلة الفعالة .

أما التطبيق السريري للكروناكس , فعن طريق قياسه يمكن تشخيص عمل العضلة وكفاءتها ويمثل الشكل (2-9) منحنيين الأول لعضلة سليمة (|) والآخر لعضلة مريضة (||) , يلاحظ أن الكروناكس للعضلة المريضة , يكون دائماً 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 ازدادت 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 يعطى النسيج أي فرصة للتعود , وبالعكس أي انه إذا كان التعود بطيئاً , 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 هنالك أعضاء أخرى تحتاج أن تكون خاصية التعود بطيئة , أي يمكن أن تتأثر بمثير ذي انحدار بسيط , مثال ذلك الجلد الذي يتأثر بأي ارتفاع بطيء في درجة الحرارة , فلو تصورنا أن خاصية التعود في الجلد كذلك 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 :

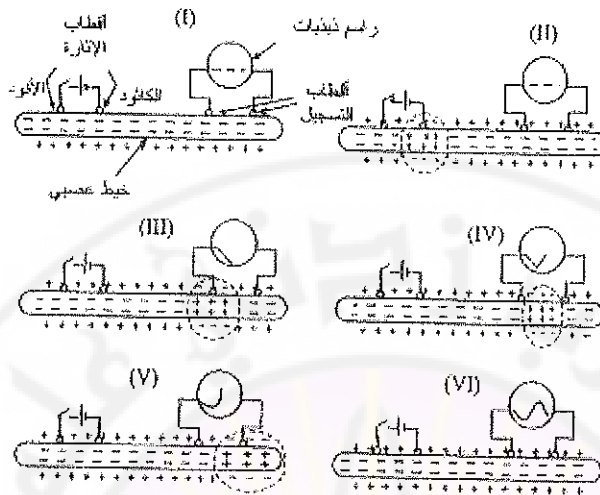
إذا تعرضت الخلية الحية , العصب , أو النسيج الحي , إلى إثارة مناسبة , فتحولت من الحالة السكونية إلى النشطة , يمكن تسجيل هذا النشاط وفق طريقتين :

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 لخييط 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 الخيط العصبي . وتوزع الشحنات على كل من سطحه الخارجي والداخلي بالإضافة إلى شكل الكمون المسجل على راسم الإهتزاز المهبطي .

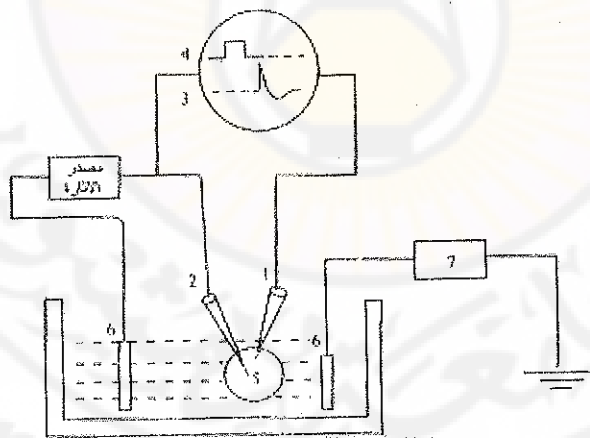
يوضح الشكل (9-3-1) وضع الأقطاب وشكل الكمون ، وهنا لا يوجد تسجيل لأي كمون لعدم توافر الإثارة التي تحدث عادة وفق قانون أنه عند إثارة النسيج بمثير كهربائي خارجي مناسب ، فإن هذه الإثارة تحدث تحت القطب المتصل بالقطب السالب للبطارية ، أما إذا كانت الإثارة من داخل الخلية ، فإن الإثارة تحدث عندما يكون القطب الموجود داخل الخلية متصلاً بالقطب الموجب للبطارية . أما في الشكل (9-3-2)

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 (9-3-3) هذا المؤشر يعود إلى وضعيته قبل التسجيل عندما تكون موجة الإثارة بين القطبين ، وذلك حسب

الشكل (3-9-17) وعندما تصل موجة الإثارة إلى قطب التسجيل الثاني ، فإن مؤشر الجهاز ينحرف إلى الأعلى كما في الشكل (3-9-7) ثم يهبط ثانية إلى وضعية البداية ، قبل الحركة بعد مرور الموجة ، وذلك حسب الشكل (3-9-71)، الجدير بالذكر أن شكل الكمون النشط الموضح بالشكل (3-9-71) يسمى بكمون ثنائي الوجه

2-5-9- طريقة التسجيل من داخل الخلية أو داخل النسيج الحي :

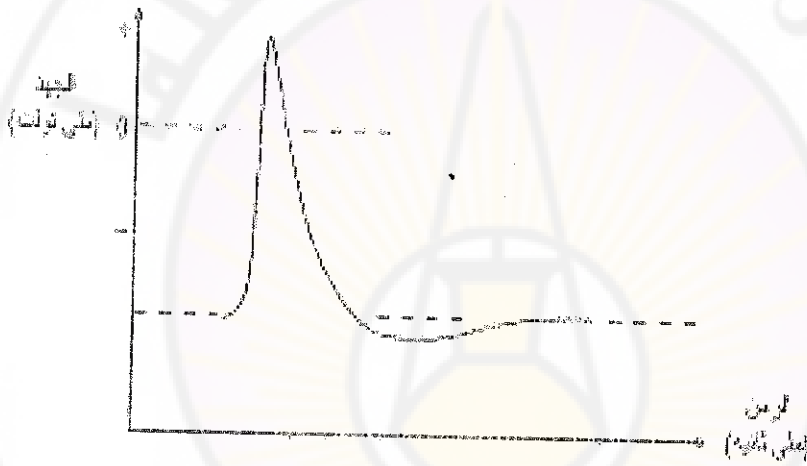
الشكل رقم (4-9) يعطينا فكرة عن طريقة قياس الكمون النشط من داخل نموذج لخلية حية ، وفيه يستخدم قطبين قطر كل منهما صغير جداً ، يبلغ حوالي $0.5\mu m$ بالنسبة لقطر الخلية الذي يبلغ نصف قطره حوالي $100\mu m$ وذلك لتفادي أي تلف لغشاء الخلية . كما نضيف أن أحد هذين القطبين يستخدم لإثارة الخلية والآخر لتسجيل هذا الكمون



الشكل (4-9) يمثل طريقة تسجيل الجهد النشط من داخل الخلية

باستخدام قطبين أحدهما للإثارة والثاني لقياس وتسجيل الكمون .

يستخدم لتسجيل هذا الكمون جهاز راسم اهتزاز ثنائي الأتنية ، 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 الاهتزاز (3) كما في الشكل (5-9) .

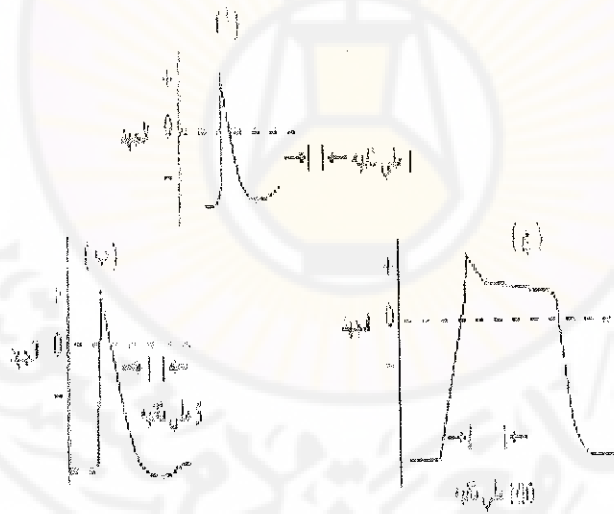


الشكل (5-9) الكمون الكهربائي النشط المسجل من داخل الخلية

3-5-9- خواص الكمون الكهربائي النشط المسجل من داخل الخلية :

بعد مرور مدة زمن التأخر من تطبيق الإثارة ، يبدأ الكمون السكوني في الإنخفاض حتى يصل إلى الصفر ثم يتجاوز به إلى قيمة موجبة ، وبعد ذلك يبدأ بالرجوع إلى سيرته الأولى (الكمون السكوني) ويتجاوز به 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 ، وأثناء هذا الزمن تقوم الخلية بإعادة توازنها الأيوني ، 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 (5-9) يكون متشابهاً لمعظم الخلايا والأنسجة الحية ، ولكنه يختلف بعضها عن البعض في قيمة السعة والإستمرارية كما هو في الشكل (6-9) 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 300msec



شكل رقم (6-9) الكمون النشط في حالة أ- الخيط العصبي ب- العضلات الهيكلية ج- عضلة القلب

4-5-9- النظرية الشاردية وأسباب تكون الكمون النشط

أجرى العالم هودجكن دراسة هدفها معرفة أسباب تحول النسيج 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 سماحيته 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 مساوية qN أما السماحية 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 عددا 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 تحتاز الغشاء وأيضا كمية الماء التي تتحد معها . الجدول رقم (1-9) يظهر الناقلية لبعض الشوارد خلال غشاء الحبار في الحالة السكونية .

الجدول (1-9) الناقلية الكهربائية لبعض الأيونات خلال غشاء الحبار

الأيون	الناقلية $\Omega^{-1} cm^{-2}$
K^{+}	37×10^{-5}
Na^{+}	1.1×10^{-5}
Cl^{-}	30×10^{-5}

مثال:

أوجد الناقلية لسنتيمتر واحد من ساق عصب حبار نصف قطره $0.25 \times 10^{-3} m$ وناقلية كهربائية قدرها $1.4 \times 10^{-3} \Omega^{-1}.cm^{-2}$

الحل:

$$g = g_m \cdot A$$

$$A = 2\pi rL = 2\pi(0.25 \times 10^{-1})cm(1cm)$$

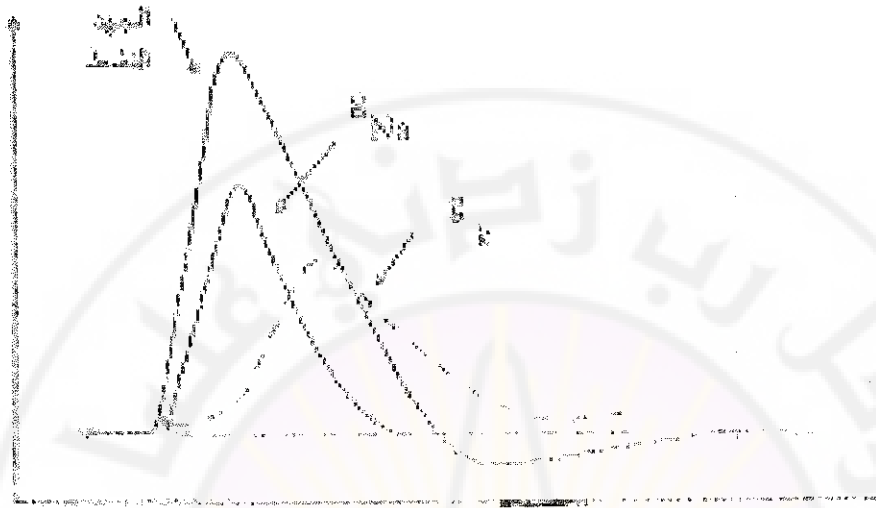
$$= 16cm^2$$

$$g = (1.4 \times 10^{-3})(0.16) = 2.2 \times 10^{-4}$$

لفهم نظرية هودجكن نسمي تراكيز أهم الشوارد داخل الخلية (i) 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 . $Na_i < Na_0$

تتلخص نظرية هودجكن كالتالي :

عند إثارة خلية حية بمثير مناسب فإن سماحية غشائها تزداد بالنسبة لشاردة الصوديوم وتنتقل نتيجة لذلك تلك الشاردة من خارج الخلية إلى داخلها، ويحدث ذلك تبعاً لتدرج التركيز لأن $Na_i > Na_0$ هذا الانتقال يحدث انخفاض في الكمون الساكن والذي بدوره يسبب مزيداً من السماحية للغشاء لإمرار شوارد الصوديوم ، وتستمر هذه الدورة حتى وصول الكمون السالب إلى قيمة الصفر ، ومن ثم إلى قيم موجبة . في نفس الوقت تتكون على الغشاء عمليات تسمى بالإخماد يكون نتيجتها وقف السماحية بالنسبة للصوديوم وبداية زيادتها بالنسبة لشاردة البوتاسيوم وذلك كما هو موضح في الشكل (7-9) 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 الإفاقة .

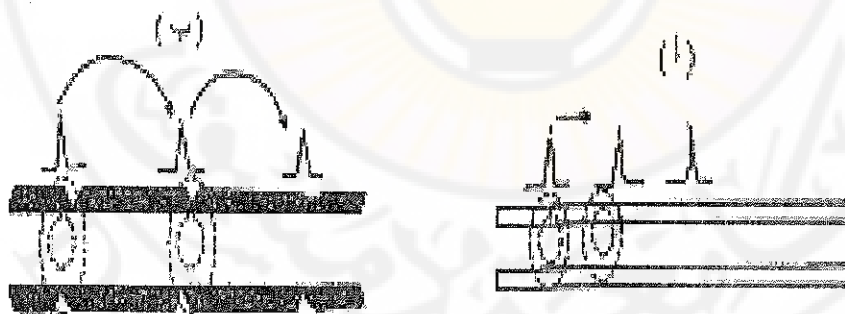
وأيضاً بعض الطاقة التي تأتي من تفكك مركب الأدينوازين ثلاثي الفوسفات.

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 وخواصه من جهة المقاومة والسعة معروف أن الأعصاب تنقسم إلى نوعين :

النوع الأول : وفي هذا النوع يكون غشاء ميلن الذي يغطي الساق سميك وتتخلله 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 والمتقطع , 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)

والمغطى (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 سنتناقص شدة هذه النبضة وتتغير خواصها بسبب مفعولات مختلفة . أما في حالة مرور النبضة العصبية خلال العصب لأن كل نبضة تولد مثيلاتها .

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 رينغير غير المغطى بطبقة 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 تتكون عند العقدة المجاورة للمثير , والنبضة العصبية المنتجة تكون بالتالي مثيراً للعقدة التالية , أي أن سريان النبضات في هذه الحالة يكون عن طريق القفز من عقدة لأخرى , وهذا ما يسمى بميكانيكية 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 وله 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 التريبيقي 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 وقطر 10 ميكرون ومساحة مقطع $1-2\text{mm}^2$ تكون سرعة مرور النبضة العصبية بها تماثل مقطعه 1000 نفس العدد من الليفة العصبية ذات الغشاء غير المغطى ومساحة cm أي تقريباً أكبر ب 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 مثلاً أما المغطى منها فموجود بالجلد .

7-9- النشاط الكهربائي وأهميته الطبية :

تتميز الخلايا والأنسجة الحية بوجود جهدين , الأول سكوني , وفي تترام 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 يتناسب تواترها مع طبيعة المؤثر . إن تسجيل هذه النبضات ودراسة خواصها من تواتر , سعة , واستمرارية يكون مهماً , 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

1-7-9- نشاط العضلات الكهربائي :

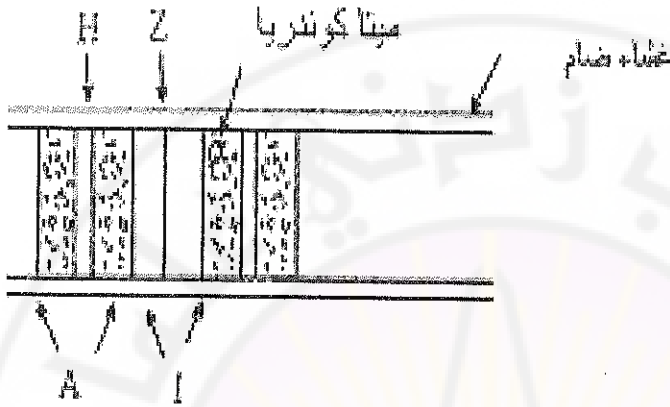
تتميز العضلات في الأجسام الحية على قدرتها في القيام بعملية الانكماش والاسترخاء ، وذلك عن طريق تكتل الخلايا القابلة للتكتل إذ أنها تقوم بتحويل الإشارة الكهربائية إلى طاقة حرارية أو ميكانيكية ، أو الاثنين معاً. يقسم علم الأنسجة ، العضلات في الأجسام المختلفة إلى عضلات مخططة وعضلات لمساء .

عندما ننظر إلى العضلات المخططة ، نجد أنها مكونة من شرائط منتشرة بشكل منتظم 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 النويات 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 I بيضاء ومنتظمة التركيب وتسمى بأقراص J أما أقراص Z فهي في منتصف الشريط I ولونها أسود . النطاق H يكون أقل تلوناً ويوجد في منتصف الشريط A .

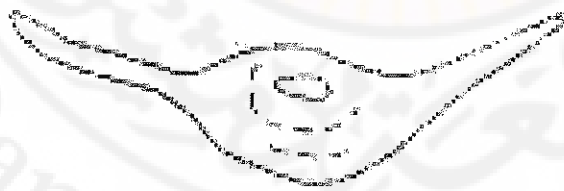
معظم العضلات المخططة تتكون من حزم كبيرة ، من هذه الشعيرة العضلية ، يتراوح قطرها من $100\mu m \rightarrow 10\mu m$ ويصل طولها إلى $100\mu m$

ومحاطة بغشاء من الأنسجة ، وبين حزم هذه الشعيرات العضلية نجد الأوعية الدموية ، والأعصاب والشعيرات الصغيرة التي تنتهي بالأوتار .



الشكل (9-9) رسم لشعيرة عضلية في عضلة مخططة

يجدر بالذكر أن انقباض العضلات المخططة ، يقلص جزء من طولها ، بينما يتغير طول العضلات الملساء عدة مرات ، ويعزى ذلك لإنزلاق خلايا العضلات الملساء بعضها على بعض وذلك حسب الشكل (9-10) .

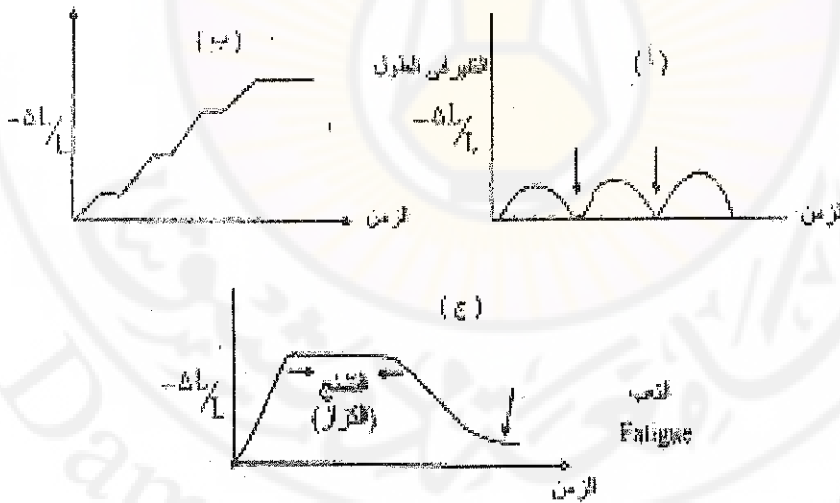


الشكل (9-10) خلية من خلايا عضلة ملساء .

الانقباض العضلي : عندما تخضع عضلة لإثارة ، فإنها تنقبض ، فإذا كانت هذه الإثارة على طولها ، انقبضت العضلة عند طول ثابت ويسمى هذا الوضع تساوي الطول .

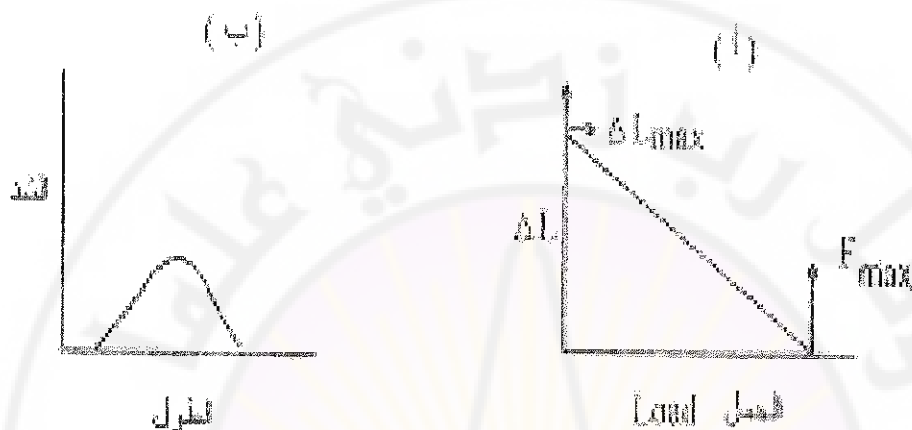
أما إذا كانت الإثارة عمودية عليها ، فإن هذا الوضع يسمى تساوي القوة .
 لدراسة هذين الوضعين نقوم باستخدام مثير كهربائي مناسب في عضلة ، فإذا كان هذا المثير مناسباً فإن العضلة سوف تسترخي وتعود إلى طولها بين فترات الإثارة ، كما هو مبين في الشكل (9-11-أ) .

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 (9-11-ج) إلى أن يحدث انهيار أو إجهاد .



الشكل (9-11) 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 (9-12 أ-ب) يوضح المنحنيات التي تظهر العلاقة بين تغير طول
 العضلة كتابع للقوة المطبق عليها



الشكل رقم (9-12 أ-ب) العلاقة الخطية بين القوة المطبقة والتغير في طول العضلة ب-
 العلاقة بين الشد في العضلة عند أطوال مختلفة .

يبين الشكل (9-12 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 :

$$W = F \Delta L$$

ويأخذ العمل الصيغة النهائية :

$$W = F \cdot \Delta L_{\max} \left(1 - \frac{F}{F_{\max}} \right)$$

هذا العمل يصل إلى نهاية عظمى عندما نأخذ التفاضل بالنسبة للقوة $\frac{dw}{dF} = 0$

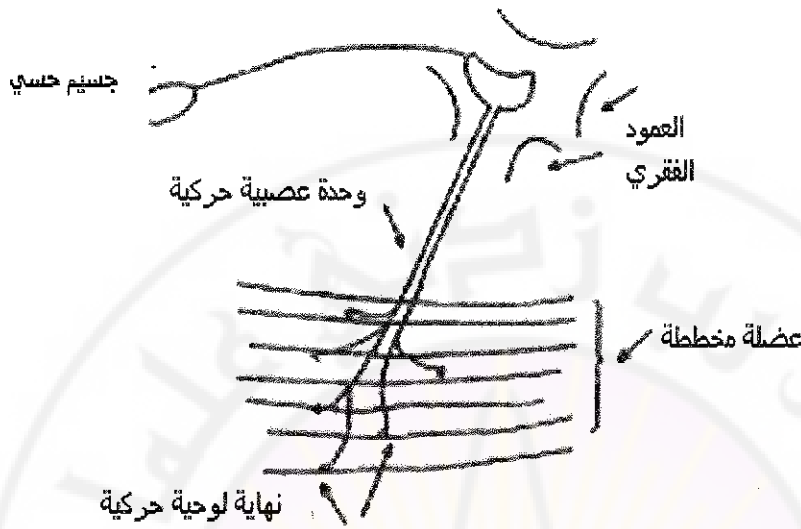
وبذلك تأخذ القوة الشكل : $F = \frac{1}{2} F_{\max}$

2-7-9- العضلة وإنتاج الحرارة

معروف 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 .

3-7-9- 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) ولكل وحدة عصبية شعيرة عصبية مكونة من عدد من الخلايا العصبية الموجودة في المخ أو في العمود الفقري وتتصل بحوالي 25.....2000 شعيرة عضلية عن طريق نهاية لوحية حركية .

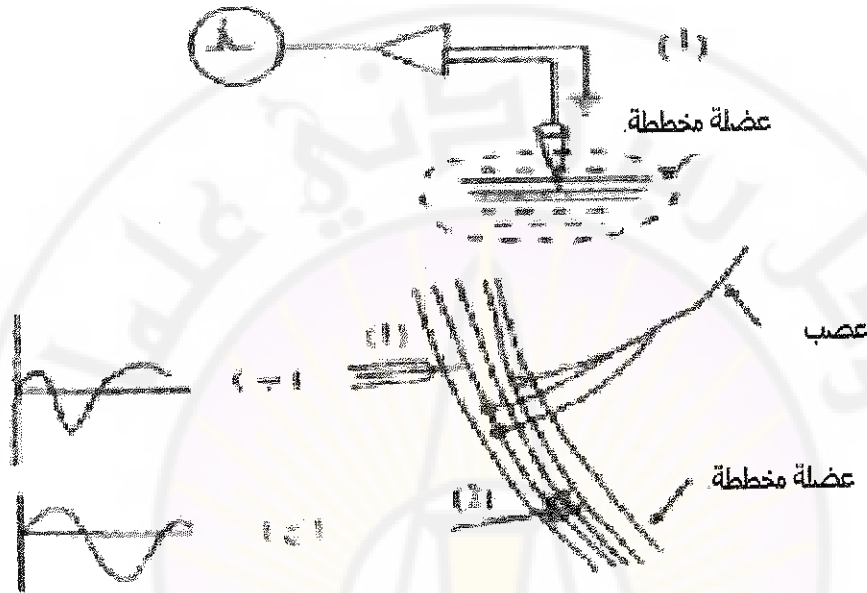


الشكل (9-13) يبين تخطيط العضلة المخططة وتشعب الوحدات العصبية الحركية داخلها واتصالها بالشعيرات العضلية عن طريق النهايات اللوحية الحركية .

تتقبض 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 تنثير الشعيرات العضلية , ومن ثم تؤدي إلى انقباضها.

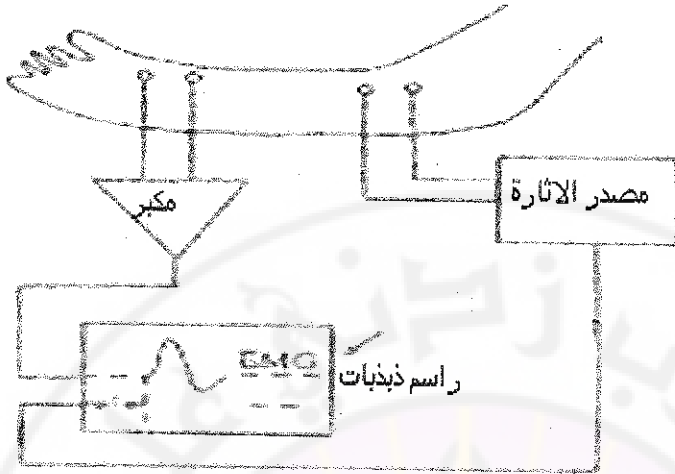
يمكن تسجيل هذا النشاط إما على مستوى شعيرة عضلية , وذلك بإدخال أقطاب صغيرة داخلها وذلك كما في الشكل (9-14-أ) وتسمى هذه بطريقة الكمون المسجل من داخل الشعيرة العصبية , أو يمكن تسجيل النشاط الكهربائي لمجموعة من الشعيرات العضلية , وفي هذه الحالة , يعتمد النشاط على قطر

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 للشعيرة العضلية باستخدام قطب متناهي الصغر ب, ج شكل النشاط الكهربائي للعضلة باستخدام نوعين من الأقطاب على شكل إبرة مزدوجة (1) وقطب سطحي(2)

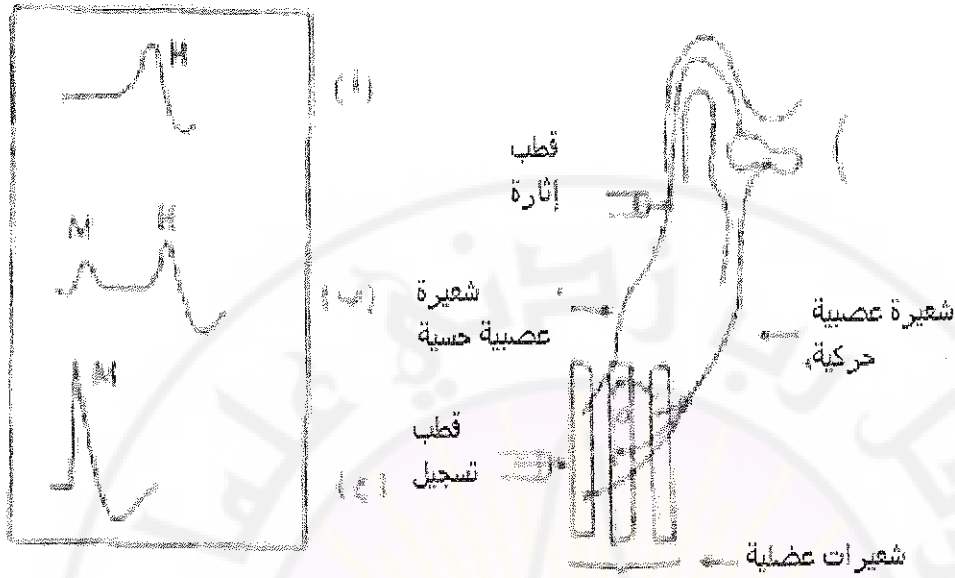
كما يمكن استخدام أقطاب للتسجيل وأخرى لإثارة الوحدة الحركية العصبية , كما في الشكل (15-9) والذي يبين كل من مصدر الإثارة الكهربائية المستخدمة وموجة استجابة العضلة التي تظهر بعد مرور زمن يدعى بزمن التأخر .



الشكل (9-15) يمثل كيفية تسجيل الإشارة عن طريق إثارة الوحدة الحركية العصبية

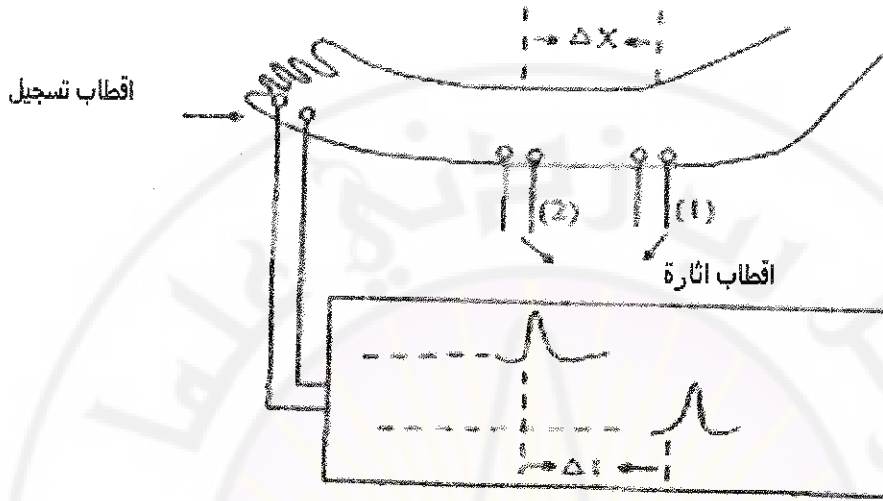
حيث يعتبر زمن التأخر هذا من الخواص المهمة التي تستخدم في تشخيص حالة العضلة وذلك بمقارنتها بعضلة سليمة .

كما يمكن إثارة الأعصاب الحسية وذلك لتشخيص التصرف الإنعكاسي الذي ينشأ من إثارة العضلة , أي أنه من الممكن تشخيص عمل الخلايا العصبية الموجودة في العمود الفقري حسب الشكل (9-16)



الشكل (16-9) التصرف الانعكاسي عن طريق إثارة الشعيرات العصبية والتسجيل من الشعيرات العضلية

يتبين من الشكل أنه عندما تكون الإثارة ضعيفة ، فإننا نحصل على الاستجابة أو النشاط الكهربائي من الشعيرات الحسية فقط (H) وليست الحركية (M) التي تتحسس 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 ألمهبطي .



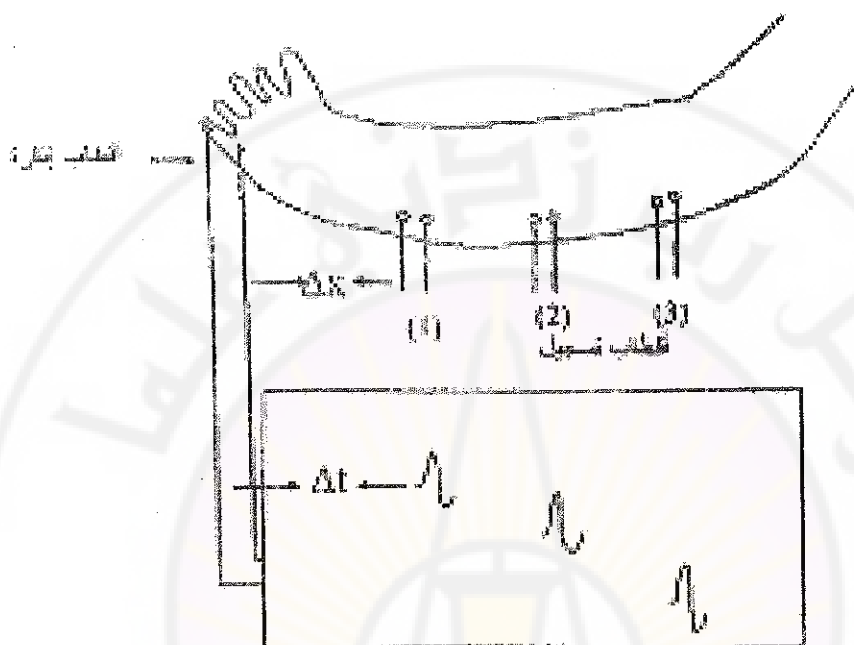
الشكل (9-17) تسجيل سرعة سريان الكمون النشط خلال الشعيرات العصبية الحركية .

ومن قياس الفترة الزمنية بين كمونين بفارق زمن Δt يمكن تحديد سرعة تأثير الكمون النشط (V) باستخدام العلاقة : $V = \frac{\Delta X}{\Delta t}$ وتقدر 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 الكمون 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
- 3- أساسيات الفيزياء
د. رأفت كامل واصف جامعة القاهرة
- 4- الفيزياء (1)
د. إبراهيم شريف جامعة بيروت العربية
- 5- فيزياء الصوت والحركة الموجية
د. أمجد عبد الرزاق كرجية جامعة الموصل
- 6- الفيزياء الطبية
د. عبد الغني قرم جامعة حلب
د. فياض حسين
د. سهيل باظة
- 7- الضوء الهندسي
د. أدهم السمان جامعة دمشق
- 8- الفيزياء للمعاهد المتوسطة المتخصصة
ل. جدانوف .غ.جدانوف دار مير موسكو
- 9- الفيزياء الحيوية (الجزء الثاني) مجلة علمية تصدرها مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية



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- Advisory 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	لا هوائي
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 الإنكباحية
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 [إيصال]
contraction	تقلص
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 المخي
characterstic peaks	القمم المميزة
chromatic aberration	الزيف اللوني
chronaxie	كرونكاس (مقياس الزمن)
ciliary muscle	العضلات الهدبية
coefficient	معامل

color blindness	عمى الألوان
communication	الاتصالات
compression	انضغاط
Compton scattering	أثر كومبتون
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	كثافة
diagram	مخطط
diatomic	ثنائي الذرة
diffusion	انتشار
distribution	توزع
dyne	دينة
daughter nucleus	النواة الوليدة

dB	وحدة قياس شدة الصوت النسبية
deceleration	تباطؤ
deep tissue	الأنسجة العميقة
dendrites	شجيرات طرفية
depth of perception	عمق الرؤية
deterministic	ختمي
diastolic	الانقباضي
diet	حمية
donnan equilibrium	توازن دونن
doppler effect	تأثير دوپلر
double phase	ثنائي الوجه
dynamic friction	الاحتكاك الديناميكي
dynamics	ديناميكيا
dynode	قطب (دينود)
-E-	
effect	فعل (مفعول)
efficiency	مردود
elasticity	مرونة
energy	طاقة
enthalpy	أنتالبية
entropy	أنتروبية
equilibrium	توازن

expansion	تمدد
ear drum	طبلة الأذن
ecposure dose	جرعة التعرض
efferent nerves	أعصاب مؤثرة
efficiency	الكفاءة
elastic scattering	تشتت مرن
elbow	المرفق
electric dipole	ثنائي القطب
electrical stimulus	الإثارة الكهربائية
electrical force	القوى الكهربائية
electrical impedance	المعاوقة الكهربائية

-F-

fluid	سائل
free energy	طاقة حرة
free path	مسار حر
friction	احتكاك
fusion	انصهار

-G-

gas	غاز
gas constant	ثابتة الغاز

-H-

heat	حرارة
(latent) heat	حرارة كامنة (لاطية)

heat conductivity

ناقلة 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

heat

الحرارة

isotropic

متماثل المناحي

-K-

kinetic energy

طاقة حركية

-L-

law

قانون

linear expansion

تمدد خطي

liquefaction

تمميع

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	مغنة طردية
parameter	وسيط
partial pressure	ضغط جزئي
particle phase	جسيم
phenomena	ظاهرة
(triple)point	نقطة ثلاثية
polyatomic	متعدد الذرات
polytropic	متعدد المناحي (بوليتروبية)
potential	كمون
process	تحول
pyrometer	بيرومتر
-R-	
reel gas	غاز حقيقي
reversible	عكوس
-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 (ترموستات)

-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 محاسنة

المدقق اللغوي :

- د. برهان أبو عسلي

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات
الجامعية