



الفيزياء العامة للمهندسين
(الجزء النظري)





منشورات جامعة دمشق

كلية الهندسة الزراعية

الفيزياء العامة

للمهندسين

(الجزء النظري)

لطلاب السنة الأولى

الدكتور

إحسان علي الموصلي

أستاذ مساعد الفيزياء

قسم العلوم الأساسية

1437 – 1438 هـ

2016 – 2017 م

جامعة دمشق



فهرس المحتويات

الصفحة	الموضوع	الفصل
11	المقدمة	
13	واحدات وأبعاد الكميات الفيزيائية	الفصل الأول
13	1-1- تمهيد	
14	2-1- تصنيف واحدات القياس	
15	3-1- الأسس العيارية للواحدات القياسية	
17	4-1- أبعاد وواحدات الكميات الفيزيائية المركبة أو المشتقة	
19	5-1- معادلات أبعاد الكميات الفيزيائية	
21	6-1- نظرية الأبعاد وتطبيقاتها	
27	7-1- قوانين نيوتن للحركة	
31	8-1- قانون الجذب العام لنيوتن	
32	9-1- إيجاد كتلة الأرض وحجمها وكثافتها	
33	10-1- تغير تسارع الجاذبية مع الارتفاع عن سطح الأرض	
35	11-1- حركة الأقمار الصناعية	
	أمثلة متفرقة	
39	تمارين ومسائل	
43	الخواص الفيزيائية للمواد الصلبة	الفصل الثاني
43	1-2- تمهيد	
44	2-2- خاصية المرونة	
44	3-2- الإجهاد	
45	4-2- الانفعال أو التشوه	
46	5-2- قانون هوك	
49	6-2- معاملات المرونة	
57	7-2- نسبة بواسون	
	أمثلة متفرقة	
61	تمارين ومسائل	

63	توازن السوائل	الفصل الثالث
63	1-3- تمهيد	
63	2-3- الكثافة	
66	3-3- الضغط في السائل	
74	4-3- دافعة أرخميدس	
76	5-3- التوتر السطحي	
	أمثلة متفرقة	
91	تمارين ومسائل	
93	ميكانيك السوائل	الفصل الرابع
93	1-4- التدفق الثابت أو التدفق المنتظم	
94	2-4- التدفق المضطرب أو التدفق الدوامي والسرعة الحرجة	
95	3-4- معادلة الاستمرار	
97	4-4- معادلة برنولي	
100	5-4- تطبيقات على معادلة برنولي	
104	6-4- اللزوجة	
	أمثلة متفرقة	
115	تمارين ومسائل	
119	الحالة الغازية وقوانينها الأساسية	الفصل الخامس
119	1-5- تمهيد	
120	2-5- الغازات المثالية وخواصها	
121	3-5- القوانين التجريبية للغازات المثالية	
127	4-5- معادلة الحالة للغازات المثالية	
129	5-5- المعنى الفيزيائي لثابت الغازات R	
	أمثلة متفرقة	
135	تمارين ومسائل	
137	النظرية الحركية للغازات	الفصل السادس
137	1-6- تمهيد	

- 137 2-6- صفات الغاز المثالي
138 3-6- ضغط الغاز المثالي
143 4-6- قانون تساوي توزيع الطاقة للغاز المثالي
145 5-6- تحقيق صحة نظرية الحركة للغازات المثالية
150 6-6- خواص الغازات الحقيقية
152 7-6- معادلة فاندرفال للغازات الحقيقية
أمثلة متفرقة

- 157 تمارين ومسائل

159 **مقاييس درجة الحرارة والطاقة الحركية** **الفصل السابع**

- 159 1-7- تمهيد
160 2-7- مقاييس درجات الحرارة
161 3-7- درجات الحرارة والتدريج الغازي المطلق
165 4-7- طبيعة الحرارة والطاقة الحرارية
166 5-7- مصادر الطاقة الحرارية
167 6-7- واحدة كمية الحرارة
168 7-7- طرائق تعيين الحرارة النوعية للمواد المختلفة
أمثلة متفرقة

- 175 تمارين ومسائل

177 **التيرموديناميك** **الفصل الثامن**

- 177 1-8- تمهيد
178 2-8- الجملة التيرموديناميكية وأنواعها
181 3-8- الحالة التيرموديناميكية ومتغيراتها
182 4-8- التوازن التيرموديناميكي
183 5-8- أنواع التحولات التيرموديناميكية
184 6-8- المفاهيم الأساسية في قوانين التيرموديناميك
187 7-8- المبدأ الأول في التيرموديناميك
189 8-8- تطبيق المبدأ الأول على الجمل التيرموديناميكية

	المختلفة
190	8-9- تطبيق المبدأ الأول على التحولات التيرموديناميكية
	المختلفة
194	8-10- علاقة العمل بالطريق الذي تسلكه الجملة
197	8-11- إيجاد علاقة C_p و C_v خلال جملة تيرموديناميكية
200	8-12- معادلة الحال للغاز المثالي في التحول الكظوم
	أمثلة متفرقة
203	تمارين ومسائل

205 الفصل التاسع الحث الكهرومغناطيسي والتيار المتناوب

205	9-1- تمهيد
205	9-2- قانون فاراداي ولينز في التحريض المغناطيسي
208	9-3- معادلة القوة المحركة الكهربائية التحريضية
209	9-4- التحريض الذاتي
211	9-5- معامل التحريض الذاتي
212	9-6- القوة المحركة الكهربائية المتولدة في وشيعة (الدينامو)
215	9-7- أسس التيار المتناوب
218	9-8- مميزات التيار المتناوب
220	9-9- دارات التيار المتناوب
222	9-10- المحول الكهربائي
	أمثلة متفرقة
227	تمارين ومسائل

229 الفصل العاشر الانكسار والتبديد وتطبيقاتهما

229	10-1- الانكسار
230	10-2- قرينة الانكسار
232	10-3- قرائن الانكسار النسبية
233	10-4- انكسار الضوء في لوح زجاجي
235	10-5- الانعكاس الكلي

237	10-6- العمق الظاهري لجسم ملقى في وسط شفاف
238	10-7- الانكسار الجوي وحادثة السراب
241	10-8- الانكسار في الموشور
243	10-9- تبديد الضوء في الموشور
244	10-10- العدسات البسيطة
248	10-11- الأشعة الرئيسية في العدسات
249	10-12- ضم العدسات
250	10-13- عدسة التصوير عن بعد
	أمثلة متفرقة

الفصل

الحادي عشر

253 الليزر وتطبيقاته

253	11-1- تمهيد
256	11-2- امتصاص الضوء
258	11-3- الإصدار التلقائي للإشعاع
259	11-4- عدم الترابط في الضوء العادي
261	11-5- الإصدار المحثوث للإشعاع
263	11-6- النظرية الأولية في تضخيم الضوء
265	11-7- آلية الضخ الضوئي
266	11-8- الجمل ذات السويات الثلاثة
268	11-9- الليزر الباقوتي
274	11-10- توليد النبضة العملاقة
278	11-11- الليزرز الغازية
282	11-12- بعض التطبيقات العملية لأشعة الليزر
287	تمارين ومسائل محلولة

الفصل

الثاني عشر

291 نبذة عن النشاط الإشعاعي والفيزياء النووية

291	12-1- تمهيد
292	12-2- الأشعة النووية
293	12-3- جسيمات ألفا
295	12-4- جسيمات بيتا
296	12-5- أشعة غاما
298	12-6- اكتشاف البوزيترون
300	12-7- اكتشاف النيوترون والنيوترينو
302	12-8- الاضمحلال الإشعاعي والسلاسل الإشعاعية
303	12-9- زمن نصف العمر الإشعاعي
306	12-10- أجهزة كشف الإشعاع النووي
	أمثلة متفرقة
313	تمارين ومسائل
315	جداول الثوابت الفيزيائية
329	قائمة المصطلحات العامة
339	المراجع العلمية

المقدمة

أصبحت الزراعة في القطر العربي السوري عاملاً أساسياً وبارزاً في تنمية الاقتصاد الوطني ورمزاً مهماً لتقدم الوطن وتطور المجتمع.

يعتمد التقدم في المجال الزراعي على تقدم بقية العلوم التطبيقية ذات الصلة، والعلوم الأساسية هي اللبنة الأولى في صرح التقدم الزراعي نظراً لما تقدمه من تفسير ومعالجة وتجارب وحلول للكثير من الظواهر الطبيعية.

يأتي علم الفيزياء في مقدمة العلوم التطبيقية التي ساهمت ومازالت تساهم في تطور الحضارة الإنسانية، وذلك بما تقدمه من منجزات علمية تتمخض عن ثقافة متجددة تدفع مسيرة التقدم إلى الأمام.

يسرني أن أضع بين أيدي طلاب السنة الأولى في كلية الهندسة الزراعية الكتاب الحالي بعنوان **الفيزياء العامة للمهندسين**. وهو كتاب يشتمل على فصول مختارة من الفيزياء تم انتقاؤها في ضوء المنهاج الخاص بمقرر الفيزياء للزراعيين والذي أقره مجلس التعليم العالي. حاولت كتابة الموضوعات المتضمنة لهذا الكتاب بلغة عربية سهلة بعيدة عن التعقيد، والابتعاد قدر الإمكان عن المعالجات الرياضية المعقدة، وانصب اهتمامي على إبقاء الجوهر الفيزيائي وشرح المفاهيم والظواهر والتجارب الأساسية بطريقة علمية وبشيء من التفصيل معتمداً على ما يملكه الطالب من أساس علمي وقدرة على المحاكاة العقلية.

تضمن هذا الكتاب اثني عشر فصلاً حوى موضوعات مختارة في وحدات وأبعاد الكميات الفيزيائية، الحرارة وخصائص المادة، قوانين الغازات، النظرية الحركية للغازات، التيرموديناميك، ميكانيك السوائل، الحث الكهرومغناطيسي والتيار المتناوب، الانكسار والتبديد في الضوء، الليزر وتطبيقاته، والفيزياء النووية.

قام الدكتور إحسان الموصلي بإعداد هذا الكتاب، وإنني إذ آمل أن أكون قد وفقت في اختيار موضوعاته، وفق الخطة الدراسية التي حددت أن يتم تدريس هذا المقرر لطلاب السنة الأولى بمعدل ساعتين نظريتين أسبوعياً، الأمر الذي حد كثيراً من التوسع في اختيار الموضوعات ومن الإطناب في شرح ما تم اختياره.

آمل أن يجد الطالب الفائدة المرجوة والله ولي التوفيق.

الدكتور إحسان الموصلي

الفصل الأول

واحدات وأبعاد الكميات الفيزيائية

Units and Dimensions of physical Quantities

1-1- تمهيد:

إن المقدار العددي عبارة عن عدد رياضي لا وحدة له... فمثلاً 5، 7، أو 100 هي أعداد لا معنى لها فيزيائياً.

أما الكمية الفيزيائية فهي مقدار عددي مرفق بواحدة، وهذه الواحدة هي التي تعبر عن ماهية ذلك العدد، فمثلاً 8م، 12 نيوتن، 15 جول، 20 ثانية...
إن العدد 8 يعبر عن مسافة أو طول وأن العدد 12 يعبر عن قوة، وأن العدد 15 يعبر عن عمل أو طاقة، وأن العدد 20 يعبر عن زمن أو وقت...
وهكذا فإن الكمية الفيزيائية مقدار عددي مرفق بواحدة.

لقد اتفق فيزيائياً على اختيار ثلاث كميات فيزيائية أساسية يمكن التعبير بواسطتها عن أية كمية فيزيائية أخرى، وهذه الكميات الأساسية هي الطول Length ورمزه البعدي [L] والكتلة Mass ورمزه البعدي [M] والزمن Time ورمزه البعدي [T]. وعلى أساس ذلك فإن أبعاد الكميات الفيزيائية الأساسية هي L و M و T وأن الواحدات المعبرة عن الكميات الأساسية الثلاث تسمى واحدات الكميات الفيزيائية الأساسية وتصنف وفق أنظمة قياس دولية سوف نناقشها في الفقرات التالية.

أما أبعاد وواحدات الكميات الفيزيائية المركبة فإنها تُشتق من هذه الأبعاد والواحدات الأساسية الثلاث فمثلاً السرعة ما هي إلا واحدة طول على واحدة

زمن كذلك التسارع ما هو إلا واحدة طول على واحدة مربع الزمن وهكذا...
لبقية الكميات الفيزيائية المشتقة والتي سوف يوضحها جدول يتضمن وحدات
معظم الكميات الفيزيائية المتداولة وأبعادها.

1-2- تصنيف وحدات القياس:

تُصنف وحدات القياس للكميات الفيزيائية الثلاث الأساسية (الطول،
الكتلة، الزمن) وفقاً لثلاثة أنظمة دولية:

1. النظام الفرنسي العملي The French Practical System of Units:

يستخدم في هذا النظام المتر والكيلو غرام والثانية كواحدات معبرة عن
الكميات الفيزيائية الأساسية الثلاث ويُعرف بنظام (M. K. S. System) أو
النظام المكثي، أو النظام الفرنسي العملي ويسمى عرفاً النظام الدولي وهو شائع
استخدامه في جميع الحسابات المخبرية.

2. النظام الفرنسي المطلق The French Absolute System of Units:

يستخدم في هذا النظام السنتيمتر والغرام والثانية كواحدات معبرة عن
الكميات الفيزيائية الأساسية الثلاث ويُعرف بنظام (C. G. S. System) أو
النظام السعطي أو النظام الفرنسي العلمي، ويعد هذا النظام الشائع في التقديرات
الفيزيائية القياسية.

3. النظام الإنكليزي المطلق The English Absolute System of Units:

يستخدم في هذا النظام القدم والبوند والثانية كواحدات معبرة عن الطول
والكتلة والزمن ويسمى هذا النظام (F. P. System) أو النظام الفبتي.

ومن الملاحظ أن هناك علاقة حسابية تربط بين النظام الإنكليزي

المطلق والنظام الفرنسي المطلق، فمثلاً:

$$1 \text{ قدم} = \frac{12000}{3937} = 30.48 \text{ سنتيمتراً}$$

$$1 \text{ باوند} = 453.59243 \text{ غراماً.}$$

وهناك واحدة قياسية للطول في النظام الإنكليزي أصغر من واحدة القدم

وهي البوصة أو الإنش، وتعرف بأنها:

$$1 \text{ إنشاً} = 1 \text{ بوصة} = \frac{1}{12} \text{ من القدم.}$$

$$\text{أو } 1 \text{ إنشاً} = 1 \text{ بوصة} = 2.54 \text{ سنتيمتراً.}$$

1-3- الأسس العيارية للوحدات الأساسية:

(a) واحدة الطول Unit of Length:

الأساس العياري للطول هو طول موجة اللون البرتقالي - الأحمر لذرة

كريبتون 86، ووحددة الطول العيارية في النظام الفرنسي العملي هي المتر،

ويعرف المتر بأنه يساوي تقريباً 160763.73 من المرات قدر طول الموجه

العيارية السابقة.

كذلك المتر هو المسافة المقاسة عند درجة الصفر المئوي بين علامتين

محفورتين على قضيب ذي شكل معين من سبيكة 90% من البلاتين، 10% من

الايريديوم، محفوظة في المكتب الدولي للموازين والمكاييل بفرنسا. وتنقسم هذه

المسافة إلى مئة قسم متساوٍ كل قسم منها يمثل واحدة السنتيمتر.

كذلك يعادل المتر $\frac{1}{10^7}$ من ربع محيط الكرة الأرضية. ويوجد له

واحدات أصغر هي السنتيمتر (سم) ويساوي (10^{-2}) من المتر والميكرون

(μ) يساوي (10^{-6}) من المتر وكذلك الانغستروم ويساوي (10^{-10}) من المتر.

(b) وحدة الكتلة Unit of Mass:

الأساس العياري للكتلة هو كتلة أسطوانة من سبيكة 90% من البلاتين، 10% الإيريديوم محفوظة في المكتب الدولي للموازين والمكاييل بفرنسا. وهذه الأسطوانة تمثل الكيلو غرام كوحدة عيارية للكتلة. كذلك الكيلو غرام هو كتلة 1000 سم³ من الماء النقي عند درجة حرارة تساوي 4 درجة مئوية. وله أجزاء أصغر هي الغرام ويساوي (10^{-3}) من الكيلو غرام.

(c) وحدة الزمن Unit of Time:

اصطلح العلماء دولياً أن يكون الأساس العياري للزمن هو الفترة الزمنية لعام استوائي وهو عام 1900 ميلادية، وقد تم تقديره في مكان يقع على خط الاستواء الأرضي، وتُعرف الوحدة المستخدمة للزمن وهي الثانية بأنها تساوي $\frac{1}{31556925.9747}$ من الفترة الزمنية العيارية السابقة.

كذلك تعرّف الثانية بأنها $\frac{1}{24 \times 60 \times 60} = \frac{1}{86400}$ من متوسط اليوم الشمسي الكامل. وكما هو معروف فإن اليوم الشمسي هو المدة الزمنية التي تمضي بين تعامد الشمس مرتين متتاليتين على المكان نفسه من سطح الكرة الأرضية.

1-4- أبعاد ووحدات الكميات الفيزيائية المركبة أو المشتقة

Derived Units:

سبق أن ذكرنا أن وحدات الكميات الفيزيائية غير الأساسية يمكن إرجاعها إلى الوحدات الثلاث الأساسية (واحدة الطول، واحدة الكتلة، واحدة الزمن) وعلى ذلك فإن جميع الوحدات الأخرى مشتقة منها. ومن أمثلة ذلك:

1- المساحة = طول × طول وأبعادها $[L]^2$. ووحداتها (m^2) في النظام المكثي أو (cm^2) في النظام السغني أو (ft^2) في النظام الفبتي.

2- الحجم = طول × طول × طول وأبعادها $[L]^3$. ووحداته (m^3) أو (cm^3) أو (ft^3).

3- السرعة = $\frac{[L]}{[T]} = \frac{\text{الطول}}{\text{الزمن}} = [L.T^{-1}]$ ووحداتها ($m.sec^{-1}$) أو ($cm.sec^{-1}$) أو ($ft.sec^{-1}$).

4- التسارع = $\frac{[L.T^{-1}]}{[T]} = \frac{\text{السرعة}}{\text{الزمن}} = [L.T^{-2}]$ وأبعادها $[L.T^{-2}]$ ووحداتها ($m.sec^{-2}$) أو ($cm.sec^{-2}$) أو ($ft.sec^{-2}$).

5- القوة = الكتلة × التسارع وأبعادها $[M.L.T^{-2}]$ ووحداتها ($kg.m.sec^{-2}$)

في النظام المكثي وتسمى هذه الوحدة في ذلك النظام النيوتن (Newton)

وهذا يعني أن ($N=kg.m.sec^{-2}$)، وهي وحدة قوة في النظام المكثي. أو

($gr.cm.sec^{-2}$) في النظام السغني وتسمى هذه الوحدة في ذلك النظام الدينة

(dyne) وهذا يعني أن ($dyne=gr.cm.sec^{-2}$) وهي وحدة قوة في النظام

السغني. أو ($Lb.ft.sec^{-2}$) في النظام الإنكليزي المطلق.

6- الطاقة أو العمل = القوة × المسافة وأبعادها $[M.L^2.T^{-2}] = [M.L.T^{-2}] . [L]$ ووحداتها $(kg.m^2.sec^{-2})$ في النظام المكثي ، وتسمى هذه الوحدة في ذلك النظام الجول (Joul) وهذا يعني أن $(Joul = kg.m^2.sec^{-2})$.
وبما أن وحدة النيوتن كما ذكرنا سابقاً $(N = kg.m.sec^{-2})$ فإننا نستنتج إن الجول = نيوتن × متراً $(Joul = N.m)$.
أو $(gr.cm^2.sec^{-2})$ في النظام السغثي وتسمى هذه الوحدة في ذلك النظام الإرغة (Erge) وهذا يعني أن $(Erge = gr.cm.sec^{-2})$.
وبما أن وحدة الدينة كما ذكرنا سابقاً $(dyne = gr.cm.sec^{-2})$ فإننا نستنتج إن الأرغة = دينة × سنتيمتر $(Erge = dyne .cm)$.
ولو بحثنا عن العلاقة فيما بين واحدتي القوة والعمل في النظامين السابقين لوجدنا أن:

$$1 N = 10^5 dyne$$

$$1 Joul = 10^7 erge$$

7- الاستطاعة = معدل إنجاز العمل = $\frac{[M.L^2.T^{-2}]}{[T]}$ وأبعادها $[M.L^2.T^{-3}]$

وواحدتها $(Kg.m^2.sec^{-3})$ في النظام المكثي وتسمى هذه الوحدة في ذلك النظام $(Joul.sec^{-1})$ وقد اتفق أن تكون تلك الوحدة الواط (Watt) أي أن $(Watt = Joul.sec^{-1})$ أو $(gr.cm^2.sec^{-3})$ في النظام السغثي وتسمى هذه الوحدة في ذلك النظام $(Erge. Sec^{-1})$. أو $(1b.ft^2.sec^{-3})$ في النظام الانكليزي وتوجد وحدة انكليزية أخرى للاستطاعة تدعى القدرة الحصانية (Horsepower) حيث أن: $1 H. P. = 745.7 watt$

8- الوزن النوعي: ويعرف بأنه النسبة بين كتلة حجم معين من المادة إلى كتلة حجم مساوية من الماء. أي أن أبعاد الوزن النوعي $\frac{M}{M} = 1$ ولا واحدة له، لأنه نسبة.

وبالمثل الزاوية بالتقدير الدائري عبارة عن $\frac{\text{طول قوس}}{\text{نصف القطر}}$ أي لا واحدة لها وكذلك الأرقام الصحيحة والكسور.

1-5- معادلات أبعاد الكميات الفيزيائية الشائعة

:Dimentions of Physical Quantities

تتوقف قيمة أية واحدة مشتقة، لأية كمية فيزيائية على مقادير الوحدات الأساسية التي اشتقت منها. تتضمن معادلة الأبعاد التي تعبر عن أية كمية فيزيائية مشتقة على رموز أبعاد الكميات الفيزيائية الأساسية الثلاث (L,M,T) مرفوعة لقوى متباينة حسب نوعية الكمية الفيزيائية.

تعطي معادلة الأبعاد لأية كمية فيزيائية نوعية الوحدة الفيزيائية لتلك الكمية مباشرة وحسب النظام المستخدم.

يبين الجدول (1-1) معادلات الأبعاد والوحدات بالنظامين المكثي والسغني لأهم الكميات الفيزيائية الميكانيكية الشائعة المتداولة، وعلى الطالب محاولة استنتاج معادلة أبعاد أي كمية فيزيائية من خلال قانون تلك الكمية وتحديد واحدتها حسب نوعية النظام المطلوب.

الجدول (1-1)

الوحدة الفيزيائية	معادلة الأبعاد	الوحدة المكنية M.K.S	الوحدة السغنية C.G.S
الطول أو المسافة	Length	[L]	سنتمتر سم
الكتلة	Mass	[M]	كيلو غرام كغ
الزمن	Time	[T]	ثانية ثا
المساحة	Area	[L ²]	سم ²
الحجم	Volume	[L ³]	سم ³
السرعة (مسافة / زمن)	Velocily	[LT ⁻¹]	سم/ثا
التسارع (سرعة / زمن)	Acceleration	[LT ⁻²]	سم/ثا ²
القوة (كتلة × تسارع)	Force	[MLT ⁻²]	كغ م/ثا ² (نيوتن)
الطاقة أو العمل (قوة × مسافة)	Work	[ML ² T ⁻²]	كغ م ² /ثا ² (جول)
الاستطاعة (عمل / زمن)	Power	[ML ² T ⁻³]	كغ م ² /ثا ³ (واط)
الكثافة (كتلة / حجم)	Density	[ML ⁻³]	كغ/م ³
الضغط (قوة / مساحة)	Pressure	[ML ⁻¹ T ⁻²]	كغ م/ثا ² = باسكال
كمية الحركة (كتلة × سرعة)	Momentum	[MLT ⁻¹]	كغ م / ثا
التواتر (دورة / زمن)	Frequency	[T ⁻¹]	ثا ⁻¹ هرتز
الزاوية (طول قوس / نصف القطر)	Angle	1	بدون واحدة
السرعة الزاوية (زاوية / زمن)	Angular velocily	[T ⁻¹]	ثا ⁻¹
التسارع الزاوي (سرعة زاوية / زمن)	Angular acceleration	[T ⁻²]	ثا ⁻²
عزم القوة (قوة × مسافة)	Couple	[ML ² T ⁻²]	كغ م ² /ثا ² = نيوتن م
التوتر السطحي (قوة / طول)	Surface tension	MT ⁻²	كغ / ثا ²
الإجهاد (قوة / مساحة)	Stress	ML ⁻¹ T ⁻²	كغ م / ثا ²
الانفعال (تغير طول / طول)	Strain	1	بدون واحدة
معامل المرونة (إجهاد / انفعال)	Elastic modulus	ML ⁻¹ T ⁻²	كغ م / ثا ²
معامل اللزوجة [قوة / مساحة] / (تغير سرعة / مسافة)	Viscosity	ML ⁻¹ T ⁻¹	كغ م / ثا
الكثافة النسبية = الوزن النوعي	Specifuc density	1	بدون واحدة

1-6- نظرية الأبعاد وتطبيقاتها:

تعد أبعاد أية كمية فيزيائية مشتقة بمثابة صورة رمزية لهيئة عناصرها الأساسية وبالتالي نستطيع من خلال تحديد أبعاد الكمية أن نتعرف على الشكل الرياضي أو المعادلة المعبرة عن تلك الكمية. وتنص نظرية الأبعاد (يجب أن يكون طرفا العلاقة الفيزيائية متجانسين من حيث الأبعاد).

لذلك نجد أن لهذه النظرية فوائد رياضية وفيزيائية متعددة:

- 1- التحقق من صحة القوانين الفيزيائية.
- 2- استنتاج بعض القوانين الفيزيائية بسهولة من خلال معطيات منطقية.
- 3- اشتقاق وحدات الثوابت الفيزيائية التي تعتمد عليها العلاقات الرياضية المختلفة.
- 4- التحويل من وحدات النظام الفرنسي المطلق (السغتي) إلى وحدات النظام الإنكليزي المطلق (الفبي).

1-6-1- التحقق من صحة القوانين الفيزيائية:

مثال (1-1):

تحقق من صحة معادلة بوازيل التي تمثل التدفق المنتظم للسوائل خلال أنبوبة:

$$V = \frac{\pi r^4 P}{8 \mu L}$$

حيث إن:

V - هو حجم السائل الذي يمر خلال أي مقطع من الأنبوبة في الثانية الواحدة. ويدعى التدفق.

-r نصف قطر الأنبوب.

-P فرق الضغط بين طرفي الأنبوب.

-L طول الأنبوب.

-μ معامل لزوجة السائل المتدفق.

الحل:

خطوات الحل يجب أن تعتمد على إثبات أن بعدي طرفي معادلة بوازيل متماثلان.

الطرف الأيسر ويساوي V وهو حجم السائل خلال واحدة الزمن وأبعاده:

$$L^3 T^{-1} \quad (1)$$

الطرف الأيمن ويحوي r^4 وهو نصف قطر الأنبوب وأبعاده L^4

ويحوي P وهو فرق الضغط وأبعاده $M.L^{-1}.T^{-2}$

ويحوي μ وهي لزوجة المائع وأبعاده $M.L^{-1}.T^{-1}$

ويحوي L وهو طول الأنبوب وأبعاده L

يصبح الطرف الأيمن كالآتي:

$$\frac{L^4.M.L^{-1}.T^{-2}}{M.L^{-1}.T^{-1}.L} = L^3.T^{-1} \quad (2)$$

بما أن أبعاد الطرف الأيسر = أبعاد الطرف الأيمن يعني أن معادلة بوازيل صحيحة بهذا الشكل.

1-6-2- استنتاج بعض القوانين بسهولة:

مثال (1-2):

استنتاج زمن الذبذبة (t) لنواس بسيط مع العلم أن زمن الذبذبة يعتمد

على كتلة كرة النواس (m) وطول خيط التعليق (l) وتسارع الجاذبية الأرضية

(g).

الحل:

بما أن زمن ذبذبة النواس البسيط (t) يعتمد على g , ℓ , m فإننا نستطيع القول إن:

$$t \propto m^\alpha \cdot \ell^\beta \cdot g^\gamma \implies t = K \cdot m^\alpha \cdot \ell^\beta \cdot g^\gamma \quad (1)$$

حيث: K ثابت عددي

و α و β و γ أسس يراد إيجاد قيمة كل منها، ومن خلال التعبير بالأبعاد للمعادلة (1) نجد:

$$[T] = [M]^\alpha \cdot [L]^\beta \cdot [L \cdot T^{-2}]^\gamma$$

$$T = M^\alpha \cdot L^\beta \cdot L^\gamma \cdot T^{-2\gamma}$$

$$T = M^\alpha \cdot L^{\beta+\gamma} \cdot T^{-2\gamma} \quad (2)$$

وبمقارنة أبعاد الطرفين للمعادلة (2) نجد:

$$0 = \alpha \quad , \quad 0 = \beta + \gamma \quad , \quad 1 = -2\gamma$$

ومن خلال حل المعادلات الثلاث نجد:

$$\alpha = 0 \quad , \quad \beta = 1/2 \quad , \quad \gamma = -1/2$$

وبتعويض قيم α و β و γ بالمعادلة (1) يكون:

$$\begin{aligned} t &= k \cdot m^0 \cdot \ell^{1/2} \cdot g^{-1/2} \\ &= k \cdot \ell^{1/2} \cdot g^{-1/2} \end{aligned}$$

$$\therefore t = k \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

وقد وجد عملياً إن الثابت العددي $k = 2\pi$

$$\therefore t = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

وقد أثبتت التجارب العملية صحة هذا القانون.

مثال (1-3):

استنتج تردد وتر مقياس الصوت مع العلم أن تردد الوتر (f) يتوقف على طوله (ℓ) وقوة الشد الواقعة عليه (F) وكتلة السنتمتر الطولي منه (m').
الحل:

بما أن تردد الوتر (f) يعتمد على ℓ , F , m' فإننا نستطيع القول إن:

$$f \propto \ell^\alpha \cdot F^\beta \cdot m'^\gamma \Rightarrow$$

$$f = k \cdot \ell^\alpha \cdot F^\beta \cdot m'^\gamma \quad (1)$$

حيث: k: ثابت عددي.

و α و β و γ أسس يراد إيجاد قيمة كل منها.

من خلال التعبير حسب نظرية الأبعاد نجد ما يلي:

$$\text{التردد (f)} = \frac{\text{عدد الذبذبات}}{\text{الزمن}} = \frac{1}{T} \Rightarrow T^{-1}$$

$$\text{قوة الشد (F)} = \text{الكتلة} \times \text{التسارع، فأبعاده} = M \cdot L \cdot T^{-2}$$

$$\text{وأن (m')} \text{ كتلة السنتمتر الطولي} = \frac{m}{\ell} \text{ فأبعاده} = M \cdot L^{-1}$$

ومن خلال تطبيق الأبعاد على طرفي المعادلة (1) يكون:

$$T^{-1} = [L]^\alpha \cdot [m \cdot L \cdot T^{-1}]^\beta \cdot [M \cdot L^{-1}]^\gamma$$

$$T^{-1} = [L]^\alpha \cdot [m]^\beta \cdot [L]^\beta \cdot [T]^{-2\beta} \cdot [M]^\gamma \cdot [L]^{-\gamma}$$

$$T^{-1} = L^{\alpha+\beta-\gamma} \cdot M^{\beta+\gamma} \cdot T^{-2\beta} \quad (2)$$

بمقارنة أبعاد الطرفين للمعادلة (2) نجد:

$$0 = \alpha + \beta - \gamma, \quad 0 = \beta + \gamma, \quad -1 = -2\beta$$

وبحل جملة المعادلات الثلاث يكون:

$$\alpha = -1 \quad , \quad \beta = 1/2 \quad , \quad \gamma = -1/2$$

وبتعويض قيم α و β و γ بالمعادلة (1) فإن:

$$f = K \cdot \ell^{-1} \cdot F^{1/2} \cdot m'^{-1/2}$$

$$f = \frac{k}{\ell} \sqrt{\frac{F}{m'}}$$

وقد أثبتت التجارب العملية أن $k = 1/2$ إذن يكون:

$$f = \frac{1}{2\ell} \sqrt{\frac{F}{m'}}$$

1-6-3- اشتقاق واحداث ثوابت المعادلات الرياضية:

مثال (1-4):

من المعروف أن معادلة الحركة التوافقية البسيطة (S.H.M) تعطى بالعلاقة:

$$X = A \sin \omega t$$

حيث:

(X) تمثل الإزاحة، (A) كمية ثابتة، (ω) السرعة الزاوية، (t) الزمن.

والمطلوب: إيجاد واحداث الثابت (A).

الحل:

بالتعبير عن الواحدات بإيجاد أبعاد طرفي المعادلة يكون:

$$[L] = A \sin [T^{-1}] \cdot [T] \quad (1)$$

يلاحظ من معادلة الأبعاد (1) أن الثابت (A) مضروب في كمية لا واحدة لها.

من هذا نستنتج أن الثابت (A) له واحداث الطرف الأيسر نفسها أي له واحداث

الإزاحة (X) نفسها بمعنى أن أبعاد $[L] = A$ وواحداثه حسب نظام القياس

المستخدم م أو سم أو قدم.

1-6-4- تحويل وحدات كمية فيزيائية من النظام الفرنسي المطلق (السغثي) إلى النظام الإنكليزي المطلق (الفبثي):

من المعروف بأن حاصل جداء أية كمية فيزيائية في الوحدات الخاصة بها دائماً يعطي مقداراً ثابتاً.

مثال (1-5):

أوجد قيمة الضغط الجوي بالوحدات الإنكليزية المطلقة إذا علم أن قيمته بالوحدات الفرنسية المطلقة مساوية 1.013×10^6 داين/سم².

حيث:

1 باوند = 453.6 غراماً.

1 قدماً = 30.48 سم.

الحل:

نعلم أن الضغط (قوة لواحدة المساحة) وأبعاده هي $[M.L^{-1}.T^{-2}]$ وبضرب قيمة الضغط الجوي بالنظام الفرنسي في أبعاده ومساواتها بالمثل بالنظام الإنكليزي

نجد:

$$1.013 \times 10^6 [M_1 L_1^{-1} . T_1^{-2}] = k [M_2 . L_2^{-1} . T_2^{-2}]$$

$$\begin{aligned} \therefore k &= 1.013 \times 10^6 \frac{M_1 . L_1^{-1} . T_1^{-2}}{M_2 . L_2^{-1} . T_2^{-2}} \\ &= 1.013 \times 10^6 \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{T_2^2}{T_1^2} \end{aligned} \quad (1)$$

ولكن:

$$T_1 = T_2 \quad , \quad L_2 = 30.48 L_1 \quad , \quad M_2 = 453.6 M_1 \quad \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_2^2}{T_1^2} &= 1 \\ \frac{L_2}{L_1} &= 30.48 \\ \frac{M_2}{M_1} &= 453.6 \end{aligned} \right\} (2)$$

نعوض في (1) فنجد:

$$k = 1.013 \times 10^6 \frac{30.48}{453.6} = 6.8 \times 10^4 \text{ lb ft}^{-2}$$

أي 1 ضغط جوي بالدائين / سم² سغثياً = $10^4 \times 6.8$ باوند / قدم² فبثياً.

1-7-7- قوانين نيوتن في الحركة Newton Laws of Motion:

وضع نيوتن ثلاثة قوانين أساسية للحركة هي:

1-7-1- القانون الأول (القصور الذاتي):

يظل الجسم الساكن في حالة سكون ما لم تؤثر فيه قوة تغير من حالته، وكذلك الجسم المتحرك بسرعة منتظمة في خط مستقيم يظل على حركته ما لم تؤثر فيه قوة تغير من حالته.

يوضح هذا القانون خاصية القصور الذاتي أو العطالة للأجسام. فالجسم الساكن يقاوم أي تغير في حالة سكونه، وكذلك الجسم المتحرك بسرعة منتظمة يقاوم أي تغير في حالة حركته. وهذا هو ما يعرف بالقصور الذاتي أو عطالة الأجسام.

1-7-2- القانون الثاني (دفع القوة):

إذا أثّرنا بقوة (F) في جسم ما فإنها تُحدث أو تحاول أو تُحدث تغييراً في حالة الجسم عن حالة سكونه أو حركته الخطية بسرعة منتظمة. وعندما تتغير حالة الجسم يحدث تسارع acceleration (a) يكون اتجاهه في اتجاه القوة المؤثرة نفسه. وقد وجد نيوتن أن النسبة بين القوة المؤثرة ($\vec{F}$) والتسارع الناتج ($\vec{a}$) تكون دائماً مقدراً ثابتاً للجسم الواحد وتساوي كمية المادة التي يحويها أي كتلته (m).

$$\frac{\vec{F}}{\vec{a}} = m \Rightarrow \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (1 - 1)$$

إذا كان زمن تأثير القوة هو (t) وكان مقدار التغير في سرعة الجسم في تلك الفترة هو Δv فإنه من تعريف التسارع $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{t}$ وبذلك تكون معادلة القوة:

$$\vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{t} \Rightarrow \vec{F} \cdot t = m \cdot \Delta \vec{v} \Rightarrow$$

$$\vec{F} \cdot t = m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$$

$$\therefore \vec{F} \cdot t = m \vec{v}_2 - m \vec{v}_1 \quad (2 - 1)$$

حيث: v_1 ، v_2 هما سرعتا الجسم عند البدء وعند الانتهاء من تأثير القوة.

وبما أن حاصل جداء القوة في الزمن يساوي دفع القوة، وأن جداء الكتلة في السرعة يساوي كمية الحركة لذلك يمكن كتابة القانون الثاني على الصورة التالية:

التغير في كمية حركة الجسم يساوي دفع القوة المؤثرة والمسببة لهذا التغير.

1-7-3- الفرق بين الكتلة والوزن Mass & Weight:

يُطلق على الكم المادي للجسم بكتلة الجسم بينما وزن الجسم أو ثقله يُطلق على قوة جذب الأرض لذلك الجسم. فإذا كانت كتلة الجسم m وتسارع الجاذبية الأرضية هو (g) كان وزن الجسم $\vec{W}$ مساوياً $\vec{W} = m \cdot \vec{g}$ ويلاحظ هنا أن وزن الجسم كمية متجهة أما كتلته فهي كمية غير متجهة.

1-7-4- القانون الثالث (الفعل ورد الفعل) Action & Reaction Law:

إذا أثر جسم بقوة ما في جسم آخر فإن هذا الجسم الثاني يؤثر بقوة مساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه للقوة الأولى. أي أن لكل فعل، رد فعل مساوٍ له في المقدار ومضادٍ له في الاتجاه $(F_1 = -F_2)$.

1-7-5- قانون بقاء كمية الحركة

Law of Conservation of Momentum:

إذا تصادم جسمان، تتغير كمية حركة $(m \cdot v)$ كل منهما، لذلك يؤثر كل منهما بقوة في الآخر. فإذا لم تؤثر في أي منهما أثناء التصادم قوى خارجية أي إذا كوّنّا مجموعة معزولة، فإن كمية الحركة الكلية للجسمين قبل التصادم تساوي تماماً كمية الحركة الكلية للجسمين بعد التصادم، ويسمى هذا قانون بقاء كمية الحركة ويمكن إثبات ذلك رياضياً باعتبار تصادم كرتين كتلتيهما (M, m) تتحركان بسرعتين ابتدائيتين (v_1, u_1) كالآتي:

عندما تتصادم كرتان تؤثر الكرة الأولى في الثانية بقوة $\vec{F}_1$ وتؤثر الكرة الثانية في الأولى بقوة $\vec{F}_2$ بحيث $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. فإذا كان زمن التصادم هو t

وتغيرت سرعتا الكرتين بعد التصادم إلى $(\vec{v}_2, \vec{u}_2)$ وبتطبيق قانون نيوتن الثاني يكون لدينا:
بالنسبة للكرة الأولى:

$$\vec{F}_1 = m \frac{\vec{u}_2 - \vec{u}_1}{t}$$

وللكرة الثانية:

$$\vec{F}_2 = M \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t}$$

$$\therefore \vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \Rightarrow m \frac{\vec{u}_2 - \vec{u}_1}{t} = -M \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t}$$

$$\therefore m \vec{u}_1 + M \vec{v}_1 = m \vec{u}_2 + M \vec{v}_2 \quad (3 - 1)$$

وهذا يثبت عدم تغير كمية الحركة الكلية قبل التصادم وبعده.

مثال (1-6):

أطلقت رصاصة كتلتها 2 غراماً على كتلة من الخشب كتلتها 600 غرام معلقة بخيط خفيف فإذا كانت سرعة انطلاق الرصاصة 28000 سم/ثا، أوجد السرعة التي تكتسبها كتلة الخشب علماً بأن الرصاصة استقرت فيها.

الحل:

كمية الحركة قبل التصادم = كمية الحركة بعد التصادم

$$m \vec{u}_1 + M \times 0 = m \vec{v}_2 + M \vec{v}_2$$

يلاحظ من السرعة الابتدائية لكتلة الخشب $\vec{v}_1 = \vec{0}$ الصفر وأن السرعة

النهائية للرصاصة $\vec{v}_2$ هي السرعة النهائية نفسها لكتلة الخشب حيث أنهما

أصبحا جسماً واحداً أي أن: $m u_1 = (m+M) V_2$

$$\therefore \vec{v}_2 = \frac{m}{M+m} \cdot \vec{u}_1 = \frac{2}{600+2} \times 28000 = 93.3 \text{ cm/sec.}$$

1-8- قانون الجذب العام لنيوتن

Newton s Law of Gravitation

اكتشف نيوتن وجود نوع معين من القوة تجذب جميع الأجسام إلى سطح الأرض، وإن هذا النوع من القوة هو نفسه الذي يجذب القمر للأرض وكذلك تماسك أي كتلة على سطح الأرض أو تجاذب أي كتل مع بعضها على سطح الأرض، وإن هذا النوع من القوى تسمى قوى الجذب العام لنيوتن أو قوى التجاذب:

((كل جسم مادي يجذب أي جسم آخر مهما صغر بقوة تتناسب طردياً مع حاصل جداء كتلتي الجسمين وعكساً مع مربع المسافة بينهما)).

$$F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ويمكن تحويل التناسب إلى مساواة بوضع ثابت (G) يسمى ثابت الجذب

العام لنيوتن:

$$\therefore F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (4 - 1)$$

ويمكن إعطاء ثابت الجذب (G) تعريفاً، لو اعتبرنا جسمين كتلة كل منهما الوحدة الواحدة ويبعدان عن بعضهما بوحدة المسافات، فإن القوة بينهما سوف تساوي عددياً لثابت الجذب G. أي أن ثابت الجذب هو القوة التي يتجاذب بها جسمان كتلة كل منهما الواحدة عندما يبعدان عن بعضهما مسافة تساوي الوحدة.

كان العالم كافنديش أول من استطاع تعيين قيمة ثابت الجذب مخبرياً بطريقة ميزانه الشهيرة وسوف يقوم الطالب بالعمل التجريبي لتلك الغاية.

وقد وجد أن قيمة الثابت الفيزيائي G المقاسة مخبرياً هي:

$$G = 6.67 \times 10^{-8} \text{ dyne cm}^2 / \text{gr}^2$$

مثال (7-1):

أوجد قيمة قوة التجاذب بين كرتين كتليهما 4 غرامات، 2 كيلو غراماً حين تكون المسافة بين مركزيهما 6 سم.

الحل:

$$F = 6.67 \times 10^{-8} \times \frac{4 \times 2000}{6 \times 6} = 1.48 \times 10^{-5} \text{ dyne}$$

1-9- إيجاد كتلة الأرض وحجمها ومتوسط كثافتها:

نستطيع إيجاد أو تقدير كتلة الأرض M_E باستخدام قانون الجذب العام لنيوتن. فمن المعروف أن الأرض تجذب الغرام الواحد عند سقوطه بحرية عند سطح الأرض بقوة قدرها 980 دينة أي أنها تجذب الكيلو غرام الواحد عند سقوطه بحرية بقوة قدرها 9.8 نيوتن، وذلك من قانون نيوتن الثاني. نفترض كتلة قدرها m (1 غراماً) واقعة على سطح الأرض، فإن المسافة بين تلك الكتلة ومركز الأرض مساوياً نصف قطر الكرة الأرضية 6380 كيلو متراً ومن خلال قانون الجذب العام لنيوتن فإن:

$$F = G \frac{m \cdot M}{R^2} \Rightarrow$$

حيث أن $F=mg$ ، وإن $M=M_E$ هي كتلة الأرض، وإن $m=1 \text{ gr}$ هي كتلة ما على سطح الأرض.

$$\therefore 1 \times 980 = 6.67 \times 10^{-8} \times \frac{1 \times M_E}{(6380 \times 10^5)^2} \Rightarrow$$

$$M_E = 5.98 \times 10^{27} \text{ gram}$$

وهذا يعني أن كتلة الأرض تساوي 5.98×10^{27} غراماً، وتساوي 5.98×10^{21} طناً، أي نحو 6×10^{21} طناً.
ويمكن حساب حجم الأرض (V_E) التقريبي لو افترضنا مجازاً أن الأرض كروية.

$$V_E = \frac{4}{3} \pi R^3 = 1.09 \times 10^{27} \text{ cm}^3$$

أي أن حجم الأرض نحو 1.1×10^{21} متراً مكعباً.
كذلك يمكن حساب متوسط الكثافة (ρ_E) للأرض (من السطح حتى القاع) من خلال معرفتنا التقريبية السابقة لكل من الكتلة والحجم (M_E و V_E) للأرض.

$$\rho_E = \frac{M_E}{V_E} = \frac{5.98 \times 10^{27}}{1.09 \times 10^{27}} = 5.5 \text{ gram/cm}^3$$

ويجب أن نلاحظ أن الكثافة المتوسطة للأرض أكبر بكثير من متوسط الكثافة للقشرة الخارجية للأرض عند سطحها. وهذا يدل على أن كثافة المادة الداخلية في باطن الأرض أكبر بكثير من الكثافة عند سطحها.

10-1- تغير تسارع الجاذبية الأرضية بالارتفاع عن سطح الأرض:

نفترض تسارع الجاذبية الأرضية عند سطح الأرض هي (g) فإن قوة جذب الأرض لجسم كتلته m هي ($F = m \cdot g$) وبتطبيق قانون الجذب العام لنيوتن فإن:

$$F = G \frac{m \cdot M}{R^2} \Rightarrow$$

$$\therefore m g = G \frac{M \cdot m}{R^2} \quad (5 - 1)$$

حيث R هو نصف قطر الأرض و M كتلتها.

عند الارتفاع عن سطح الأرض مسافة h فإن البعد بين الكتلة m ومركز الأرض (الأرض والجسم m) هو $R + h$ وتصبح قوة الجذب بينهما هي mg' حيث g' هي تسارع الجاذبية الأرضية عند هذا الارتفاع (الشكل 1-1).

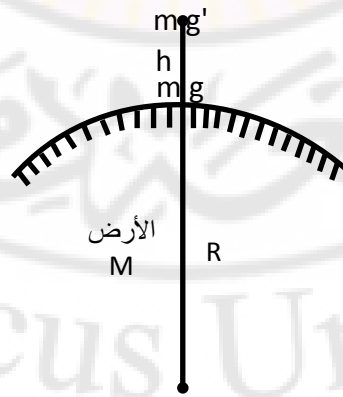
$$\therefore m g' = G \frac{M \cdot m}{(R+h)^2} \quad (6-1)$$

وبقسمة المعادلتين (5-1) ، (6-1) نحصل على:

$$\frac{g'}{g} = \frac{R^2}{(R+h)^2} = \frac{1}{(1+\frac{h}{R})^2} = (1 + \frac{h}{R})^{-2} = 1 - \frac{2h}{R}$$

$$\therefore g' = g - \frac{2h}{R} \cdot g \quad (7-1)$$

أي أن تسارع الجاذبية الأرضية يقل بالارتفاع بالمقدار $\frac{2h}{R} \cdot g$ أي كلما زاد الارتفاع عن سطح الأرض قلت الجاذبية الأرضية حتى نصل إلى ارتفاع معين يعادل رياضياً مقدار ربع قطر الأرض فإن الجاذبية عنده تنعدم ونستطيع القول مجازاً إنه عند ارتفاع يقارب 3190 كيلو متراً تصبح الجاذبية الأرضية صفراً أي نصل لمنطقة فضائية تسمى منطقة انعدام الجاذبية الأرضية أو انعدام الوزن، وهذا ما يؤخذ بالحسبان عند إطلاق السفن الفضائية والأقمار الاصطناعية.



الشكل (1-1)

11-1- حركة الأقمار الصناعية:

يفقد الجسم سرعته تدريجياً إذا قذف إلى الأعلى، حتى يصل إلى حالة السكون ثم يسقط ثانية إلى الأرض. أما إذا زادت سرعة القذف على حد معين فإن الجسم لا يعود إلى الأرض بل يدور في مسار حولها كحركة القمر الطبيعي حول الأرض ولذلك يسمى قمراً صناعياً للأجسام التي تدور حول الكرة الأرضية.

- 1- إن القمر الصناعي ما هو إلا جسم مفرغ ذو مواصفات معينة يحوي أجهزة متقدمة تقنياً، يقذف إلى أعلى بقوة تكسبه سرعة كبيرة جداً، ويتم تعيين مقدار الارتفاع الذي يتطلبه هدف إرسال القمر بدقة وعليه يتم مسبقاً تحديد قوة الدفع اللازمة ليصل القمر إلى المدار المطلوب حول الأرض.
- 2- يشترط لكي يدور قمر صناعي حول الأرض أن تتوازن قوة جذب الأرض له (mg) مع القوة الطاردة المركزية (mv^2/R) التي تنتج عن الحركة الدائرية له. أي أن:

$$\frac{mv^2}{R} = mg \quad (8 - 1)$$

وبذلك تكون أقل سرعة قذف لازمة لوضع قمر صناعي على مدار

حول الأرض هي:

$$v = \sqrt{R \cdot g} \quad (9 - 1)$$

حيث: R نصف قطر الأرض و g تسارع الجاذبية الأرضية.

فإذا علم أن نصف قطر الأرض $(6380 \times 10^3 \text{ م})$ وتسارع الجاذبية الأرضية (9.8 م/ث^2) فتكون أقل سرعة قذف لقمر صناعي لتجعله يدور حول الأرض تساوي:

$$v = 8 \times 10^3 \text{ m/sec} = 8 \text{ km/sec}$$

3- يعرف زمن الدورة الكاملة للقمر الصناعي حول الأرض بالزمن الدوري T ويعرف بأنه طول محيط الكرة الأرضية مقسوماً على سرعة القذف، أي أن:

$$T = \frac{2\pi R}{v} \quad (10 - 1)$$

$$\simeq \frac{2 \times 3.14 \times 6380 \times 10^3}{8 \times 10^3} = 4800 \text{ sec}$$

$$\therefore T = 80 \text{ minutes}$$

4- يخرج القمر الصناعي نهائياً هارباً من مجال الجاذبية الأرضية فيما إذا كانت طاقته الحركية مساوية على الأقل أو تزيد على طاقة الوضع (أي طاقته الكامنة) عند سطح الأرض. أي أن:

$$\frac{1}{2} m v^2 = m g R \quad (11 - 1)$$

من خلال ذلك نستنتج أن سرعة هروب القمر الصناعي من مجال جذب الأرض له هي:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot R} \quad (12 - 1)$$

وبالتعويض بالثوابت المعروفة آنفاً يكون:

$$v \simeq 11.2 \text{ km/sec.}$$

هذا يعني أن سرعة هروب القمر الصناعي من تأثير جذب الأرض له وضياعه بالفضاء تعادل تقريباً $\sqrt{2} \times$ سرعة قذف القمر الصناعي.

مثال (8-1):

يتحرك قمر صناعي في مسار دائري حول كوكب متوسط كثافته 10 غرامات/سم³. احسب زمن الدورة الواحدة بفرض أن نصف قطر المسار يساوي قطر الكوكب تقريباً.

الحل:

كتلة الكوكب M تساوي حجمه X كثافته.

$$M = \rho \cdot v = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{1}{2} r\right)^3 \cdot \rho$$

$$\therefore ma = G \frac{m \cdot M}{r^2} \Rightarrow$$

$$m \omega^2 r = G \frac{m \cdot M}{r^2}$$

$$\therefore \omega^2 = G \frac{M}{r^3} = \frac{G}{r^3} \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{1}{8} r^3 \cdot \rho$$

$$\omega^2 = \frac{4 G \pi \cdot \rho}{3 \times 8} = \frac{4 \pi^2}{T^2}$$

$$\therefore T^2 = \frac{3 \times 8 \pi}{G \cdot \rho} = \frac{24 \times 3.14}{6.7 \times 10^{-8} \times 10} \Rightarrow T = 10605 \text{ sec.}$$

$$\therefore T \simeq 2.95 \text{ hour}$$



تمارين ومسائل

- 1- باستخدام نظرية الأبعاد تحقق من أن زمن الذبذبة (t) لنواس بسيط طوله (l) وموضوع في منطقة تسارع الجاذبية الأرضية فيه (g) هو:

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

- 2- إذا علمت أن سرعة الصوت (v) في وسط غازي تتوقف على ضغط الغاز (p) وعلى كثافته (ρ). أثبت صحة القانون التالي:

$$v = \sqrt{\frac{p}{\rho}}$$

- 3- أوجد وحدات معامل اللزوجة لسائل بطريقة الأبعاد إذا علمت أن حجم السائل المتدفق في الثانية الواحدة عند سريانه في أنبوبة يتوقف على نصف قطر الأنبوب وفرق الضغط بين طرفي الأنبوبة.

- 4- باستخدام الأبعاد، أوجد العلاقة بين المسافة (x) التي يقطعها جسم كتلته (m) ساقط من السكون وبين تسارع الجاذبية (g) والزمن (t).

- 5- أوجد العلاقة التي تربط بين سرعة أمواد تضغط أو تخلخل في وسط ما وبين مرونة الوسط (k) وكثافته (ρ).

- 6- أوجد العلاقة التي تربط بين الزمن اللازم لاصطدام جسمين مختلفي الكتلة والمسافة بينها إذا عُلِمَ أن الجسمين يتحركان تحت تأثير قوى الجاذبية المتبادلة بينهما.

- 7- أوجد العلاقة بين سرعة الموجة العرضانية التي تنتج عن وتر رفيع منتظم المقطع وبين كتلة السنتمتر الطولي لهذا السلك ومقدار الشد فيه.

8- أوجد العلاقة بين سرعة كرة صلبة ساقطة تحت تأثير الجاذبية الأرضية وبين نصف قطرها ولزوجة السائل ومقاومة السائل لهذه الحركة مستخدماً نظرية الأبعاد.

9- إذا علمت أن قانون كبلر للكواكب يعطى بالعلاقة:

$$t^2 = \frac{4\pi^2}{m \cdot G_0} r^3$$

حيث تمثل (t) الزمن الدوري للكوكب، (m) كتلة الشمس، (G₀) ثابت التجاذب العالمي و (r) بعد الكوكب عن الشمس، أوجد واحدات الثابت (G₀).

10- استنتج العلاقة التي تربط بين زمن الذبذبة (t) لشوكة رنانة وبين طول الشوكة (L) وكثافة مادتها (ρ) ومعامل مرونة مادتها (Y).

11- استنتج سرعة الضوء (C) للموجات الكهروضوئية، إذا علم أنها تتوقف على طول الموجة (λ) وترددها (f).

12- أوجد الزمن الدوري لكوكب يدور حول الشمس إذا علمت أن الزمن الدوري (t) يتوقف على بعد الكوكب عن الشمس (r) وكتلة الشمس (m) وعلى ثابت التجاذب العالمي (G₀).

13- أرجوحة طولها 4 أمتار يجلس عليها طفل كتلته 20 كيلوغراماً. أوجد مقدار الشد في حبل الأرجوحة عند أسفل نقطة في مسار الحركة علماً بأن السرعة عندها 1.6 متر/ثا.

14- جسم معلق في نابض تردده 4 ذبذبات في الثانية، فإذا كانت سعة الحركة 6 سم أوجد:

1- الدور.

- 2- أكبر سرعة للجسم.
- 3- سرعة الجسم عندما تكون إزاحته 2 سم عن مركز الحركة.
- 4- تسارع الجسم عند الإزاحة 2 سم وكذلك أقصى تسارع له.
- 15- نابض طوله 8 سم يصبح طوله 14 سم عندما يعلق به كتلة معينة. أوجد دور هذه الكتلة إذا أزيحت عن وضع توازنها ثم تركت حرة لتتحرك.
- 16- نواس بسيط طوله 100 سم. أوجد دوره في مكان تسارع الجاذبية الأرضية فيه 980 سم/ثا². ثم عند نقله في مكان آخر وجد أن زمنه الدوري أصبح 3 ثانية، أوجد تسارع الجاذبية الأرضية في المكان الثاني.
- 17- قارن بين تسارع الجاذبية الأرضية عند سطح المريخ وتسارع الجاذبية عند سطح الأرض علماً بأن النسبة بين نصفي قطريهما هي 1:0.53 وأن النسبة بين الكثافة المتوسطة لهما 1:0.71.
- 18- يدور القمر في مسار دائري حول الأرض 13 مرة في كل عام. أحسب المسافة بين الأرض والقمر (أهمل جاذبية الشمس).
- 19- أوجد دور قمر صناعي يدور في مسار دائري حول كوكب كروي كثافته الواحدة. افترض نصف قطر المسار مساوياً نصف قطر الكوكب.



الفصل الثاني

الخواص الفيزيائية للمواد الصلبة

Physical Properties of Materials

2-1- تمهيد

تُعدّ الحالة الصلبة للمادة الطور الذي تتواجد فيه مكونات المادة (جزيئات، ذرات، أيونات) بحالة متماسكة بحيث تحافظ على شكلها وحجمها وذلك بحسب طبيعتها وظروف تواجدها.

تتميز الأجسام الصلبة بشكل عام بخاصية التبلور وبوجود قوى كبيرة متبادلة بين أجزائها، وتحافظ بشكل دائم بحجمها وشكلها إذا انعدمت التأثيرات الخارجية عليها من ضغط وحرارة و.....

إن البلورات تملك شكلاً هندسياً محدداً ناتجاً عن التوزيع المنتظم بجسيماتها (ذرات، جزيئات، شوارد) التي تكون البلورة، وإن انتشار الجسيمات بشكل دوري ومتكرر في اتجاهات ثلاثة يكون ما يدعى بالشبكة البلورية.

ناقشنا في الميكانيك حركة الجسم الصلب وتوازنه. وليس الجسم الصلب إلا نموذجاً يمثل جسماً ذا أبعاد وشكل محددين لا يتعرض للامتطاط ولا للانضغاط أو الفتل إلا عندما يتعرض لقوى خارجية شديدة، وبالطبع فإن المواد في الطبيعة تنتشوه إلى حد ما عندما تخضع لقوى خارجية. إن دراسة الخصائص المرنة للمادة في غاية الأهمية من الناحية العملية ويجب الأخذ بها عند إشادة بناء أو سدود أو أقنية وتعد ضرورة من ضرورات الحياة اليومية.

2-2- خاصية المرونة Elasticity

إذا أثرت عدة قوى خارجية على جسم بحيث ظل الجسم ثابتاً في مكانه فإن هذه القوى تحدث تغيراً في شكله أو حجمه أو طوله نتيجة لتحرك أجزائه بالنسبة لبعضها البعض.

ومن الأجسام ما يستعيد كلية شكله أو حجمه الأصلي بمجرد زوال هذه القوى. ويقال عن هذه الحالة إن الجسم تام المرونة (Perfect Elastic Body). أما الأجسام التي لا تستعيد كلية شكلها أو حجمها الأصلي بزوال القوى فيقال أنها أجسام عديمة المرونة (Non Perfect Plastic).

ويمكن على وجه العموم تقسيم القوى المؤثرة على الأجسام إلى نوعين:
أ- قوى ضاغطة أو شادة / وهي القوى التي تحدث تغيراً (Tensil) في أبعاده.

ب- قوى قص: وهي القوى التي تحدث قصاً (shear) في الجسم أو انحرافاً في بنيانه.

2-3- الإجهاد Stress

يعرف الإجهاد بأنه القوى المؤثرة على وحدة المساحة.

أي أن:

$$\text{الإجهاد} = \frac{\text{القوة المؤثرة}}{\text{المساحة}}$$

$$\therefore \text{stress} = \frac{\text{Force}}{\text{Area}} = \frac{F}{A}$$

واحدات الإجهاد هي الداين/سم² بالنظام الفرنسي المطلق أو نيوتن/م²

بالنظام الفرنسي العملي أو ثقل باوند/قدم² بالنظام الانكليزي.

ويوجد ثلاثة أنواع للإجهاد وهي:

1- إجهاد طولي Tensil Stress

وذلك حين تؤثر القوة على أبعاد جزيئات الجسم. مثل وضع سلك مشدود تحت تأثير قوتين متساويتين ومتضادتين تعملان على استطالة السلك.

2- إجهاد ضاغط Compressive stress

وذلك حين تؤثر القوة على تقريب جزيئات الجسم. مثل وضع قضيب تحت تأثير قوتين ضاغطتين ومتضادتين تعملان على انكماش القضيب.

3- إجهاد قص Shearing stress

وذلك إذا أدى تأثير القوة إلى تغيير شكل الجسم. مثل التأثير بقوة مماسية على سطح مكعب من المطاط مثلاً مثبتة قاعدته تعمل على تغيير شكل المكعب.

2-4- الانفعال أو التشوه Strain

يعرف الانفعال أو التشوه بأنه النسبة بين التغير في الطول إلى الطول الأصلي في حالة استطالة أو نقص طول الجسم، أو النسبة بين التغير في الحجم إلى حجم الجسم الأصلي في حالة تغير حجم الجسم، أو التغير في الشكل. أي أن

$$\text{التشوه} = \frac{\text{التغير الناشئ في الطول أو الحجم}}{\text{الطول الأصلي أو الحجم الأصلي}}$$

مثلاً جسم طوله L أثرت عليه قوى شادة فأصبح طوله $L + \Delta L$ أي أن الجسم استطال بمقدار ΔL فإن:

$$\therefore \text{strain} = \frac{\Delta L}{L}$$

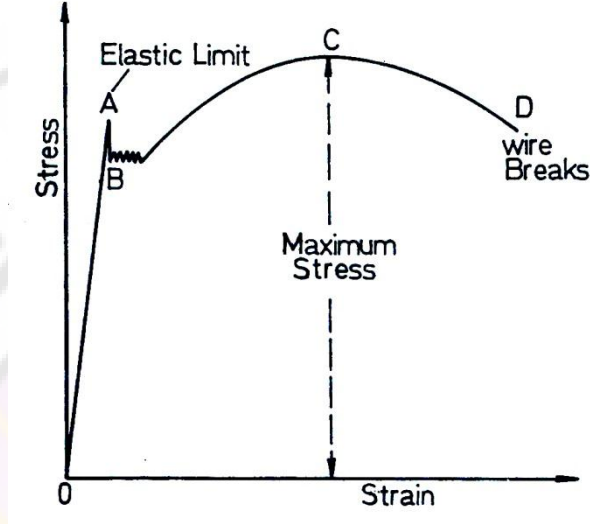
ويلاحظ أن التشوه عديم الوحدات لأنه نسبة.

2-5- قانون هوك Hook's Law

يتناسب الانفعال تناسباً طردياً مع الإجهاد المسبب له، أي أن:
التشوه يتناسب مع الإجهاد، وأن نسبة الإجهاد إلى التشوه دائماً مقدراً ثابتاً إذا بقي الجسم في حدود المرونة.
أي أن:

$$Y = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{التشوه}} = \text{ثابت}$$

ويعرف الثابت الفيزيائي Y بمعامل المرونة (Modulus of Elasticity)
وينطبق هذا القانون على جميع الأجسام في حدود معينة من قيم الإجهاد أي في حدود المرونة. وهي التي يتعين فيها عودة الجسم إلى طوله أو حجمه أو شكله الأصلي بعد زوال القوة المؤثرة.
يوضح الشكل (1-2) منحنى المرونة وهو العلاقة بين الإجهاد الطولي والتشوه الطولي كتجربة يستخدم فيها سلك معدني من مادة قابلة للسحب (Ductile metal) في وضع رأسي يثبت طرفه العلوي عند نقطة في حين يتعلق عند طرفه السفلي أثقال تزداد تدريجياً مع ملاحظة استطالة السلك في كل مرة وذلك باستخدام قدمة ذات ورنية، (جهاز يقيس السماكة).



الشكل (2-1).

ويشتمل منحنى المرونة على الأجزاء المختلفة الآتية:

1- يمثل الجزء OA خطاً مستقيماً وفقاً لقانون هوك. أي أن الإجهاد يتناسب طردياً مع الانفعال الناتج. وفي هذه الحدود يستعيد السلك طوله الأصلي عند زوال الأتقال.

وتعدّ المادة في هذه المنطقة تامة المرونة. وتعرف النقطة A بحد المرونة (Elastic Limit).

2- يدل الجزء AB من المنحنى على أن الانفعال لم يعد يتناسب مع الإجهاد وأن السلك قد أصبح أكثر طواعية للقوة المؤثرة عليه. وعند النقطة B نلاحظ استمرار الانفعال مع ثبات الإجهاد. وتعرف النقطة B بنقطة الإذعان (Yield Point) وفي الواقع تكون المادة خلال الجزء AB من المنحنى في حالة عدم استقرار.

3- إذا تخطت المادة المنطقة B يأخذ الطول في الازدياد تلقائياً دون أي زيادة مقابلة في الثقل حتى تصل المادة إلى النقطة C وهي تمثل النهاية العظمى للإجهاد وبعدها يحدث اختناق (Necking) للسلك عند موضع من مواضع جسمه. ويزداد هذا الاختناق حتى تصل المادة إلى الحالة الممثلة بالنقطة D وعندها ينقطع السلك. وتعرف النقطة D بنقطة الانقطاع (Breacking Point) ويسمى الاجهاد في هذه الحالة اجهاد الانقطاع. والجدول (2-1) يوضح إجهاد الانقطاع لعدد من المواد.

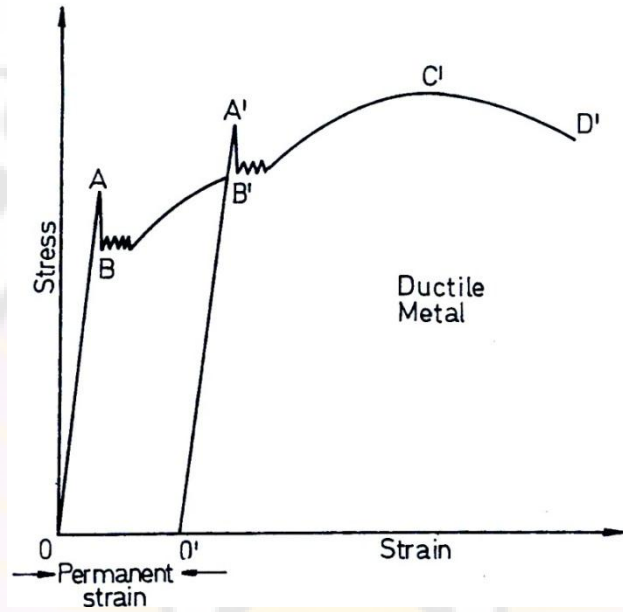
الجدول (2-1): إجهاد الانقطاع لعدد من المواد

المادة	اجهاد الانقطاع Pa or Nm ²
Aluminum	2.2×10^8
Brass	4.7×10^8
Glass	10×10^8
Iron	3.0×10^8
Phosphor bronze	5.6×10^8
Steel	11.0×10^8

4- إذا أزيل الإجهاد عن السلك بعد النقطة A فإنه لا يستعيد حالته الأصلية بالضبط ولكنه يصل إلى الحالة الممثلة بالنقطة O'، شكل (2-2)، ويكون طول السلك عند هذه النقطة أطول من طوله الأصلي.

ويُعرف المدى من الانفعال O' O بالانفعال أو التشوه الدائم (Permanent strain) وإذا ما كررت التجربة السابقة لنفس السلك ابتداءً من النقطة O' فإننا نحصل على منحنى مرونة مشابهاً للمنحنى الأول. أي أن

المنحنى الجديد له حد مرونة A' ونقطة إذعان B' وهكذا..... وجميع هذه القيم أكبر من مثيلاتها في المنحنى الأول. بمعنى أن المادة أصبحت أكثر صلابة.



الشكل (2-2).

2-6- معامل المرونة Moduli of Elasticity

سوف نقتصر دراستنا على الحالات التي يتغير فيها الطول أو الحجم أو الشكل وفقاً لقانون ((هوك)) حتى نقطة حد المرونة.

وهناك ثلاثة أنواع لمعامل المرونة حسب كيفية حدوث الإجهاد وهي:

2-6-1 معامل المرونة ليونج Young's Modulus (y)

إذا أثرت قوتان متساويتان ومتضادتان في الاتجاه قيمة كل منهما F على سلك طوله L ومساحة مقطعه A ونتج عن ذلك تغيراً في الطول بمقدار ΔL ، حينئذ:

معامل يونج للمرونة $Y = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{التشوه}}$

$$\therefore Y = \frac{F/A}{\Delta l/L} = \frac{F}{A} \cdot \frac{L}{\Delta l} \quad (1-2)$$

إن وحدات معامل يونغ هي واحدة إجهاد، (إما نيوتن/م² أو داین/سم² أو باوند قوة/قدم²) وحسب النظام المستخدم
مثال (2-1):

سلك من النحاس في وضع رأسي طوله 120 سم وقطره 0.82 مم مثبت من طرفه العلوي ومعلق في نهاية طرفه الآخر ثقل قدره 5.3 كيلو غراماً.

أوجد قيمة:

أ- الإجهاد المؤثر على السلك.

ب- الاستطالة الحادثة في طول السلك.

ت- التشوه الناتج في جسم السلك.

بمعلومية أن معامل يونج لمادة السلك 1.2×10^{12} داین/سم² وتسارع الجاذبية الأرضية 980 سم/ثانية².

الحل:

أ-

$$\frac{\text{القوة}}{\text{مساحة مقطع السلك}} = \text{الإجهاد}$$

$$\text{Stress} = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi r^2}$$

$$= \frac{5.3 \times 10^3 \times 980}{0.53 \times 10^{-2}} = \frac{F}{A} = 980 \text{ dynes/cm}^2$$

ب- تعيين الاستطالة في طول السلك Δl بحل المعادلة (1-2)،

$$Y = \frac{F/A}{\Delta l/L}$$

$$\therefore \Delta l = \frac{F}{A} \times \frac{L}{Y}$$

$$= 980 \times \frac{120}{1.2 \times 10^{12}}$$

$$\Delta l = 9.8 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

ت- نوجد التشوه الناتج في جسم السلك باستخدام المعادلة:

$$\therefore \text{Strain} = \frac{\Delta l}{L}$$

$$= \frac{9.8 \times 10^{-8}}{120}$$

$$\text{Strain} = 8.167 \times 10^{-10}$$

مثال (2-2):

قضيب من الصلب طول 5 سم ومساحة مقطعه 0.12 سم². أثر على

طرفيه بقوة ضاغطة حتى نقص طوله بنسبة 3% من الطول الأصلي.

أوجد قيمة:

أ- الاجهاد الضاغط.

ب- القوة المؤثرة على كل من طرفي القضيب.

(Y لمادة القضيب = 2×10^{12} دايين/سم²)

الحل

أ- نوجد الاجهاد الضاغط من المعادلة (1-2):

$$\frac{F}{A} = \frac{\Delta l}{L} \cdot Y$$

$$\therefore \frac{F}{A} = 0.003 \times 2 \times 10^{12} = 6.0 \times 10^{10} \text{ dynes/cm}^2$$

ب- القوة المؤثرة على كل من طرفي القضيب F هي:

$$F = 6.0 \times 10^{10} \times 0.12$$

$$\therefore F = 7.2 \times 10^9 \text{ dynes}$$

2-6-2 معامل المرونة الحجمي (Bulk Modulus (B

يتغير حجم الأجسام بأنواعها بتغير الضغط الواقع عليها. وفي حالة السوائل والغازات يمكن تغيير الضغط عليها بوضعها في أسطوانة يقفلها مكبس وبالضغط على المكبس يتغير الإجهاد. أما في حالة الأجسام الصلبة فيؤثر عليها بضغط هيدروستاتيكي لإحداث إجهاد.

وإذا فرضنا أن الحجم الأصلي V قد تغير بمقدار ΔV بتأثير تغير في الضغط مقداره ΔP حينئذ:

$$\text{معامل المرونة الحجمي } B = \frac{\text{القوة العمودية المؤثرة على وحدة المساحة}}{\text{النقص أو الزيادة في الحجم بالنسبة للحجم الأصلي}}$$

بمعنى أن:

$$\frac{\text{الاجهاد}}{\text{التشوه}} = B$$

$$\therefore B = - \frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (2-2)$$

والإشارة السالبة تدل على أن ΔP , ΔV متضادتين.

ويجب الإشارة هنا إلى أن مقلوب معامل المرونة الحجمي يعرف بمعامل الانضغاط (Compressibility) ووحداته هي سم²/داين أو م²/نيوتن أو إنج²/باوند، والجدول (2-2) يوضح معامل الانضغاطية لعدد من السوائل المتداولة.

الجدول (2-2): معامل الانضغاطية لعدد من السوائل

السوائل	الانضغاطية K		
	Pa ⁻¹	in ² /lb	Atm ⁻¹
Carbon disulfide ثاني كبريت الكربون	93×10^{-11}	64×10^{-7}	94×10^{-4}
Ethyl alcohol كحول ايتيلي	110×10^{-11}	76×10^{-7}	111×10^{-4}
Glycerine غليسيرين	21×10^{-11}	14×10^{-7}	21×10^{-4}
Mercury زئبق	3.7×10^{-11}	2.6×10^{-7}	3.8×10^{-4}
Water ماء	45.8×10^{-11}	31.6×10^{-7}	46.4×10^{-4}

مثال (2-3):

وضعت قطعة من النحاس عرضها 3 سم وطولها 4 سم وارتفاعها 4 سم داخل اسطوانة من الصلب مملوءة بزيت. فإذا ازداد ضغط هذا الزيت من 1 ضغط جوي إلى 101 ضغط جوي. أوجد:

أ- الإجهاد.

ب- التشوه.

ت- التغير في حجم قطعة النحاس. بمعلومية أن معامل المرونة الحجمي للنحاس 1.4×10^{12} داين/سم².

الحل:

أ- الإجهاد المؤثر على قطعة النحاس = التغير في ضغط الزيت.

$$\therefore AP = 101 - 1 = 100 \text{ atm}$$

$$\therefore I \text{ atm.} = 76 \times 13.6 \times 980 = 1.013 \times 10^6 \text{ dynes/cm}^2$$

$$\therefore AP = 100 \times 1.013 \times 10^6 = 1.013 \times 10^8 \text{ dynes/cm}^2$$

ب- نوجد الانفعال الناتج في قطعة النحاس بحل المعادلة (2-2).

$$B = - \frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}}$$

$$\therefore \frac{\Delta V}{V} = - \frac{\Delta P}{B}$$

$$= - \frac{1.013 \times 10^8}{1.4 \times 10^{12}}$$

$$\therefore \frac{\Delta V}{V} = -7.24 \times 10^{-5}$$

ت- التغير في حجم قطعة النحاس ΔV = التشوه $\times$ الحجم الأصلي. أي أن

$$\Delta V = -7.24 \times 10^{-5} \times 48 \text{ cm}^3$$

$$\therefore \Delta V = -3.47 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$$

أي أن حجم قطعة النحاس قد نقص بمقدار حوالي 0.0035 سم³.

2-3-6-3 معامل مرونة القص (N) Shear Modulus

وهو المعروف بمعامل الصلابة (Modulus of Rigidity) ويعرف

بأنه النسبة بين القوة المماسية المؤثرة على وحدة المساحة وزاوية القص.

يبين الشكل (2-3) التشوه المسمى بتشوه القص (Shearing Strain)

فإذا أثرت قوة مماسية على السطح العلوي لمكعب طول ضلعه L بحيث تم

إزاحة الحافة (bc) إلى الوضع (b'c') بزيادة قدرها x مع عدم تحرك قاعدة

المكعب (ad) فإن الزاوية θ التي دارها ضلع المكعب هي مقياس لتشوه القص الناتج.

$$\theta = \tan \theta = \frac{X}{L} = \frac{\text{تغير الطول}}{\text{الطول الأصلي}} = \text{هذا يعني أن: تشوه القص}$$

بمعنى أن: تشوه أو انفعال القص $\theta = cd\hat{c} = b\hat{A}b =$ ويلاحظ أن القطر (ac) قد ازداد طوله في حين أن القطر ($b\hat{d}$) قد نقص طوله. وإذا كانت مساحة السطح العلوي للمكعب هي A حينئذ:

$$\frac{\text{إجهاد القص}}{\text{تشوه القص}} = N \text{ معامل مرونة القص}$$

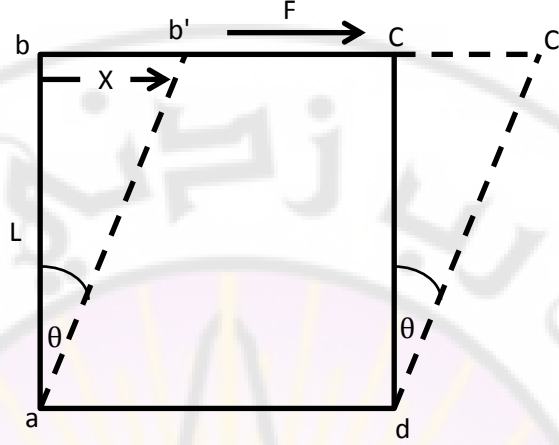
$$\therefore N = \frac{\frac{F}{A}}{\theta} = \frac{F}{A\theta} \quad (3 - 2)$$

يلاحظ أن تشوه القص الذي رمزنا له بالزاوية θ قد استنتج على أساس أن التشوه الحادث هو النسبة بين الإزاحة X في اتجاه القوة والمسافة الرأسية $L = ab$ أي أن:

$$\frac{X}{L} = \tan \theta = \theta \quad (4 - 2)$$

حيث أن θ زاوية صغيرة:

$$\therefore N = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{X}{L}} \quad (5 - 2)$$



الشكل (2-3).

مثال (2-4):

أثرت قوة مماسية قدرها 400 داین على السطح العلوي لمستطيل من الصلب ارتفاعه 5سم ومساحة سطحه 15سم². فإذا علم أن قاعدة المستطيل غير قابلة للحركة أوجد:

أ- إجهاد القص.

ب- تشوه القص.

ت- الإزاحة الناتجة في اتجاه القوة.

بمعلومية أن معامل مرونة القص لمادة المستطيل هو 8.11×10^{11} داین/سم².

الحل

أ-

$$\frac{F}{A} = \text{إجهاد القص}$$

$$\therefore \frac{F}{A} = \frac{400}{15} = 26.67 \text{ dynes/cm}^2$$

ب- نوجد تشوه القص θ باستخدام المعادلة (2-3):

$$\theta = \frac{F}{A} / N$$
$$= \frac{26.67}{8.11 \times 10^{11}}$$

$$\therefore \theta = 3.29 \times 10^{-11} \text{ radians}$$

ت- نوجد الازاحة x الناتجة في اتجاه القوة بحل المعادلة (2-3):

$$x = \theta \cdot L$$

حيث L ارتفاع المستطيل = 5سم.

$$\therefore x = 3.29 \times 10^{-11} \times 5 = 16.45 \times 10^{-11} \text{ cm.}$$

2-7- نسبة بواسون (σ) Poisson's Ratio

يتضح مما سبق أنه عند التأثير بقوة شد على جسم، وليكن سلك مثلاً، أن التشوه الحادث للسلك يؤدي إلى استطالته في اتجاه القوة. ولكن يحدث في نفس الوقت انكماش للسلك في اتجاه نصف القطر أي في الاتجاه العمودي على اتجاه تأثير القوة بمعنى أنه بجانب التشوه الطولي يوجد أيضاً انفعال مستعرض (Lateral strain) وتعرف النسبة بين التشوه المستعرض إلى التشوه الطولي بنسبة بواسون.

$$\frac{\text{التشوه المستعرض}}{\text{التشوه الطولي}} = \sigma \text{ نسبة بواسون}$$

فإذا كانت r هي نصف قطر السلك، Δr هو التغير الحادث في نصف القطر نتيجة لقوة أحدثت تشوه طولي قدره $\frac{\Delta l}{L}$ حيث L طول السلك، ΔL الاستطالة الحادثة.

حيث:

$$\sigma = - \frac{\Delta r}{r} / \frac{\Delta l}{l} \quad (6-2)$$

والإشارة السالبة تدل على أن $\Delta L, \Delta r$ متضادتان. وقد وجد أن نسبة بواسون ثابتة وتختلف باختلاف المادة وتنحصر قيمتها بين صفر و $\frac{1}{2}$ لجميع المواد.

الجدول (2-3) يوضح القيم التقريبية لمعاملات المرونة ونسبة بواسون لعدة مواد.

الجدول (2-3) القيم التقريبية لمعاملات المرونة

المادة	معامل يونغ Y		معامل القص S		معامل الحجم B		نسبة بواسون
	Pa	lb.in ⁻²	Pa	lb.in ⁻²	Pa	lb.in ⁻²	
Aluminum المنيوم	0.70×10^{12}	10×10^6	0.30×10^{12}	3.4×10^6	0.70×10^{12}	10×10^6	0.16
Urass نحاس أصفر	0.91×10^{12}	13×10^6	0.36×10^{12}	5.1×10^6	0.61×10^{12}	8.5×10^6	0.26
Copper نحاس أحمر	1.1×10^{12}	16×10^6	0.42×10^{12}	6.0×10^6	1.4×10^{12}	20×10^6	0.32
Glass زجاج	0.55×10^{12}	7.8×10^6	0.23×10^{12}	3.3×10^6	0.37×10^{12}	5.2×10^6	0.19
Iron حديد	1.9×10^{12}	26×10^6	0.70×10^{12}	10×10^6	1.0×10^{12}	14×10^6	0.27
Lead رصاص	0.16×10^{12}	2.3×10^6	0.056×10^{12}	0.8×10^6	0.077×10^{12}	1.1×10^6	0.43
Nickel نيكل	2.1×10^{12}	30×10^6	0.77×10^{12}	11×10^6	2.6×10^{12}	34×10^6	0.36
Steel فولاذ	2.0×10^{12}	29×10^6	0.84×10^{12}	12×10^6	1.6×10^{12}	23×10^6	0.19
Tungsten تنغستين	3.6×10^{12}	51×10^6	1.5×10^{12}	21×10^6	2.0×10^{12}	29×10^6	0.20

مثال (5-2):

سلك من الرصاص في وضع رأبي طوله 100 سم ونصف قطره 2.5 مم. ثبت من طرفه العلوي وعلق ثقل في طرفه السفلي فأدى إلى استطالته بمقدار 0.5 مم وأصبح نصف قطره 2.4995 مم . أوجد نسبة بواسون.

الحل:

$$\sigma = - \frac{\Delta r}{r} / \frac{\Delta l}{l}$$

$$\therefore \text{Lateral strain} = - \frac{\Delta r}{r} = \frac{2.4995-2.5}{2.5} = 0.2 \times 10^{-3}$$

$$\therefore \text{Longitudinal strain} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{0.05}{100} = 0.5 \times 10^{-3}$$

نسبة بواسون

$$\sigma = \frac{0.2 \times 10^{-3}}{0.5 \times 10^{-3}} = 0.4$$



تمارين ومسائل

1- يعلق مصعد صغير محمل ب 500 كيلو غرام من كبل فولاذي طوله 3م ومساحة مقطعه 0.20 سم² فيلاحظ أن الكبل يمتط بمقدار 0.4 سم زيادة علة طوله قبل التحميل. أحسب الإجهاد والتشوه وقيمة معامل يانغ للكبل الفولاذي.

2- يتدلى ثقل مقداره 20 lb من سلك فولاذي شاقولي طوله 2ft ومساحة مقطعه 0.001ft² ويتدلى من أسفل هذا الوزن سلك فولاذي مماثل يحمل وزنا مقداره 5lb. أحسب:
أ- التشوه في الطول.
ب- استطالة كل من السلكين.

3- سلك من الصلب طوله 4 متر وقطره 2 ملليمتر. ثبت طرفه العلوي ثم علق في طرفه السفلي ثقل مقداره 8 كيلو جراماً. أحسب الاستطالة الحادثة في طول السلك بمعلومية أن معامل يونج للمرونة 2×10^{12} دايـن/سم².

4- سلك منتظم المقطع طوله 250 سم وكتلته 16جم وكثافته 7.8 جم/سم³ يستطيل بمقدار 1.2 ملليمترأ عندما يشد بقوة تعادل ثقل مقداره 8 كيلوجراماً. أحسب قيمة معامل يونج للمرونة لمادة السلك.

5- ثبت سلك منتظم المقطع من طرفه العلوي وعلق ثقل في طرفه السفلي. فإذا كانت طاقة التشوه لوحدة الحجم من السلك هي 2000 جول/متر³ والزيادة في الطول لوحدة الأطوال هي 2×10^{-3} . أوجد:
أ- معامل يونج للمرونة.

ب-الإجهاد المؤثر على السلك.

6- سلك من النحاس طوله 150 سم وقطره 2.5 ملليمتر. ثبت من أحد طرفيه في وضع رأسي ثم علق في الطرف الآخر ثقل مقداره 8 كيلوجراماً. فإذا علم أن معامل يونج لمادة السلك هو $10^{11} \times 12.1$ دايـن/سم². أوجد:

أ- الإجهاد المؤثر على السلك.

ب-التشوه الناتج في السلك.

7- ثبت قاعدة مكعب من النحاس طول ضلعه 5 سم ثم أثر على سطحه العلوي بقوة مماسية مقدارها $10^8 \times 1.5$ دايـن. أوجد:

أ- إجهاد القص.

ب-تشوه القص.

ت-مقدار إزاحة السطح العلوي للمكعب.

إذا علم أن معامل مرونة القص للنحاس هو $10^{11} \times 4.24$ دايـن/سم².

8- مكعب من الذهب طول ضلعه 2 سم أثر على سطحيه العلوي والسفلي بقوتين مماسيتين ومتضادتين قيمة كل منهما 800 نيوتن. أوجد العمل الناتج من انفعال القص. إذا علم أن معامل القص للذهب هو $10^{11} \times 2.77$ دايـن/سم².

9- سلك طوله 50 سم ومساحة مقطعه واحد ملليمتر مربع. أوجد:

أ- العمل المبذول في استطالة السلك بمقدار واحد ملليمتر.

ب-القوة اللازمة لاستطالة السلك بمقدار 5 ملليمترات.

إذا علم أن معامل يونج لمادة السلك هو $10^{12} \times 1.32$ دايـن/سم².

الفصل الثالث

توازن السوائل Hydrostatics

3-1- تمهيد:

يُسمّى سائلاً كل مادة قادرة على أن تُسال وهي بهذا تشمل الموائع والغازات. تتضغط الغازات في الحالة العامة بسهولة أما الموائع فتكاد تكون غير قابلة للانضغاط وسنهمل في دراستنا لهذا الفصل التغيرات الضئيلة التي تحدث في حجم المائع عند تعرضه للضغط.

نسمي علم توازن السوائل العلم الذي يهتم بدراسة السوائل وهي ساكنة، في حين نسمي علم تحريك السوائل العلم الذي يعالج السوائل في حالة الحركة. وسنبداً دراستنا للسوائل الساكنة وسوف نستعرض مفهوم الكثافة والضغط والدافعة والتوتر السطحي وهنا نلاحظ أن شروط توازن السوائل تعتمد على قانون نيوتن الأول.

3-2- الكثافة Densty:

تعرف الكثافة على أنها كتلة واحدة الحجم. وتسمى الكتلة الحجمية أو الكثافة المطلقة، وعلى هذا الأساس فإن كثافة مادة متجانسة واحدة في جميع أجزائها. إن واحدة قياس الكثافة في الجملة الدولية هي الكيلوغرام لكل متر مكعب (kg.m^{-3}). أما الواحدة السغوية فهي الغرام لكل سنتيمتر مكعب (gr.cm^{-3}) وهي واحدة واسعة الانتشار، ونستخدم الحرف اليوناني (ρ) للدلالة

على الكثافة. فإذا كانت كتلة المادة (m) وحجمها (v) فإن كثافتها (ρ) تعطى بالعلاقة:

$$\rho = \frac{m}{v} \Rightarrow m = \rho \cdot v \quad (1 - 3)$$

الجدول (3-1): كثافة عدد من الأجسام الصلبة عند درجة الحرارة العادية

المادة Material	الكثافة Density g.cm ⁻³
Aluminum	2.7
Brass	8.6
Copper	8.9
Gold	19.3
Ice	0.92
Iron	7.8
Lead	11.3
Platinum	21.4
Silver	10.5
Steel	7.8
Mercury	13.6
Ethyl alcohol	0.81
Benzene	0.90
Glycerin	1.26
Water	1.00
Sea qater	1.03

ولدينا عامل التحويل التالي: $g. cm^{-3} = 1000 kg. m^{-3}$

وهو عامل مفيد لدى استخدام هذا الجدول. إن أعلى المواد كثافة على سطح الأرض هو معدن أسميوم ($22.5 g.cm^{-3}$). أما كثافة الهواء فهي تقارب ($0.0012 g.cm^{-3}$) وكثافة الماء ($1 g.cm^{-3}$) في حين أن كثافة النجم القزم الأبيض هي من رتبة ($10^6 g.cm^{-3}$) أم كثافة النجوم النترونية فهي من رتبة ($10^{15} g.cm^{-3}$).

ويُعرّف الوزن النوعي أو الكثافة النسبية (specific gravity) لجسم ما على أنه يساوي نسبة كثافته إلى كثافة الماء في الدرجة 4°C (وقد حُدّدت الدرجة 4°C لأنها الدرجة التي تكون فيها كثافة الماء النقي عظمى، وتساوي الواحد غ/سم³). أو كتلة الجسم إلى كتلة ما يعادله من الماء أو حجم الجسم إلى حجم ما يعادله من الماء. وهو عدد مجرد لا واحدة له ويعد اصطلاح الوزن النوعي اصطلاحاً غير موفق حيث إنه ليس فيه ما يدل على الوزن ولعل الأفضل منه اصطلاح الكثافة النسبية.

يُعدّ قياس الكثافة قياساً مهماً في التحاليل فيمكننا مثلاً تحديد ما إذا كانت مدخرة (بطارية) مشحونة بالكهرباء أم لا عن طريق كثافة المحلول الكهرليتي وهو محلول حمض الكبريت. فلدى تفريغ المدخرة يتحد حمض الكبريت (H_2SO_4) مع الرصاص الموجود في صفائح المدخرة فيتكون من اتحادهما كبريتات الرصاص (PbSO_4) غير القابلة للانحلال مما يؤدي إلى انخفاض تركيز المحلول. فكثافة المحلول تنخفض من (1.30 g.cm^{-3}) في حالة مدخرة مشحونة جيداً إلى (1.15 g.cm^{-3}) عند ضعف شحنها. وبالمثل فإن كثافة مانع التجمد الذي يتألف من محلول غليكول الايثيلين في الماء كثافته (1.12 g.cm^{-3}) مع إضافات ضئيلة من مواد مانعة للتأكسد. إن قياس تركيز الغليكول الذي يحدد نقطة تجمد المحلول يتحدد بقياس بسيط للكثافة. ويمكن إجراء هذين القياسين بسهولة في محطات خدمة السيارات باستخدام مكثاف السوائل (hydrometer) الذي يقيس كثافة السائل عن طريق ملاحظة السوية التي يطفو عليها جسم عياري عندما يغمر في السائل.

3-3- الضغط في السائل Liquid pressure:

عندما بحثنا في موضوع ضغط السوائل في سنوات سابقة أهملنا وزن السائل ذاته وافترضنا أن ضغط السائل هو نفسه أينما كان الموضع. في الحقيقة أن الأمر ليس كذلك فالضغط الجوي مثلاً عند سوية سطح البحر هو أعلى منه على قمة جبل عالٍ كما أن ضغط الماء في بحيرة أو محيط يزداد بازدياد البعد عن السطح. وهكذا نرى حاجتنا لإعادة النظر في مفهوم الضغط فنعرف الضغط P في نقطة من سائل على أنه القوة الناعمية dF المؤثرة في مساحة صغيرة dA حول تلك النقطة مقسومة على المساحة ويكون لدينا العلاقة:

$$p = \frac{dF}{dA} , \quad dF = p dA \quad (2 - 3)$$

وإذا كان الضغط متماثلاً في جميع النقاط الواقعة في مستوٍ محدود مساحته A فعندها تؤول العلاقة السابقة إلى:

$$p = \frac{F}{A} \quad (3 - 3)$$

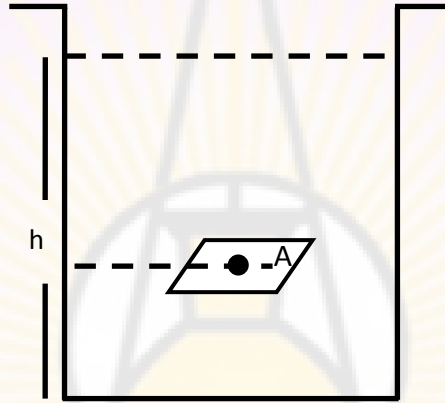
يمكننا استنتاج علاقة عامة بين الضغط p في أية نقطة ضمن السائل في حقل الثقالة الأرضية وبين بعد هذه النقطة h عن السطح. فإذا كان السائل في حالة توازن فإن أي حجم منه مقطوع صغير سيكون في حالة توازن. لننظر في حجم معين من السائل ثخانتته dy ومساحة وجهه العلوي A كما هو واضح بالشكل (3-1). فإذا رمزنا بـ (ρ) إلى كثافة السائل (التي نفترضها متماثلة) فإن كتلة حجم السائل المقطوع تساوي m ووزنه يساوي w . وتكون القوة المؤثرة في الجزء المقطوع من السائل والناشئة من السائل المحيط بهذا الجزء من كل جانب عمودية على سطحه. وبسبب التناظر فإن المحصلة الأفقية للقوى

على الجوانب الشاقولية للحجم معدومة. أما القوى الشاقولية المؤثرة هي ثقل عمود السائل h أي

$$\therefore F = w$$

من تعريف الضغط والمعادلة (3-3) فإن الضغط في السائل يعطى في العلاقة:

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



الشكل (3-1) الضغط في نقطة داخل السائل.

حيث F تمثل القوة التي يؤثر بها السائل في المساحة A وهي تمثل وزن عمود السائل المتواجد فوق المساحة A

$$\therefore F = w = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot A \cdot h \cdot g \quad (4 - 3)$$

وبالتعويض بالمعادلة (3-3) فإن:

$$\therefore p = \rho \cdot g \cdot h \quad (5 - 3)$$

يتبين من المعادلة (5-3) إن الضغط عند أي نقطة داخل السائل يعتمد

على بعد النقطة من السطح وكثافة السائل.

وإذا أخذنا بالاعتبار الضغط الجوي p_a المؤثر على سطح السائل من الأعلى، فقد أثبت تورشيلي: إن الضغط عن أي نقطة داخل السائل تبعد عن السطح مسافة h يعطى حسب العلاقة:

$$P_h = p_a + \rho \cdot g \cdot h \quad (6 - 3)$$

هذا يعني أن الضغط عند العمق h في سائل أعلى من الضغط عند السطح وأن الضغط يزداد طردياً مع زيادة العمق في السائل حيث أن الضغط عند السطح يساوي الضغط الجوي، وإن الضغط داخل الماء هو الضغط الجوي (P_a) مضافاً له ثقل عمود الماء المتموضع فوق الجسم. إن الضغط الجوي (P_a) يعبر عن ثقل عمود الهواء (الغلاف الجوي) المحصور بين سوية سطح البحر على الكرة الأرضية (السوية الصفرية) وحتى انتهاء الغلاف الجوي في الأعالي. يُقاس الضغط الجوي بمقدار ارتفاع عمود الزئبق h في مقياس الضغط الزئبقي. عند وضع مقياس الضغط الزئبقي عند سوية سطح البحر (المستوى الصفري) فإن الزئبق في المقياس يرتفع إلى سوية h تساوي 76 سم زئبقي أي أن:

$$(h = 0.76 \text{ m.Hg} = 76 \text{ cm.Hg} = 760 \text{ mm.Hg})$$

وحسب قانون تورشيلي فإن الضغط الجوي النظامي يُحسب كالاتي:

$$P_a = \rho \cdot g \cdot h$$

حيث:

$$\rho: \text{كثافة الزئبق. } (13.6 \text{ gr/cm}^3 = 13600 \text{ kg/m}^3)$$

$$g: \text{الجاذبية الأرضية. } (980 \text{ cm/sec}^2 = 9.8 \text{ m/sec}^2)$$

$$h: \text{ارتفاع عمود الزئبق. } (76 \text{ cm Hg} = 0.76 \text{ m Hg})$$

$$\begin{aligned}
\therefore p &= (13600 \text{ kg/m}^3) (9.8 \text{ m/sec}^2) (0.76 \text{ m Hg}) \\
&= 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \text{ (pascal)} \\
&= 1.013 \times 10^5 \times 10 \text{ dy/cm}^2 \\
&= 1.013 \times 10^6 \text{ dy/cm}^2 \\
&= 14.7 \text{ lb/in}^2 \\
&= 1 \text{ atm}
\end{aligned}$$

أي أن الضغط الجوي عند سوية سطح البحر يساوي (1.013×10^5) باسكال. وكلما ارتفعنا عن سطح البحر يقل الضغط الجوي عن هذه القيمة والعكس بالعكس.

يعتمد الضغط في السوائل إذن على العمق ولا يتعلق بشكل الوعاء. وينتج من المعادلة (3-5) أنه إذا زاد p_a لسبب ما كأن يوضح مكبس فوق السطح وتطبق عليه قوة نحو الأسفل فإن الضغط p عند أي عمق ينبغي أن يزداد بالمقدار ذاته. كان العالم الفرنسي باسكال الذي عاش بين عامي (1662-1623) أول من اكتشف هذه الحقيقة عام 1653 والتي تعرف باسم قانون باسكال وهو ينص على ما يلي:

إن أي ضغط يطبق على سائل محصور ينتقل دون نقصان إلى جميع أجزاء السائل وإلى جدران الوعاء الذي يحويه.

إن المكبس المائي المبين بصورة رمزية في الشكل (2-3) هو توضيح لمبدأ باسكال. وفيه يستخدم مكبس مساحة مقطعه الصغير a ويطبق عليه قوة صغيرة f على سائل زيتي. فينتقل الضغط f/a عبر الأنبوب الواصل بينه وبين

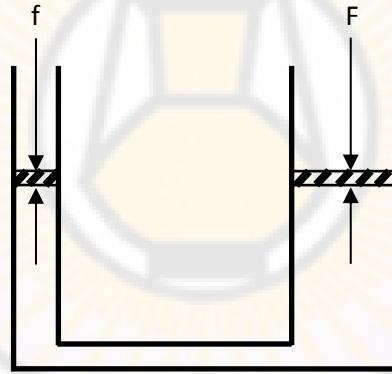
مكبس مساحة مقطعة أكبر وتساوي A . ولما كان الضغط في كلتا الاسطوانتين واحداً فإنه يكون:

$$p = \frac{f}{a} = \frac{F}{A}$$

ومنه نجد:

$$F = \frac{A}{a} \times f$$

وهكذا فالمكبس المائي يلعب دور جهاز مضخم وتساوي نسبة التضخيم النسبة بين مساحتي المكبسين. وتستخدم هذه الطريقة في تضخيم القوى في عدة تطبيقات مفيدة مثل كراسي الحلاقين وكراسي أطباء الأسنان وروافع السيارات والمكابح الهيدروليكية.



الشكل (3-2) مبدأ عمل المكبس المائي

لقد افترضنا في استنتاجنا للمعادلة (3-4) أن كثافة السائل منتظمة وثابتة وهذا منطقي في حالة السوائل بيد أنه غير صحيح في حالة الغازات. ففي حسابنا لتغيرات الضغط في الغلاف الجوي ينبغي أن نحسب مقدار تغير الكثافة هذا إلا أننا نشير إلى أن كثافة الغازات أصغر بكثير من كثافة السوائل وعليه

فإن تغيراً صغيراً في الارتفاع (مثلاً بضعة أمتار لا يؤدي إلى تغير محسوس في ضغط الغاز).

إن المقدار المهم من الناحية العملية هو فرق الضغط داخل وعاء عن الضغط الجوي. فإذا كان الضغط مثلاً داخل دولاب سيارة مساوياً للضغط الجوي فإن الدولاب يصبح طرياً. وعندما نقول أن الضغط داخل دولاب السيارة هو 32 باونداً فإننا نعني في الواقع (32 lb.in^{-2}) ويكون عندها الضغط أعلى من الضغط الجوي الذي يساوي (14.7 lb.in^{-2}) بهذا المقدار. ويكون الضغط الإجمالي داخل دولاب السيارة مساوياً (43.7 lb.in^{-2}). نسمي مقدار الضغط الفائض عن مقدار الضغط الجوي باسم "الضغط القياسي" في حين نسمي الضغط الإجمالي "الضغط المطلق" ويستخدم المهندسون الكتابات psig للدلالة على الضغط القياسي مقدراً بالباوند لكل أنش مربع و psia للدلالة على الضغط المطلق مقدراً بالوحدة ذاتها. ولدينا بالنسبة للضغط الجوي الطبيعي عند سطح البحر:

$$P_a = 1.013 \times 10^6 \text{ dyn.cm}^{-2} = 14.7 \text{ lb.in}^{-2} = 1 \text{ atm}$$

لعل أبسط جهاز لمعرفة الضغط القياسي هو مقياس الضغط ذو الأنبوب المفتوح المبين في الشكل (3-3) حيث يحتوي الأنبوب الذي يأخذ شكل الحرف U على سائل ويوصل أحد طرفي الأنبوب بالوعاء الذي نرغب قياس الضغط فيه، ويتصل الطرف الآخر للأنبوب بالضغط الجوي P_a . إن الضغط عند أسفل العمود الأيسر هو $p + \rho \cdot g \cdot y_1$ في حين أن الضغط عند أسفل العمود الأيمن أي

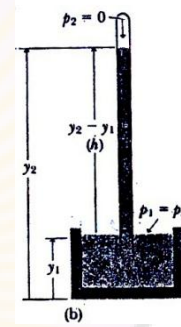
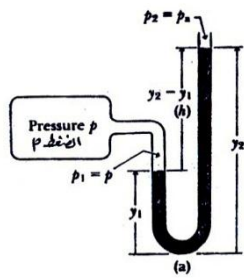
عن النقطة ذاتها $p_a + \rho \cdot g \cdot y_2$ حيث ترمز ρ إلى كثافة السائل الموضوع في الأنبوب. ولما كان من الضروري أن يتساوى الضغطان فإنه يكون:

$$p + \rho \cdot g \cdot y_1 = p_a + \rho \cdot g \cdot y_2$$

وبالتالي يكون:

$$p - p_a = \rho \cdot g \cdot (y_2 - y_1) = \rho \cdot g \cdot h \quad (7 - 3)$$

يمثل الضغط p الضغط المطلق، في حين يمثل المقدار $p - p_a$ الضغط القياسي، وعليه فإن الضغط القياسي يتناسب مع فرق الارتفاع بين عمودي السائل.



الشكل (3-3) مقياس الضغط الجوي

الشكل (3-4) مقياس الضغط الجوي

إن مقياس الضغط الجوي عبارة عن أنبوب زجاجي طويل مغلق من أحد طرفيه وهو يملأ بالزئبق ثم ينكس في حوض من الزئبق كما هو مبين في الشكل (3-4). إن الحيز فوق عمود الزئبق لا يحتوي إلا على بخار الزئبق، وفي درجة حرارة المخبر يكون ضغط البخار مهملاً وعليه يمكننا أن نكتب في ضوء العلاقة (5-3) ما يلي:

$$P_a = \rho \cdot g \cdot (y_2 - y_1) = \rho \cdot g \cdot h \quad (8 - 3)$$

وهكذا فإن مقياس الضغط الجوي الزئبقي يشير إلى الضغط الجوي مباشرة عن طريق ارتفاع عمود الزئبق. إن واحدة الضغط الدولية هي الباسكال ويرمز له بـ (p_a) وهو يساوي ($N.m^{-2}$). وثمة واحدتان أخريان ترتبطان بهذه الوحدة هما البار وهو ما يعادل $10^5 p_a$ والميلي بار وهو يساوي 10^{-3} بار = ($10^2 p_a$) إن الضغط الجوي هو من مرتبة 1000 ميلي بار. وتستخدم محطات الأرصاد الجوية هذه الوحدة عادة للدلالة على الضغط ولدينا:

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ pascal (N/m}^2\text{)} = 1.013 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2 = 1.013 \text{ bar}$$

أي أن: 1 باسكال = 1 نيوتن/م² = 10 دايين/سم² ← 1 دايين/سم² = 0.1 باسكال ولما كان استخدام مقياس الضغط ذي الأنبوب المفتوح وكذلك مقياس الضغط الزئبقي شائعاً في المخابر فإن الضغط يقاس أيضاً بدلالة ارتفاع عمود الزئبق بواحدات أنشأت الزئبق أو ميلترات الزئبق التي تكتب اختصاراً بالشكل mm Hg. ولقد رمز مؤخراً للضغط الناشئ عن ميلتر واحد من الزئبق بوحدة الـ Torr نسبة إلى تورشيلي الذي ابتكر مقياس الضغط الزئبقي. وبالطبع تعتمد واحدة الضغط هذه على كثافة الزئبق، ولهذا فقد آل استخدامها تدريجياً إلى الزوال ليحل محلها الباسكال. ثمة جهاز مألوف لقياس ضغط الدم يعرف باسم Sphygmomanometer أي مقياس ضغط الدم. وهو يتألف من مقياس للضغط ذي أنبوب مفتوح كالمبين في الشكل (3-3). إن قراءة بهذا المقياس مثل 130/80 تشير إلى النهايتين العظمى والصغرى لضغط الدم مقيستين بوحدة ميلترات الزئبق أو الـ Torr. إن الضغط الساكن للدم يختلف باختلاف الموقع من الجسم ولذا يستخدم الجزء العلوي من الذراع الذي يقع محاذة القلب لقياس

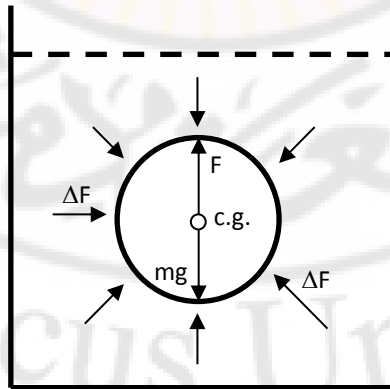
ضغط الدم. كما يتأثر ضغط الدم بالطبيعة اللزجة له وبالصمامات التي يمر عبرها وكذلك بالتأثيرات الجسمية التي تقود إلى تغير قطر الأوعية الدموية بهدف تنظيم ضغط الدم.

3-4- دافعة أرخميدس Buoyancy:

تعد دافعة أرخميدس حادثة مألوفة فالجسم الغاطس في الماء يبدو أقل وزناً منه في الهواء. وإذا كانت الكثافة الوسطى لجسم أقل من كثافة السائل الذي يوضع فيه فإنه يطفو على سطح هذا السائل. وكأمثلة على ذلك جسم الإنسان في الماء أو المنطاد المملوء بالهليوم في الهواء.

ينص مبدأ أرخميدس على ما يلي: عندما يغمر جسم في سائل فإن السائل يؤثر في الجسم بقوة متجهة نحو الأعلى مساوية وزن السائل الذي يزيحه الجسم وللبرهان على هذا المبدأ ننظر في جزء لا على التعيين من سائل في حالة سكون.

يبين الشكل (3-5) السطح الخارجي غير المنتظم الذي يحيط بهذا الجزء من السائل وتمثل الأسهم في الشكل القوى التي يؤثر بها السائل المحيط على عناصر صغيرة من السطح.



الشكل (3-5): مبدأ أرخميدس: إن القوة الدافعة F_y تساوي وزن السائل المزاح.

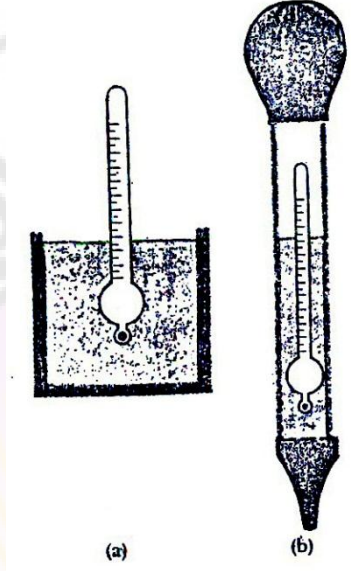
ولما كان السائل بأكمله في حالة سكون فإن المركبة x لمحصلة هذه القوى المؤثرة في السطح تكون معدومة. أما المركبة y للمحصلة ونرمز لها بـ F_y فيجب أن تساوي شدتها وزن السائل المحصور ضمن السطح وينبغي أن يمر خط فعل هذه القوة من مركز ثقل السائل.

لنفترض الآن أن السائل داخل السطح قد أزيل واستبدل به جسم صلب له الشكل الخارجي ذاته تماماً. فيكون الضغط عند كل نقطة منه مماثلاً تماماً للضغط السابق. وعليه فالقوة التي يخضع لها الجسم نتيجة وجوده في السائل لا تتغير وستساوي شدتها وزن السائل المزاح mg .

تسمى هذه القوة المتجهة نحو الأعلى والمؤثرة في الجسم الصلب باسم دافعة أرخميدس وسيمر خط فعل هذه القوة من مركز ثقل السائل المزاح.

عندما يطير منطاد في الهواء فإنه ينبغي أن يتساوى وزن الهواء الذي يساوي حجمه حجم المنطاد أي حجم الهواء الذي يزيحه المنطاد. بمعنى أن الكثافة الوسطى للمنطاد ينبغي أن تساوي كثافة وسط الهواء الذي يحيط به. وبالمثل فعندما تكون غواصة في حالة توازن في الماء فإن كثافتها الوسطى ينبغي أن تساوي كثافة الماء الذي يحيط بها.

إن الجسم الذي تكون كثافته الوسطى أقل من كثافة السائل يطفو جزئياً فوق سطح السائل. وكمثال على ذلك مكثاف السوائل المبين بالشكل (3-6).



الشكل (3-6).

مقياس كثافة بسيط

يستخدم مكثاف السوائل لقياس كثافة حمض
المدخرات أو قياس مضاد التجمد

فالمقياس يغطس في السائل حتى يساوي وزن السائل المزاح تماماً. ففي
سائل كثافته أعلى ينزاح حجم أقل من السائل ليساوي وزن المقياس وبالتالي
ينغمر منه جزء أصغر بمعنى أن مقياس الكثافة يطفو أكثر في السائل كلما
زادت كثافة السائل. وكذلك فعندما يسبح امرؤ في ماء البحر الذي يساوي كثافته
(1.03 g.cm^{-3}) فإن جسمه يطفو أكثر مما يطفو في ماء عذب.

3-5- التوتر السطحي Surface Tension:

هناك ظواهر هامة تترافق مع وجود حد فاصل بين سائل ومادة أخرى.
فالسائل المتدفق برفق من أسفل قطاره لا يتدفق منها بصورة مستمرة ولكن على
هيئة قطرات متتابعة. وإذا وضعت إبرة خياطة برفق على سطح الماء فإنها

تسبب انخفاضاً في موضع وجودها وتستقر على السطح دون أن تغطس في الماء على الرغم من أن كثافتها تزيد عشر مرات تقريباً على كثافة الماء. كما أن بعض الحشرات يمكن أن تسير فوق الماء دون أن تغمس قوائمها تحت السطح. وإذا غمر أنبوب زجاجي نظيف ذو قطر صغير في الماء فإن الماء يرتفع في هذا الأنبوب في حين أنه إذا غمر الأنبوب ذاته في الزئبق فإن سوية الزئبق داخل الأنبوب تكون أدنى من سوية الزئبق خارجه.

إذا صب قليل من الزئبق فوق سطح زجاجي. أفقي مصقول فإنه يلاحظ أن الزئبق يتكور وكأنه محاط بغشاء. كذلك إذا غمست ساق زجاجية في سائل ثم سحبت منه فإنه يعلق بها نقطة صغيرة من السائل. هذا يدل على أن سطح السائل يشبه إلى حد بعيد غشاء مرناً مشدوداً. أي أن سطح السائل يكون دائماً في حالة التوتر.

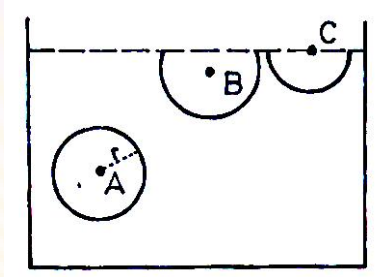
3-5-1- النظرية الجزيئية والتوتر السطحي

Molecular theory and surface tension

تتجاذب جزيئات السائل مع بعضها وتتلاشى قوة التجاذب بين جزيئين إذا زادت المسافة بينهما عن حد معين يسمى مدى التجاذب الجزيئي range of molecular attraction ويرمز له بالرمز (r) (يعادل 1.6×10^{-7} سم تقريباً). فإذا تصورنا جزيئاً مثل A في باطن سائل كما في الشكل (3-7)، وتصورنا كرة نصف قطرها r مركزها هذا الجزيء. فإن جميع الجزيئات داخل الكرة تتجاذب مع الجزيء A وتكون القوى في جميع الاتجاهات ولذا فهي تتعادل. أما الجزيئات خارج الكرة فلا تؤثر على هذا الجزيء. وإذا تصورنا جزيئاً مثل B قريباً من سطح السائل، فإن قوى التجاذب عليه من أسفل تكون

أكبر من قوى التجاذب في الاتجاهات الأخرى. وإذا تصورنا جزيئاً مثل C يقع على سطح السائل، فإن القوى المؤثرة عليه نحو باطن السائل تكون أكبر ما يمكن.

من ذلك نستنتج أن الجزيئات الواقعة على سطح السائل تكون متأثرة بقوى تشدها نحو باطن السائل في اتجاه عمودي على سطحه، وتسبب تلك القوى توتراً للسطح وتجعله كغشاء مرن.



الشكل (3-7)

3-5-2- تعريف التوتر السطحي:

يعرف التوتر السطحي لسائل (ويرمز له بالرمز T) بأنه القوة التي تؤثر في اتجاه عمودي على وحدة الأطوال من سطح السائل ووحداته دايين/سم سغثياً ونيوتن/م مكثياً.

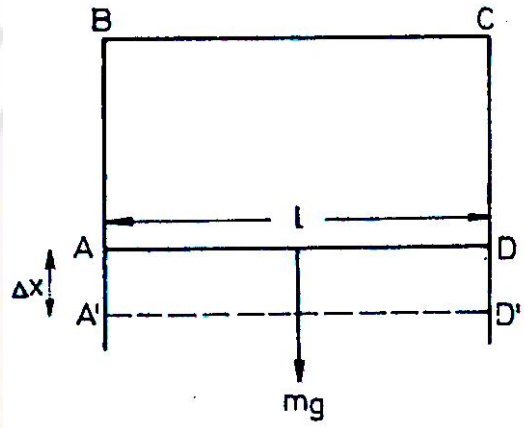
$$MT^{-2} = \frac{M.L.T^{-2}}{L} = \frac{\text{أبعاد القوة}}{\text{أبعاد الطول}} \quad \text{ومعادلة أبعاده هي:}$$

نفرض أن لدينا سلكاً مكوناً للإطار A' B C D' كما في الشكل (3-8)، وأن السلك AD ينزلق على الضلعين A'B, CD' فإذا غمس هذا الإطار في محلول صابون مثلاً، تكون غشاء داخل ABCD ويعمل التوتر السطحي على تقلصه وسحب السلك AD إلى الداخل. ولكي يظل السلك AD في مكانه، لابد

وأن تؤثر قوة قدرها mg (تساوي كتلة السلك مع كتلة إضافية معلقة)، فيحصل اتزان إذا كانت:

$$F = mg = 2 T L \quad (9 - 3)$$

وذلك لأن الغشاء له وجهين، حيث L طول السلك AD .



الشكل (3-8)

مثال (3-1):

تكون غشاء من الصابون على إطار على شكل مربع طوله 7 سم حينما غمر في محلول من الصابون. فإذا كان الإطار معلقاً في كفة ميزان. وكانت الكتلة التي يجب وضعها في الكفة الأخرى كي تعادل الشد الناتج عن التوتر السطحي هي 0.38 جم. أوجد التوتر السطحي لمحلول الصابون.

الحل:

القوة المؤثرة على الإطار الناتجة عن التوتر السطحي F هي:

$$F = 2 T . L$$

وبإهمال كتلة السلك، فإن:

$$F = mg = 2 T . L$$

$$\therefore 0.38 \times 980 = 2 \times T \times 7$$

$$T = \frac{0.38 \times 980}{2 \times 7}$$

$$= 26.6 \text{ dyne cm}^{-1}$$

3-5-3- طاقة السطح Surface Energy:

إذا أزيح السلك AB في الشكل (3-8) مسافة قدرها Δx مع ثبوت درجة الحرارة، فإن العمل المبذول ω لإزاحته يعطى بالمعادلة:

$$\omega = F \cdot \Delta x$$

بالتعويض عن F من المعادلة (3-8)، نحصل على:

$$\omega = 2 \cdot T \cdot L \cdot \Delta x$$

$$= T \cdot \Delta S \quad (10 - 3)$$

حيث ΔS هي الزيادة في مساحة سطح الغشاء من الوجهين وتساوي

$$T = \frac{\omega}{\Delta S} = 2 \cdot L \cdot \Delta x$$

وعلى ذلك فإن العمل المبذول لزيادة مساحة السطح وحدة المساحة وهو ما

يعرف بطاقة السطح $\frac{\omega}{\Delta S}$ ويرمز له بالرمز E ووحداتها إرج/سم² أو جول/م²

ويساوي التوتر السطحي ووحداته دايين/سم عند ثبوت درجة الحرارة. وعلى

الطالب أن يلاحظ الفرق في تعريف كل منهما رغم أنهما متساويان عند ثبوت

درجة الحرارة.

مثال (3-2):

كرة من الماء نصف قطرها 2 سم، انقسمت بسرعة إلى 27 كرة

متساوية عند ثبوت درجة الحرارة. أحسب العمل المبذول نتيجة لذلك علماً بأن

التوتر السطحي للماء 75 دايين/سم.

الحل:

نفرض أن نصف قطر كل كرة من الكرات الصغيرة هو r :

$$\therefore \frac{4}{3} \pi (2)^3 = 27 \times \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$\therefore r = \frac{2}{3} \text{ cm}$$

مساحة سطح الكرة الأصلية:

$$S_1 = 4 \pi (2)^2 = 16 \pi \text{ cm}^2$$

ومساحة سطح الكرات الـ 27 الصغيرة :

$$S_2 = 27 \times 4 \pi \times \left(\frac{2}{3}\right)^2 = 48 \pi \text{ cm}^2$$

إن الزيادة في المساحة هي ΔS وحيث أن طاقة السطح هي (طاقة

العمل المبذول لزيادة مساحة السطح بمقدار الوحدة ووحداتها إرج/سم²) -

(التوتر السطحي ووحداته داي/سم) عند ثبات درجة الحرارة.

∴ العمل المبذول نتيجة لانقسام الكرة = الزيادة في المساحة × التوتر السطحي

$$\therefore W = T \Delta S$$

$$= 75(48\pi - 16\pi) = 2400\pi \text{ ergs}$$

3-5-4- إيجاد التوتر السطحي لسائل عن طريق وزن القطرات:

إذا سمح لسائل أن يتساقط على هيئة قطرات من الفوهة الضيقة لسحاحة

رأسية فإن القطرة لا تلبث أن تنمو حتى تصبح نصف كروية يتفق قطرها مع

قطر الفوهة ثم تتخذ قبل انفصالها شكلاً كروياً متصلاً بعمود اسطواناني من

السائل كما في الشكل (9-3) (أ و ب و ج).



الشكل (9-3).

وبدراسة الوضع عندما تكون القطرة على وشك الانفصال (الشكل 9-3 جـ) نجد أنها في حالة اتزان تحت تأثير ثلاثة قوى هي:

1. وزن القطرة إلى أسفل وتساوي $m.g$. حيث m كتلة القطرة. $F_1 = m.g$
2. القوة إلى أسفل الناتجة عن انحناء سطح السائل في شكل أسطواني = الزيادة في الضغط $\times$ مساحة المقطع حيث r نصف قطر الفوهة الضيقة للسحاحة.

$$F_2 = \pi r^2 \times \frac{T}{r} = \pi . r . T$$
3. القوة إلى أعلى الناشئة من تلامس السائل مع زجاج فوهة السحاحة = التوتر السطحي $\times$ طول محيط الفوهة

$$F_3 = 2 \pi . r . T = 2 \pi . r . T$$

من توازن القوى :

$$F_1 + F_2 = F_3$$

$$\therefore m . g + \pi r T = 2 \pi . r . T$$

$$m . g = \pi . r . T$$

$$\therefore T = \frac{m . g}{\pi . r} \quad (11 - 3)$$

وتعدّ هذه المعادلة تقريبية لأن استنتاجها قد بني على أساس اتزان القطرة في وضع قبل الانفصال وذلك للسهولة. والبرهان الرياضي السليم يصل إلى نتيجة مخالفة قليلاً ولكنها أكثر دقة وتتمثل بالمعادلة:

$$T = \frac{m \cdot g}{3.8 r} \quad (12 - 3)$$

وبمعرفة كل من r نصف قطر الفوهة للسحاحة و m كتلة القطرة يمكن

إيجاد T التوتر السطحي للسائل. ويمكن إيجاد كتلة القطرة m بأن نستقبل عدداً كبيراً منها في كأس ثم يوزن، ونستنتج m .

مثال (3-3):

أوجد زيادة الضغط بالمليمترات من الزئبق داخل قطرة مياه الأمطار

عن خارجها، إذا علم أن قطر القطرة هو مليمتر وأن التوتر السطحي للماء 72 دايـن/سم.

الحل:

الزيادة في الضغط الداخلي عن الضغط الخارجي هو p حيث:

$$p = \frac{2T}{r}$$

$$\therefore p = \frac{2 \times 72}{0.05} = 2880 \text{ dyne/cm}^2$$

$$p = h \cdot \rho \cdot g \text{ إن } p = h \cdot \rho \cdot g$$

حيث h طول عمود الزئبق المكافئ بالسنتيمترات

ρ كثافة الزئبق.

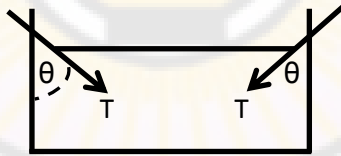
$$\therefore 2880 = h \times 13.6 \times 980$$

$$\therefore h = \frac{2880}{13.6 \times 980} = 0.2161 \text{ cm Hg}$$

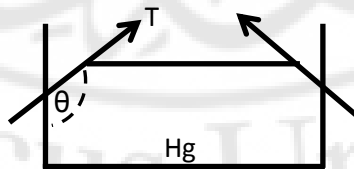
$$= 2.161 \text{ mm Hg}$$

3-5-5- زاوية التلامس Contact angle

تدل المشاهدات عند وضع السوائل في أواني صلبة على وجود قوى تجاذب بين جزيئات مادة الأواني وجزيئات السوائل علاوة على قوى التجاذب بين جزيئات السائل التي سبق الحديث عنها. فمثلاً عند وضع سائل نقي في وعاء زجاجي نظيف كما في الشكل (3-10) يشاهد ارتفاع سطح السائل الملامس لجدران الوعاء عن مستوى سطحه في الوعاء مما يدل على أن قوى التجاذب بين جزيئات الزجاج وجزيئات السائل تفوق تلك التي بين جزيئات السائل نفسه. أما في حالة الزئبق الملامس للزجاج كما هو مبين في الشكل (3-11) يشاهد انخفاض سطح الزئبق الملامس للزجاج عن مستواه في الوعاء للدلالة على أن قوى التجاذب بين جزيئات الزئبق نفسه تفوق تلك التي بين جزيئات الزئبق وجزيئات الزجاج.



الشكل (3-10)

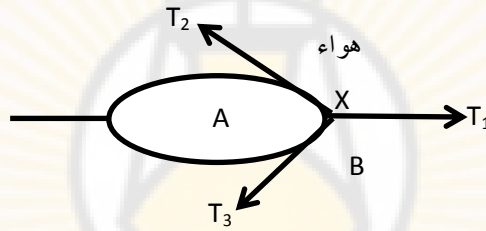


الشكل (3-11)

والزاوية θ المحصورة بين المماس لسطح السائل عند نقطة التلامس وجدار الوعاء تعرف بزاوية التلامس وهي تساوي الصفر تقريباً في حالة الزجاج والماء النقي بينما تساوي 140° في حالة الزجاج والزئبق.

3-5-6- انتشار السوائل عند التلامس:

1- إذا وضعنا قطرة من سائل A على سطح سائل آخر B، فإنه يحتمل انتشارها فوق سطح السائل B كما هو الحال في حالة الزيت والماء أو أن تتماسك القطرة وتظهر على شكل عدسة من السائل A تركز على سطح السائل B كما في الشكل (3-12).



الشكل (3-12)

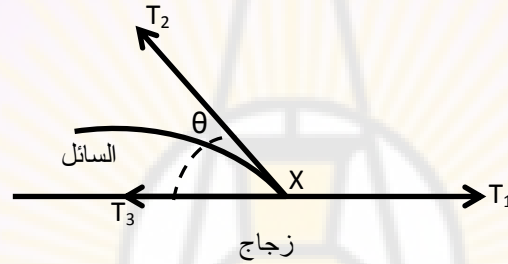
لنفرض أن القوى T_1 , T_2 , T_3 التي تؤثر على النقطة X والممثلة بالأسهم الثلاثة في الشكل هي قوى التوتر السطحي بين السائل B والهواء والسائل A والهواء وبين السائلين على الترتيب. فإذا أمكن تمثيل هذه القوى الثلاث بمثلث قوى كانت النقطة X في حالة اتزان تحت تأثير هذه القوى، على أن التجارب قد أثبتت عدم إمكانية رسم مثلث قوى لسائلين نقيين لأن السوائل الأقل كثافة تنتشر على السوائل الأكثر كثافة كانتشار السوائل العضوية فوق الماء.

2- إذا وضعنا قطرة من سائل على سطح صلب كالزجاج كما في الشكل (3-13)، وكانت T_1 , T_2 , T_3 تمثل قوى التوتر السطحي بين الزجاج والهواء وبين السائل والهواء وبين السائل والزجاج على الترتيب، فإن نقطة تأثيرها تكون في حالة اتزان إذا كانت:

$$T_1 = T_3 + T_2 \cos \theta \quad (3 - 13)$$

حيث θ هي زاوية التلامس بين السائل والزجاج وعلى ذلك فإن:

$$\cos \theta = \frac{T_1 - T_3}{T_2}$$



الشكل (3-13)

فإذا كانت $T_1 > T_3$ تصبح $\cos \theta$ موجبة وتكون θ أقل من 90° . وإذا كانت $T_1 < T_3$ تصبح $\cos \theta$ سالبة وتكون θ محصورة بين 90° و 180° . فبالنسبة للزئبق والزجاج تكون θ حوالي 140° ، أما بالنسبة للماء وبعض السوائل الأخرى والزجاج تكون θ مساوية للصفر، ويقال في هذه الحالة أن السائل يبلل الزجاج (Wets the glass).

3-5-7- ارتفاع السوائل في الأنابيب الشعرية

Rise of liquids in capillary tubes

إذا غمرت أنبوبة شعرية نظيفة نصف قطرها r في سائل كثافته ρ ، فإن السائل يرتفع في الأنبوبة (ماعدا الزئبق فإنه ينخفض) فإذا كانت h هي ارتفاع

السائل في الأنبوبة من أسفل نقطة تقع في سطحه إلى السطح الأفقي الخارجي،
و θ هي زاوية التلامس بين السائل وال الزجاج كما في الشكل (14-3)، فإن:
1- إن القوة المؤثرة على سطح السائل إلى أسفل هي F_1 ثقل عمود السائل =
كتلة أسطوانة من السائل ارتفاعها h ونصف قطرها r

$$\begin{aligned} F_1 &= m \cdot g \\ &= V \cdot \rho \cdot g \\ &= A \cdot h \cdot \rho \cdot g \end{aligned}$$

$$\therefore F_1 = \pi r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot g$$

2- القوة المؤثرة على سطح السائل إلى أعلى هي F_2 قوة التوتر السطحي
المؤثرة على محيط السائل في الأنبوبة

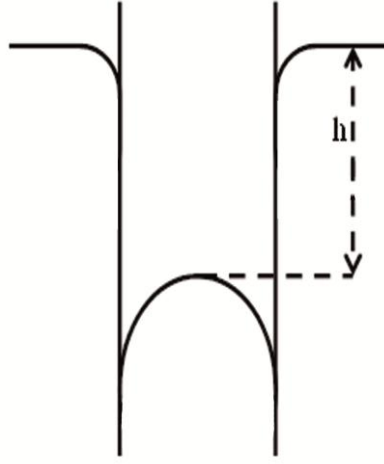
$$F_2 = 2 \pi \cdot r \cdot T \cdot \cos \theta$$

ويكون السطح في حالة اتزان، إذا كانت:

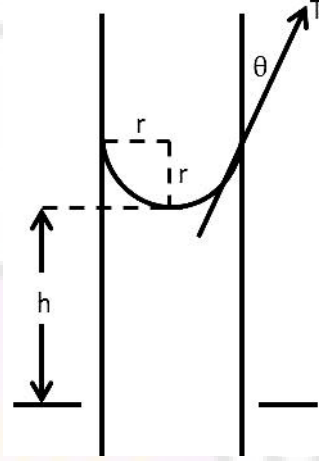
$$\pi r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot g = 2 \pi r \cdot T \cdot \cos \theta$$

$$T = \frac{r \cdot h \cdot \rho \cdot g}{2 \cos \theta} \quad (14 - 3)$$

إذا كانت θ أكبر من 90° كما في حالة الزئبق وال زجاج تصبح $\cos \theta$ سالبة،
وهذا يحتم أن تكون h سالبة، وهذا يعني انخفاض عمود الزئبق داخل الأنبوبة
الشعرية عن مستواه داخلها كما في الشكل (15-3).



الشكل (3-15)



الشكل (3-14)

مثال (3-4):

أنبوبة شعيرية من الزجاج قطرها 1 سم، غمرت رأسياً في كأس به سائل كثافته 1.01 جم/سم³، فارتفع السائل في الأنبوبة 30 سم. أحسب التوتر السطحي للسائل إذا علم أنه يبيل الزجاج.

الحل:

$$T = \frac{r.h.\rho.g}{2\cos\theta}$$

حيث أن السائل يبيل الزجاج، فإن $\theta = 0$ صفر.

$$\therefore T = \frac{0.05 \times 3.0 \times 1.01 \times 980}{2 \times 1} = 74.35 \text{ dyne/cm}$$

مثال (3-5):

أنبوبة رأسية على شكل حرف U، إذا كان قطر فرعي الأنبوبة هما 5 مم، 1 مم. أ) إذا كانت الأنبوبة تحتوي ماء، أوجد الفرق بين ارتفاعي الماء في فرعي الأنبوبة علماً بأن التوتر السطحي للماء 73 دايين/سم.

ب) إذا كانت الأنبوبة تحتوي على زئبق. أوجد الفرق بين الارتفاعين في فرعي الأنبوبة علماً بأن التوتر السطحي للزئبق هو 550 دايـن/سم، وأن كثافته 13.6 جم/سم³ وزاوية تلامسه هي 140°.

الحل:

نفرض أن ارتفاع السائل في أحد الفرعين هو h_1 وأن نصف قطر هذا الفرع $r_1=0.05$ وأن ارتفاع السائل في الفرع الآخر هو h_2 وأن نصف قطر هذا الفرع $r_2=0.25$ وحيث إن:

$$T = \frac{r \cdot h \cdot \rho \cdot g}{2 \cos \theta}$$

$$\therefore h = \frac{2 \cdot T \cos \theta}{r \cdot \rho \cdot g}$$

وعلى ذلك، فإن:

$$h_1 = \frac{2 \cdot T \cos \theta}{r_1 \cdot \rho \cdot g}$$

$$h_2 = \frac{2 \cdot T \cos \theta}{r_2 \cdot \rho \cdot g}$$

$$\therefore h_1 - h_2 = \frac{2 \cdot T \cos \theta}{\rho \cdot g} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

أ- في حالة الماء، $\theta = 0^\circ$ صفر

$$\therefore h_1 - h_2 = \frac{2 \times 573 \times 1}{1 \times 980} \left(\frac{1}{0.05} - \frac{1}{0.25} \right) = 2.38 \text{ cm}$$

ب- في حالة الزئبق، $\theta = 140^\circ$

$$\therefore h_1 - h_2 = \frac{2 \times 550 \times (-0.7660)}{13.6 \times 980} \left(\frac{1}{0.05} - \frac{1}{0.25} \right) = -1.012$$

الإشارة سالبة تدل على أن h_1 منخفضة عن h_2 .



مسائل وتمارين

1- يقع خزان للماء في نظام تدفئة مركزية على ارتفاع مقداره 12 متراً فوق

سوية المرجل. فإذا كان الخزان مفتوحاً للجو فما هو الضغط القياسي في

المرجل. وما هو الضغط المطلق؟

الأجوبة: 1.16 atm , 0.0014 atm

2- احسب الضغط الوعائي في يوم بلغ فيه ارتفاع عمود الزئبق في مقياس

الضغط مقدار 76.0 cm.

الجواب: 1.013×10^5 pa

3- تعلق قطعة من النحاس الأصفر كتلتها 0.5kg وكثافتها $8.0 \times$

10^3 kg.m^{-3} بخيط. ما هي قوة شد الخيط في الهواء؟ ما هي قوة شد

الخيط عندما تغمر الكتلة بأكملها في الماء؟.

الأجوبة: 0.612 N , 4.29 N

4- لنفرض أننا وضعنا وعاء الماء الوارد في المثال (3) على الميزان فكيف

تكون قراءة الميزان عندما نغمر قطعة النحاس في الماء؟

5- أحسب الضغط الفائض داخل قطرة زئبق قطرها 4 mm في الدرجة 20

مئوية.

الجواب 0.005 atm

6- غمست أنبوبة شعرية مفتوحة الطرفين في وضع رأسي في إناء به ماء

فارتفع بداخلها بمقدار 3.5 سم عن مستوى الماء خارجها. أوجد نصف قطر

الأنبوبة الشعرية إذا علم أن التوتر السطحي للماء 73 دايين/سم.

- 7- أحسب الضغط الكلي داخل فقاعة كروية نصف قطرها 1 مم وعلى بعد 10 سم تحت سطح سائل كثافته 0.8 جم/سم³ وتوتره السطحي 50 داین/سم، علماً بأن الضغط الجوي 76 سم زئبقي وكثافة الزئبق هي 13.6 جم/سم³.
- 8- إذا ارتفع الماء في أنبوبة شعرية بمقدار 5.8 سم عن مستوى سطح الماء خارجها. ما مقدار الانخفاض في سطح الزئبق داخل الأنبوبة عنه خارجها إذا وضعت في إناء به زئبق علماً بأن التوتر السطحي للماء 75 داین/سم والتوتر السطحي للزئبق 547 داین/سم وزاوية تلامس الزئبق والزجاج 130° وكثافة الزئبق 13.6 جم/سم³.
- 9- أنبوتان زجاجيتان، نصف القطر الداخلي لكل منهما 0.2 مم، اتصلا من أعلى بغرفة هواء ضغطه أقل من الضغط الجوي. غمر الطرف الثاني لإحدى الأنبوبتين في ماء فارتفع الماء فيها بمقدار 20 سم بينما غمر الطرف الثاني للأنبوبة الأخرى في زيت. أوجد الارتفاع في عمود الزيت داخلها، علماً بأن كثافة الزيت 0.9 جم/سم³ والتوتر السطحي للزيت والماء هما 25 و 75 داین/سم على الترتيب.

الفصل الرابع

ميكانيك السوائل Fluid Mechanics

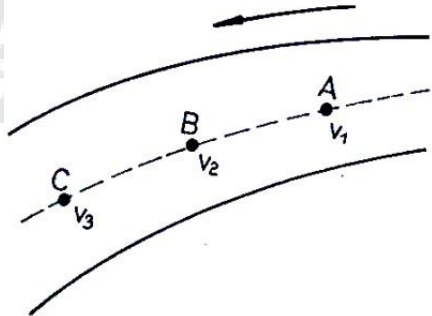
يعالج علم ميكانيك السوائل حالة السوائل وهي في وضع الحركة، إن علم تحريك السوائل من أعقد فروع علم الميكانيك ولحسن الحظ فإنه يمكن تمثيل العديد من الحالات الهامة للسوائل تمثيلاً بسيطاً يمكننا من دراستها وتحليل حركتها.

سوف نناقش في هذا الفصل الخصائص الميكانيكية للسوائل من حيث التدفق بأنواعه المختلفة والعوامل المؤثرة على حركته.

4-1- التدفق الثابت أو التدفق المنتظم

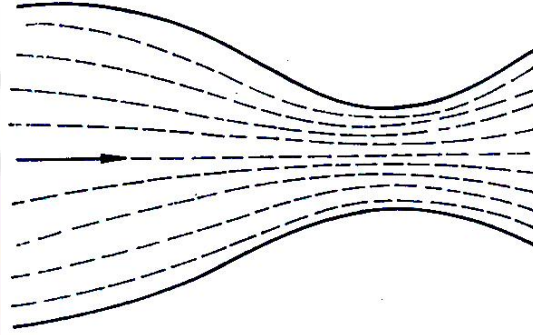
Steady or stationary flow

يتوقف مرور السوائل خلال الأنابيب على سرعتها، فإذا ظلت سرعة السائل ثابتة عند أي نقطة من مساره طوال مدة تدفقه، فإن تدفق السائل في هذه الحالة يسمى تدفقاً ثابتاً أو منتظماً. في هذه الحالة يتخذ كل جزء من السائل مساراً خاصاً يعرف بمسار المجرى stream line، فبالنسبة للمسار ABC الشكل (4-1) قد تختلف السرعات v_1, v_2, v_3 عند A, B, C بعضها عن بعض ولكنها تبقى ثابتة.



الشكل (4-1)

ويمثل الشكل (4-2) عدداً من مسارات المجرى بالنسبة لأنبوبة تضيق عند وسطها، ويشاهد تزامنها عند الاختناق، ولا يمكن لجزء من السائل أن ينتقل من مسار مجراه إلى مسار مجرى آخر.



الشكل (4-2)

2-4- التدفق المضطرب أو الدوامي والسرعة الحرجة

Turbulent flow:

يُسمى تدفق السائل تدفقاً مضطرباً إذا كانت حركته متعاقبة ودائمة التغير بين لحظة وأخرى مثل سريان الماء في الأنهار خلف بوابات القنوات. السرعة الحرجة v_c هي السرعة التي يتغير عندها تدفق السائل من تدفق ثابت إلى تدفق مضطرب.

تتوقف السرعة الحرجة v_c على معامل لزوجة السائل η ، وكثافته ρ ونصف قطر الأنبوب r التي يتدفق فيها السائل. وعلى ذلك يمكن كتابة المعادلة كما يلي:

$$v_c = k \cdot \eta^\alpha \cdot \rho^\beta r^\gamma$$

وبكتابة معادلة الأبعاد، نجد أن:

$$L \cdot T^{-1} = (ML^{-1}T^{-1})^\alpha (ML^{-3})^\beta \cdot L^\gamma$$

$$L.T^{-1} = M^{\alpha}.L^{-\alpha}.T^{-\alpha}.M^{\beta}.L^{-3\beta}.L^{\gamma}$$

$$= M^{\alpha+\beta}.T^{-\alpha}.T^{-\alpha-3\beta}$$

انظر الجدول (1-1) في الفصل الأول.

وبمساواة الأسس المتقابلة في الطرفين، ينتج أن:

$$\alpha + \beta = 0 \quad (1)$$

$$-\alpha - 2\beta - \gamma = 0 \quad (2)$$

$$-\alpha = -1 \quad (3)$$

وبحل المعادلات الثلاث، نجد أن:

$$\alpha = 1, \quad \beta = -1, \quad \gamma = -2$$

وعلى ذلك، فإن:

$$v_c = k \frac{\eta}{\rho.r} \quad (1-4)$$

ويسمى الثابت k بعدد رينولد (Reynold's number) وهو يساوي 1000 تقريباً.

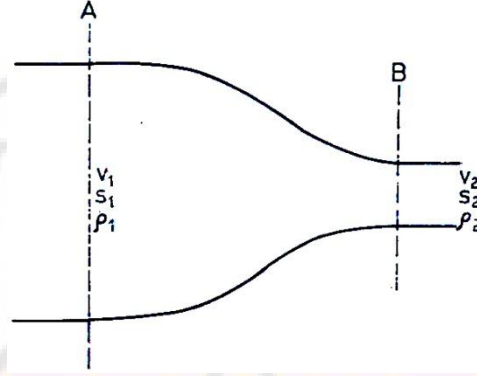
3-4- معادلة الاستمرار Equation of continuity:

لنفرض أن سائلاً يتدفق بشكل منتظم في أنبوبة AB كما هو مبين في

الشكل (4-3) طالما أنه لا يوجد بالأنبوبة تقوُب تسمح بتسرب السائل منها أو

إليها، فإن شرط انتظام التدفق يحتم أن تكون كتلة السائل التي تمر في كل مقطع

من مقاطع الأنبوبة في زمن معين متساوي.



الشكل (4-3)

فإذا كانت سرعة السائل عند A هي v_1 ومساحة المقطع هي S_1 وكثافة السائل عندها هي ρ_1 . وإذا كانت هذه القيم عند B هي v_2 , S_2 , ρ_2 على الترتيب.

إن حجم السائل المار في زمن معين t خلال أي مقطع $S \cdot v \cdot t$

وحجم السائل المار في الثانية الواحدة خلال أي مقطع $S \cdot v$

وكتلة السائل المار في الثانية الواحدة خلال أي مقطع $S \cdot v \cdot \rho$

وحيث إن كتلة السائل المار في الثانية الواحدة خلال المقطع A تساوي كتلة السائل المار في الثانية الواحدة خلال المقطع B

$$S_1 v_1 \rho_1 = S_2 v_2 \rho_2$$

وبما أن السائل لا يقبل الانضغاط، فإن كثافته لن تتغير بالضغط، وعلى ذلك فإن $\rho_1 = \rho_2$ أي أن:

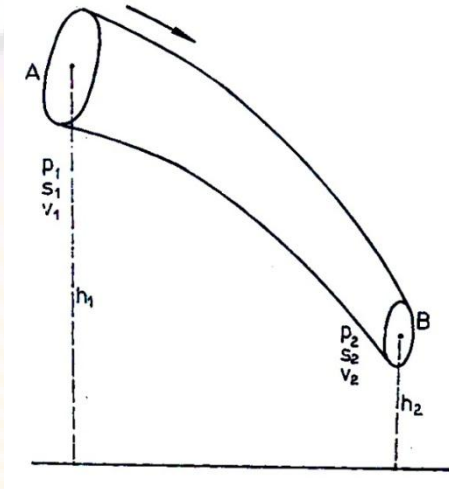
$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad (2 - 4)$$

وتعرف هذه المعادلة بمعادلة الاستمرار.

ومن ذلك نرى أن سرعة تدفق السائل تتناسب عكسياً مع مساحة مقطع الأنبوبة فهي تزداد كلما قلت مساحة المقطع وتقل كلما زادت مساحة المقطع.

4-4- معادلة برنولي Bernolli's theorem:

نفرض أن سائلاً يتدفق تدفقاً منتظماً في أنبوبة كالمبينة في الشكل (4-4)، وأن هذا السائل غير قابل للانضغاط أي أن كثافته لن تتغير أثناء التدفق.



الشكل (4-4)

نفرض أن الضغط عند A هو p_1 ومساحة المقطع S_1 وسرعة تدفق السائل v_1 وأن هذه القيم عند B هي p_2, S_2, v_2 على الترتيب. ولنفرض أيضاً أن ارتفاع المقطع A عن أي مستوى أفقي هو h_1 وارتفاع المقطع B عن نفس المستوى هو h_2 .

بفرض أن السائل في حالة اتزان حراري، فإننا نستطيع أن نطبق قانون بقاء الطاقة Law of conservation of energy لكمية السائل المارة بالمقطعين A , B في الثانية الواحدة، فنستخدم العلاقة التالية:

$$\Delta W = \Delta PE + \Delta KE \quad (I)$$

أي أن التغير في العمل المبذول في الثانية الواحدة عند المقطعين A , B = التغير في طاقة الوضع عن المقطعين B , A + التغير في طاقة الحركية عن المقطعين A,B وحيث إن:

-1

إن (W_A) تمثل العمل المبذول في الثانية الواحدة عند المقطع A = القوة $\times$ المسافة التي يتحركها السائل عند A في الثانية الواحدة:

$$W_A = F \cdot L$$

$$= P_1 \cdot S_1 \cdot v_1$$

$$= P_1 \cdot S_1 \cdot v_1$$

وبالمثل فإن (W_B) تمثل العمل المبذول في الثانية الواحدة عند المقطع B =

$$W_B = P_2 S_2 v_2$$

∴ التغير في العمل المبذول في الثانية الواحدة عند المقطعين A , B هو ΔW :

$$\Delta W = W_A - W_B$$

$$\therefore \Delta W = P_1 S_1 V_1 - P_2 S_2 V_2 \quad (1)$$

-2

إن (PE_A) تمثل طاقة الوضع عند المقطع A = كتلة السائل المار في الثانية $\times g \times h_1$

$$PE_A = S_1 v_1 \rho \cdot g h_1$$

وبالمثل فإن (PE_B) تمثل طاقة الوضع عند المقطع B = كتلة السائل المار في الثانية $\times$

$$h_2 \times g$$

$$PE_B = S_2 v_2 \rho \cdot g h_2$$

∴ التغير في طاقة الوضع في الثانية الواحدة عند المقطعين A , B هو ΔPE :

$$\Delta PE = \Delta PE_B - \Delta PE_A$$

$$\therefore \Delta PE = S_2 V_2 \rho \cdot g h_2 - S_1 V_1 \rho \cdot g h_1 \quad (2)$$

-3

إن (KE_A) تمثل الطاقة الحركية عند المقطع $A = \frac{1}{2} \times$ كتلة السائل المار في الثانية الواحدة $\times v_1^2$

$$KE_A = \frac{1}{2} S_1 v_1 \rho \cdot v_1^2$$

وبالمثل فإن (KE_B) تمثل الطاقة الحركية عند المقطع B:

$$KE_B = \frac{1}{2} S_2 v_2 \rho \cdot v_2^2$$

∴ التغير في طاقة الحركية عند المقطعين A, B هو ΔKE :

$$\Delta KE = KE_B - KE_A$$

$$\therefore \Delta KE = \frac{1}{2} S_2 v_2 \rho \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} S_1 v_1 \rho \cdot v_1^2 \quad (3)$$

نعوض (1)، (2)، (3) في (I)، نجد أن:

$$\Delta W = \Delta PE + \Delta KE$$

$$\therefore P_1 S_1 V_1 - P_2 S_2 V_2 = (S_2 V_2 \rho g h_2 - S_1 V_1 \rho g h_1) + \left(\frac{1}{2} S_2 V_2 \rho v_2^2 - \frac{1}{2} S_1 V_1 \rho v_1^2 \right)$$

وحيث إن $S_1 v_1 = S_2 v_2$ من معادلة الاستمرار فإن:

$$P_1 - P_2 = \rho g h_2 - \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad (3-4)$$

وبالقسمة على ρ وترتيب الحدود، نجد أن:

$$\frac{P_1}{\rho} + g h_1 + \frac{1}{2} v_1^2 = \frac{P_2}{\rho} + g h_2 + \frac{1}{2} v_2^2 \quad (4-4)$$

وتعرف المعادلة (4-4) بمعادلة برنولي، ويكون الشكل العام:

$$\frac{P}{\rho} + g h + \frac{1}{2} v^2 = \text{constant} \quad (5-4)$$

وحيث إن طاقة الضغط $= P \cdot v$:

$$P \cdot V = P \cdot \frac{m}{\rho} = \frac{P}{\rho} \cdot m \Rightarrow$$

إن $\frac{P}{\rho}$ هي طاقة الضغط لوحدة الأوزان.

وإن $\frac{1}{2}v^2$ هي طاقة الحركة لوحدة الأوزان
وكذلك gh هي طاقة الوضع لوحدة الأوزان
أي أن معادلة برنولي تنص على أنه بالنسبة لوحدة الأوزان:
طاقة الضغط + طاقة الحركة + طاقة الوضع = ثابت

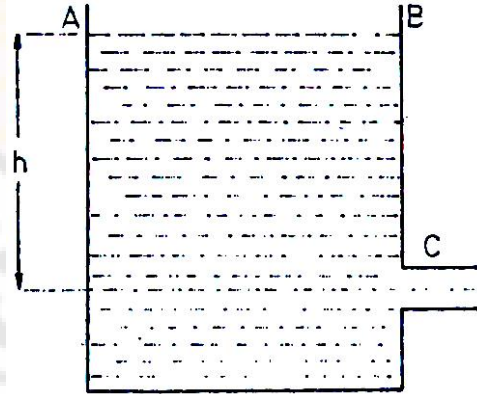
وفي حالة خاصة إذا كانت الأنبوبة التي يتدفق فيها السائل أفقية، تصبح $h_1 = h_2$
وتأخذ معادلة برنولي الصورة

$$\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 = \text{constant} \quad (6-4)$$

4-5- تطبيقات على معادلة برنولي:

1- تدفق سائل من مستودع به فتحة جانبية من أسفل:

نفرض أن لدينا مستودعاً مملوءاً بالسائل وله فتحة جانبية عن C كما
هو مبين في الشكل (4-5).



الشكل (4-5)

نفرض أن سرعة السائل عند C هي v . ولما كان المستودع واسعاً فإن
سرعة سريان السائل عند السطح AB تكون معدومة تقريباً لأن مساحة السطح
كبيرة.

كما أن الضغط عند AB = الضغط عند الفتحة C وتساوي الضغط الجوي P_a .
وبأخذ المستوي الأفقي ماراً بمحور الفتحة C عندها يكون ارتفاع
السطح AB عن المستوي الأفقي h .

وبالتعويض في معادلة برنولي على السطح AB وعند الفتحة C، نجد أن:

$$\frac{P_a}{\rho} + 0 + gh = \frac{P_a}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 + 0$$

$$\therefore \frac{1}{2}v^2 = gh$$

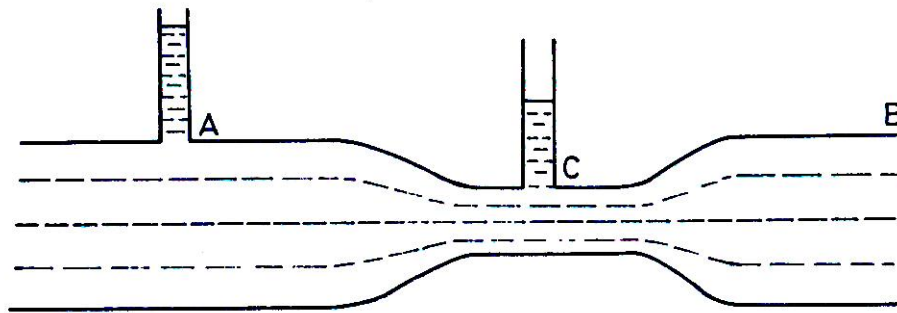
$$\therefore v = \sqrt{2gh} \quad (7-4)$$

ولكن لا يتأتى لأي سائل أن يكتسب هذه السرعة لأننا أهملنا لزوجة
السائل كما أن خطوط مجرى التدفق تضيق عند الفتحة ولا تكون متوازية مما
يجعل السرعة أكبر من هذه القيمة.

2- الأنبوبة ذات الاختناق Constricted tube:

إذا تدفق سائل في أنبوبة أفقية AB ذات اختناق C كالمبينة في الشكل

(4-6)، فإن سرعة انسياب السائل عند C تكون أكبر من سرعة السائل عند A
أو B.



الشكل (4-6)

نفرض أن P_1 , v_1 , h_1 تمثل ضغط السائل وسرعته وارتفاعه عن مستوى أفقي عند A على الترتيب وأن P_2 , v_2 , h_2 تمثل القيم المناظرة عند C على الترتيب.

وبتطبيق معادلة برنولي عند A , C نجد أن:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2}v_1^2 + gh_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2}v_2^2 + gh_2$$

وحيث إن الأنبوبة أفقية فإن: $h_1 = h_2$

وعلى ذلك، فإن معادلة برنولي تصبح:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2}v_1^2 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2}v_2^2$$

ولما كان الاختناق عند C، فإن v_2 تكون أكبر من v_1 ، وعلى ذلك فإن:

$$\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) = \frac{P_1 - P_2}{\rho} \quad (8 - 4)$$

وحيث إن الطرف الأيسر موجباً، فإن P_1 يجب أن تكون أكبر من P_2 كي يكون الطرف الأيمن موجباً، أي أن ضغط السائل عند المقطع الواسع يكون أكبر من ضغطه عن الاختناق حيث تكون السرعة أكبر، أي أنه عند الاختناق تكون السرعة أكبر والضغط أقل.

مثال (4-1):

يمر الماء في أنبوبة رأسية طولها 50 متراً من أسفل إلى أعلى بسرعة منتظمة مقدارها 30 سم/ثانية، فإذا كان طرف الأنبوبة العلوي معرضاً للجو، أوجد الطاقة الكلية لكتلة مقدارها 500 غ من الماء عند نقطة تقع عند طرف الأنبوبة العلوي.

الحل:

نفرض أن الطاقة الكلية للغرام الواحد عند أعلى الأنبوبة هي E_1

$$E_1 = \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 + gh$$

$$E_1 = \frac{76 \times 13.6 \times 980}{1} + \frac{1}{2}(30)^2 + 980 \times 50 \times 100$$
$$= 5913378 \text{ ergs}$$

وعلى ذلك، فالطاقة الكلية لكتلة مقدارها 500 غ = $500 E_1$

$$= 500 \times 5913378 \text{ ergs}$$

$$= 295.6689 \text{ joules}$$

مثال (2-4):

خزان به ثقب جانبي مركزه على عمق 360 سم من سطح الماء، أوجد

سرعة اندفاع الماء من الثقب بفرض عدم استنفاذية طاقة أثناء الانسكاب.

الحل

$$v = \sqrt{2gh}$$
$$= \sqrt{2 \times 980 \times 360}$$
$$= 480 \text{ cm/sec}$$

مثال (3-4):

أوجد حجم الماء المار في الثانية خلال أنبوبة أفقية نصف قطرها 0.5

سم وبها اختناق نصف قطره 0.3 سم إذا كان الفرق في الضغط بين أي نقطة

على الأنبوبة والاختناق هو 1 سم ماء.

الحل:

حجم الماء المار في الثانية Q حيث:

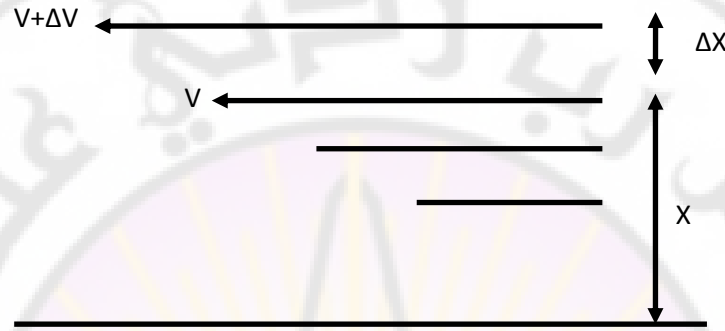
$$Q = S_1 S_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(S_1^2 - S_2^2)}}$$
$$= \pi(0.5)^2 \cdot \pi(0.3)^2 \sqrt{\frac{2(1 \times 1 \times 980)}{1[\pi(0.5)^2 - \pi(0.3)^2]}}$$
$$= 13.4 \text{ c.c/sec}$$

4-6- اللزوجة Viscosity

تختلف حركة الموائع تحت تأثير القوى المؤثرة عليها، فمنها ما يسهل حركته تحت تأثير القوى الصغيرة نسبياً، ومنها ما هو بطيء الحركة وتعرف بالموائع اللزجة. وتزداد مقاومة المائع للحركة كلما زادت لزجته. فاللزوجة هي المقاومة التي تبديها الموائع عند حركتها أو عندما تسمح للأجسام الأخرى بالحركة خلالها.

إذا فرضنا أن سائلاً يتدفق تدفقاً هادئاً على سطح أفقي ساكن كما هو مبين في الشكل (4-7)، فإن طبقة السائل الملاصقة للسطح تكون ساكنة نظراً لقوى الجذب الكبيرة التي تقع بين جزيئات مادة السطح الساكن وجزيئات السائل المكونة لتلك الطبقة في حين تتحرك طبقات السائل التي تعلو هذه الطبقة بسرعات منتظمة تتزايد بانتظام من الصفر عند الطبقة الملاصقة للسطح الساكن إلى أقصى سرعة لها عند الطبقة السطحية. ولو تصورنا أي طبقة من السائل لوجدنا أن الطبقة التي أسفلها أقل منها سرعة ولذا فهي تعوق حركتها، والطبقة التي تعلوها أكثر منها سرعة ولذا فهي تدفعها إلى الحركة. وعلى ذلك فإن كل

طبقة من طبقات السائل تكون تحت تأثير قوتين مماسيتين متضادتين من الطبقتين التي تتحصر بينهما.



الشكل (4-7)

إذا كانت v هي سرعة طبقة من السائل تبعد مسافة x عن السطح الساكن، وأن $v+\Delta v$ هي سرعة طبقة أخرى تبعد مسافة $x+\Delta x$ عن السطح الساكن، فإن $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ تسمى انحدار السرعة Velocity gradient. فإذا كانت A هي المساحة السطحية لأي طبقة، فإن قوة الاحتكاك المماسية F كما أوجدها نيوتن هي:

$$F = \eta A \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad (9-4)$$

ويسمى الثابت η معامل اللزوجة أو اللزوجة المطلقة أو اللزوجة الديناميكية وهو يختلف من سائل لآخر. ويعرف بأنه القوة المماسية المؤثرة على وحدة المساحات من كل من طبقتين الفرق بين سرعتيهما هو الوحدة والمسافة العمودية بينهما هي الوحدة أيضاً. من معادلة (9-4) نجد أن:

$$\eta = F/A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x}$$

وبأخذ معادلة الأبعاد للطرف الأيمن نجد أن:

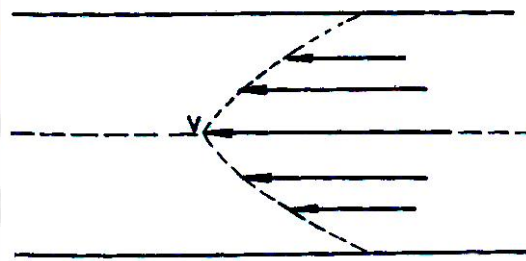
$$\left[F/A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x} \right] = \frac{MLT^{-2}}{L^2} \cdot \frac{L}{LT^{-1}} = ML^{-1}T^{-1}$$

وعلى ذلك فإن أبعاد معامل اللزوجة η هي $ML^{-1}T^{-1}$:

وحداتها سغثياً غ سم⁻¹ ثانية⁻¹، وتسمى هذه الوحدة بواز Poise ومكثياً كغ م⁻¹ ثا⁻¹.

1-6-4- انسياب السائل في الأنابيب الضيقة - معادلة بواسيل (Poiseuille)

إذا سمحنا لسائل بالمرور في أنبوبة، يشترط أن يكون هناك فرق في الضغط بين طرفيها يدفع السائل خلالها. وقد افترض بواسيل حركة انسيابية منتظمة للسائل بحيث تكون طبقة السائل الاسطوانية الملامسة لجدران الأنبوبة في حالة سكون في حين تتحرك الطبقات الاسطوانية الداخلية بحيث تزداد سرعتها تدريجياً حتى تبلغ أقصى سرعة لها ولتكن عند محور الأنبوبة كما تمثلها الأسهم في الشكل (4-8).



الشكل (4-8)

وللتأكد على انتظام حركة السائل داخل الأنبوبة، نضع مادة ملونة عند الطرف ذي الضغط الأعلى، فنشاهد انتشار اللون في خط مستقيم داخل الأنبوبة. وإذا ازدادت سرعة السائل عن السرعة الحرجة نشاهد انتشار اللون في خط موجي تزداد سعة موجاته بازدياد سرعة السائل إلى أن تصل إلى السرعة التي

ينتشر اللون في جميع أجزاء السائل داخل الأنبوبة عندها توصف حركته بالحركة المضطربة.

وبمراعاة شروط بواسيل، وعلى فرض أن P هو فرق الضغط بين طرفي أنبوبة ضيقة طولها L ونصف قطرها r ، وجدنا أن أقصى سرعة v لسريان السائل في الأنبوبة تتوقف على معامل اللزوجة η وعلى نصف قطر الأنبوبة r وعلى فرق الضغط على السنتيمتر الطولي $\frac{P}{L}$.
على ذلك يمكن أن نعبر عن السرعة v بالمعادلة التالية:

$$v = k \cdot \eta^\alpha r^\beta \left(\frac{p}{l}\right)^\gamma \quad (I)$$

حيث k مقدار ثابت

وبكتابة معادلة الأبعاد، نجد أن

$$LT^{-1} = (ML^{-1}T^{-1})^\alpha L^\beta \left(\frac{ML^{-1}T^{-2}}{L}\right)^\gamma$$

أي أن:

$$LT^{-1} = M^{\alpha+\gamma} L^{-\alpha+\beta-2\gamma} T^{-\alpha-2\gamma}$$

وبمساواة الأسس في طرفي المعادلة نجد أن:

$$0 = \alpha + \gamma \quad (1)$$

$$1 = -\alpha + \beta - 2\gamma \quad (2)$$

$$-1 = -\alpha - 2\gamma \quad (3)$$

وبحل المعادلات الثلاث، نحصل على:

$$\alpha = -1, \quad \beta = -2, \quad \gamma = 1$$

وبالتعويض بالمعادلة (I) نجد أن:

$$v = k \frac{r^2 P}{\eta l}$$

$$= \frac{1}{4} \frac{r^2 P}{\eta l} \quad (10 - 4)$$

حيث إنه قد وجد عملياً أن:

$$k = \frac{1}{4}$$

وهذه المعادلة تعطي سرعة السائل v عند محور الأنبوبة. ولما كانت سرعة طبقات السائل تتراوح بين الصفر، v ، حينئذ تكون السرعة المتوسطة $\bar{v}$ هي

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

$$\bar{v} = \frac{1}{8} \frac{r^2 P}{\eta l} \quad (11 - 4)$$

وحيث إن التدفق Q (حجم السائل المار في الثانية) = السرعة المتوسطة $\times$ مساحة المقطع
 $\therefore$ حجم السائل المار في الثانية Q هو:

$$Q = \pi r^2 \cdot v$$

$$\therefore Q = \frac{\pi r^4 P}{8 \eta l} \quad (12 - 4)$$

وتعرف هذه المعادلة بمعادلة بواسيل.

مثال (4-4):

أنبوبة شعرية أسطوانية نصف قطرها مليمتراً واحداً يمر بها ماء تحت تأثير انحدار من الضغط يساوي 10 دايين/سم³.

أوجد النهاية العظمى لسرعة الماء إذا علم أن معامل اللزوجة للماء هو 0.01 غ/سم ثا.

أوجد أيضاً حجم الماء المار في زمن قدره 15 دقيقة

الحل:

معادلة (10-4) تعطي النهاية العظمى للسرعة:

$$\therefore v = \frac{1}{4} \frac{r^2}{\eta} \cdot \frac{P}{l}$$

$$\therefore v = \frac{1}{4} \frac{(0.01)^2}{0.01} \times 10$$

$$= 0.025 \text{ cm/sec}$$

معادلة (4-12) تعطي حجم الماء المار في الثانية الواحدة.

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

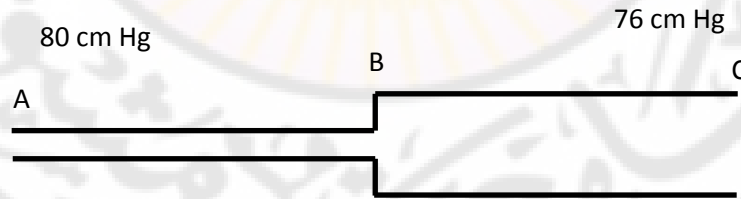
$\therefore$ حجم الماء المار في زمن قدره 15 دقيقة يساوي

$$\frac{\pi}{8} \cdot \frac{r^4}{\eta} \cdot \frac{P}{l} \cdot t = \frac{3.14}{8} \frac{(0.01)^4}{0.01} \times 10 \times 15 \times 60$$

$$= 3.5325 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$$

مثال (4-5):

أنبوبان B, A طولهما 100 سم، 50 سم ونصف قطريهما 0.1 ، 0.2 مليمتراً على الترتيب كما هو واضح في الشكل (4-9)، فإن كان هناك سائلاً ماراً في الأنبوبين داخلياً من A تحت ضغط قدره 80 سم زئبق وخارجاً من B تحت ضغط قدره 76 سم زئبق. أوجد الضغط عند اتصال B مع A.



الشكل (4-9)

الحل:

حيث إنه لا يوجد تراكم في السائل، فإن الحجم الذي يمر في أي مقطع من مقاطع الأنبوبين ثابت. وبالرجوع إلى الشكل (4-9) نجد أنه بالنسبة للأنبوبة A

$$Q_1 = \frac{\pi}{8} \frac{P_A - P_C}{l_1} \frac{r_1^4}{\eta}$$

حيث P_A الضغط عند A

حيث P_C الضغط عند C

حيث L_1, r_1 نصف قطر وطول الأنبوبة A

وبالمثل بالنسبة للأنبوبة B

$$Q_2 = \frac{\pi}{8} \frac{P_C - P_B}{l_2} \frac{r_2^4}{\eta}$$

حيث P_B الضغط عند B.

حيث L_2, r_2 نصف قطر وطول الأنبوبة B

وحيث إن: $Q_1 = Q_2$

$$\therefore \frac{\pi}{8} \frac{(P_A - P_C) \times 13.6 \times 980 \times r_1^4}{\eta l_1} = \frac{\pi}{8} \frac{(P_C - P_B) \times 13.6 \times 980 \times r_2^4}{\eta l_2}$$

حيث إن الضغط مقدراً بالسنتيمتر زئبق

$$\therefore \frac{(80 - P_C)(0.01)^4}{100} \frac{(P_C - 76)(0.02)^4}{50}$$

$$\therefore \frac{80 - P_C}{2} = (P_C - 76) \times 2^4$$

أي أن

$$80 - P_C = (P_C - 76) \times 32$$

$$80 - P_C = 32P_C - 2432$$

$$\therefore P_C = \frac{2512}{33} = 76.12 \text{ cm Hg}$$

4-6-2- قانون استوك stoke's law

إذا سمح لكرة من معدن أن تسقط تحت تأثير الجاذبية الأرضية في سائل

لزج واكتسبت سرعة ولتكن v ، فإن طبقة السائل التي تلامس الكرة أثناء

هبوطها رأسياً تعيق حركتها وتعمل على الحد من سرعتها، وفي نفس الوقت تحاول الكرة من جانبها أن تحمل معها جزيئات السائل المكونة للطبقة الأسطوانية الملامسة لها فتحركها وتعمل على أن تكسبها سرعتها v . وما يقال عن تأثير الكرة المتحركة على الطبقة الاسطوانية للسائل الملامسة لها ينطبق تماماً على ما تحدثه هذه الطبقة الملامسة للكرة للطبقة الاسطوانية من السائل التي تليها في الخارج. وهكذا يتوالى التأثير إلى أن ينعدم الأثر الناتج عن حركة الكرة في السائل على بعد ما من مسارها. وعليه يمكن اعتبار حركة طبقات السائل بالنسبة لبعضها البعض حركة نسبية وأن حركة الكرة في السائل تتوقف على معامل اللزوجة.

وعندما تسقط كرة صغيرة من معدن نصف قطرها r داخل السائل، نجد أنها سرعان ما تكتسب سرعة ثابتة منتظمة v أثناء هبوطها. وهذا يدل على أن قوة الجاذبية الأرضية التي تؤثر على الكرة إلى أسفل تتعادل مع قوة رفع السائل لها مضافاً إليها القوة الناتجة عن لزوجة السائل إلى أعلى، الأمر الذي لا يسفر عنه وجود تسارع يؤثر على الكرة، فهي إذا تهبط بسرعة منتظمة داخل السائل. وقد أثبت أن القوة F التي تعوق الكرة داخل السائل الناتجة عن لزوجة السائل تتوقف على معامل لزوجة السائل η ، وعلى نصف قطر الكرة r وسرعتها المنتظمة v .

وعلى ذلك يمكن أن يُعبر عن F بالمعادلة التالية:

$$F = K \cdot \eta^\alpha v^\beta r^\gamma \quad (I)$$

حيث k مقدار ثابت.

وبكتابة معادلة الأبعاد، نجد أن:

$$MLT^{-2} = (ML^{-1}T^{-1})^{\alpha}(LT^{-1})^{\beta}L^{\gamma}$$

أي أن:

$$MLT^{-2} = M^{\alpha}L^{-\alpha+\beta+\gamma}T^{-\alpha-\beta}$$

وبمساواة الأسس في طرفي المعادلة، نجد أن

$$1 = \alpha \quad (1)$$

$$1 = -\alpha + \beta + \gamma \quad (2)$$

$$-2 = -\alpha - \beta \quad (3)$$

وبحل المعادلات الثلاث، نجد أن

$$\alpha = 1, \quad \beta = 1, \quad \gamma = 1$$

نعوض في (I) فإن:

$$\begin{aligned} F &= k \cdot \eta \cdot v \cdot r \\ &= 6\pi \cdot \eta \cdot v \cdot r \end{aligned} \quad (13 - 4)$$

حيث إنه قد وجد عملياً أن: $k = 6\pi$

4-6-3- تعيين معامل اللزوجة لسائل شفاف بطريقة استوك:

تقع كرة المعدن الصغيرة أثناء هبوطها في السائل المراد تعيين معامل لزوجته، تحت تأثير قوى ثلاث:

$$1- \text{ قوة الجاذبية الأرضية، وتعمل إلى أسفل وتساوي } \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g$$

حيث r نصف قطر الكرة، و ρ_1 كثافة مادة الكرة.

2- قوة دفع السائل للكرة، ويعمل إلى أعلى وهو يساوي وزن كمية السائل التي

$$\text{حجمها مساو لحجم الكرة ويساوي } \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_2 g$$

حيث ρ_2 كثافة السائل

3- القوة F الناتجة عن لزوجة السائل، وتعمل هذه القوة إلى أعلى وتساوي

$$6\pi \eta v r$$

حيث η معامل لزوجة السائل، و v السرعة المنتظمة لهبوط الكرة داخل السائل.
و بما أن الكرة تهبط حينئذ يكون:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_2 g + 6\pi \eta v r$$

أي أن

$$6\pi \eta v r = \frac{4}{3}\pi r^3 (P_1 - P_2)g$$

وعلى ذلك، فإن

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (P_1 - P_2)}{v} \quad (14 - 4)$$

ويلاحظ أنه عند بدء سقوط الكرة من حالة السكون وحالة ملامستها سطح السائل في حركتها إلى أسفل يكون وزنها أكبر من دفع السائل لها مما يترتب عليه حركة الكرة بتسارع، فتزداد سرعتها تدريجياً إلى أن تصل إلى قيمة نهائية (السرعة المنتظمة v) عندما تصبح الكرة في حالة اتزان تحت تأثير القوى الثلاث التي ورد ذكرها. وفي العادة تصل سرعة الكرة قيمتها v على عمق صغير جداً من سطح السائل.

وتستخدم المعادلة (14-4) لإيجاد معامل لزوجة السوائل، وذلك بوضع السائل في أنبوبة رأسية واسعة المقطع طولها حوالي متر. وبلاستعانة بساعة إيقاف يعين الزمن t الذي تستغرقه الكرة في سقوطها وقطعها المسافة بين العلامتين B, A على الأنبوبة بعد أن تكون قد هبطت مسافة في السائل كافية لوصولها لسرعتها المنتظمة النهائية v كما هو مبين في الشكل (10-4). وحينئذ

$$\frac{A - B}{t} = v \quad \text{تكون:}$$



الشكل (4-10)

ومن المعادلة (4-14) يمكن إيجاد معامل اللزوجة بمعرفة نصف قطر الكرة التي تم سقوطها.

مثال (4-6):

أوجد السرعة النهائية لكرة من الحديد نصف قطرها 0.5 سم تسقط في سائل كثافته 1.2 غ/سم³ ومعامل لزوجته 8.3 بواز علماً بأن كثافة الحديد هي 8 غ/سم³.

الحل:

من المعادلة (4-14) فإن:

$$\eta = \frac{2 r^2 g (P_1 - P_2)}{9 v}$$

$$\therefore v = \frac{2 r^2 g (P_1 - P_2)}{9 \eta}$$

حيث r نصف قطر الكرة، ρ_1 كثافة مادتها، ρ_2 كثافة السائل، η معامل لزوجته

$$\begin{aligned} \therefore v &= \frac{2 (0.2)^2 \times 980 \times (8 - 1.2)}{9 \times 8.3} \\ &= 7.137 \text{ cm/sec} \end{aligned}$$

تمارين ومسائل

(1) يتدفق الماء بمعدل 250 لتر/ثا من أنبوب يرتفع طرفه مسافة $h_1 = 120\text{m}$ عن الأرض وطرفه الآخر يرتفع مسافة $h_2 = 20\text{m}$ عن الأرض وحيث أن الضغط عند طرفه الأول يساوي $P_1 = 1.5 \times 10^5$ ونصف قطر مقطعه العلوي $a_1 = 30\text{ cm}$ ، ونصف قطره السفلي $a_2 = 16\text{ cm}$ احسب الضغط وسرعة التدفق عن طرفه الثاني .

(2) يدخل الماء إلى المنزل في أنبوب قطره الداخلي 2.0 cm بضغط مطلق مقداره $4 \times 10^5\text{ pa}$ أي ما يقارب 4 atm ، ويبلغ قطر الأنبوب الذي يصل إلى غرفة الحمام في الطابق الثاني على ارتفاع 5m مقدار 1.0 cm . فإذا علمت أن سرعة تدفق الماء في أنبوب الداخل هو 4 m.s^{-1} فأوجد سرعة الجريان والضغط في غرفة الحمام.

الأجوبة $v = 16\text{ m/seg}$ ، $P = 2.3 \cdot 10^5\text{ pa} \approx 2.3\text{ atm}$ ،

(3) يسري الماء في أنبوبة أفقية مساحة مقطعه 4.4 سم^2 بها اختناق مساحة مقطعه 1.1 سم^2 ، وكانت كمية الماء التي تتدفق في خمس ثوان هي 270 سم³. احسب سرعة تدفق الماء عند المقطعين. وما هو فرق الضغط بين هذين الجزئين إذا وصل مانومتر زئبقي بين الجزئين، فما هو الفرق في الارتفاع بين عمودي الزئبق في المانومتر.

(4) يسري الماء في ماسورة مياه أفقية بمعدل 5250 سم³ في الثانية. فإذا كان ضغط الماء يعادل $1.2 \cdot 10^6$ داین/سم² عند نقطة في الماسورة مساحة

المقطع فيها 9.4 سم²، فكم تكون مساحة المقطع عند اختناق في الأنبوبة بحيث يكون الضغط 10^6 دايين/سم².

(5) أنبوبة أفقية بها اختناق يسري فيها الماء، فإذا كانت سرعة تدفق الماء عند مقطع من الأنبوبة نصف قطر 7.5 سم هي 120 سم في الثانية وكان نصف قطر المقطع عند الاختناق 3.5 سم، أحسب سرعة التدفق عند الاختناق وكذلك كمية الماء المارة في الدقيقة.

(6) يتسرب الماء من ثقب مساحته 0.5 سم² موجود في جدار إناء به ماء، وكان ارتفاع الماء في هذا الإناء 100 سم. احسب سرعة الماء المنسكب وكذلك حجم الماء الذي يتسرب في الساعة بفرض أن ارتفاع الماء في الإناء ثابت طوال الوقت.

(7) مستودع مغلق من أعلى وبه فتحة جانبية، مملوء بماء حتى ارتفاع 4.8 متر أعلى من الفتحة. احسب الضغط أعلى الماء في المستودع بحيث تكون سرعة تدفق الماء من الفتحة الجانبية 12 متر في الثانية. إذا وصلنا أنبوبة رأسية في الفتحة الجانبية بجانب المستودع، فما ارتفاع الماء فيها.

(8) مستودع مغلق من أعلى وبه فتحة جانبية مملوء بماء حتى ارتفاع 480 سم أعلى من الفتحة. فإذا كان الضغط أعلى الماء في المستودع $2.5 \cdot 10^6$ دايين/سم² احسب سرعة تدفق الماء من الفتحة الجانبية. وإذا كانت مساحة مقطع الفتحة 800 سم²، احسب كمية الماء التي تتدفق في الدقيقة.

(9) أنبوبتان AB، BC اتصلا عند B، AB طولها 16 سم وقطرها 0.4 سم، BC طولها 4 سم وقطرها 0.2 سم. وضعت الأنبوبة أفقية ووصل الطرف

A بإناء يحتوي على سائل لزج كثافته 0.9 غ/سم^3 ، فإذا كان ارتفاع السائل في الإناء أعلى من A بمقدار 15 سم. أحسب مقدار الضغط عند B ثم احسب معامل لزوجة السائل.

10) احسب السرعة النهائية لكرة من الحديد نصف قطرها 0.2 سم تسقط في سائل كثافته 1.2 غ/سم^3 ومعامل لزوجته 8.3 بواز علماً أن كثافة مادة الكرة 8 غ/سم^3 .

11) يمر تيار من الماء في أنبوبة طولها 10 سم ونصف قطرها الداخلي 0.5 سم وكان فرق الضغط بين طرفي الأنبوبة معيناً بواسطة مانومتر به ماء، وفرق مستوى الماء فيه 5.6 سم. فإذا كان معدل تدفق الماء هو 8.1 سم³/دقيقة احسب معامل لزوجة الماء.



الفصل الخامس

الحالة الغازية وقوانينها الأساسية

Laws of Ideal Gases

5-1- تمهيد

تعرفنا في فصل سابق، أن الحرارة نوع من أنواع الطاقة، وأن أي جسم حين يأخذ شيئاً من الطاقة فسوف تتأثر مكوناته الداخلية أولاً ثم يبدأ الجسم بتغيير وضعه التوازني حسب كمية الطاقة المقدمة له.

نفترض جسماً صلباً تحت التكبير المجهرى الدقيق، تعرض للحرارة الشديدة بشكل مستمر، ونلاحظ أن مكوناته (جزيئات، ذرات، أيونات) بدأت تتحرك عشوائياً متصادمة مع بعضها بعضاً متجاذبة ومتنافرة لتصل إلى وضع الانزلاق على بعضها تفقد عند ذلك المادة شكلها الصلب وحجمها لتتحول إلى مائع ويقال إن المادة قد فقدت وضعها الصلب وأصبحت ذات طبيعة سائلة، ومع استمرار الطاقة الحرارية المقدمة لها فإن مكونات المادة السائلة سوف تفقد قدرتها على تحمل التصادمات العشوائية وتبدأ تتلاشى قواها وتتباعد جزيئاتها وتتحطم لتصل إلى وضع ذي طبيعة بخارية على شكل ذرات غازية تملأ الإناء الذي يحويها إن كان مغلقاً ويقال إن المادة قد تحولت إلى طورها الغازي. ومع استمرار الطاقة الحرارية المؤثرة على المادة تفقد الذرات الغازية كل قدرتها على التحمل وتتلاشى نوياتها متحطمة ويقال إن المادة قد فقدت حجمها (فنية) وبما أن المادة هي نوع من أنواع الطاقة المجمدة كما عبر أينشتاين وأن الطاقة

لا تفنى لذلك فسر علماء الفيزياء بأن المادة قد وصلت إلى طور غير منظور اسموه البلازما.

لذلك نستطيع القول إن المادة في الطبيعة ذات أربعة أطوار، الطور الصلب، والطور السائل، والطور الغازي، وطور البلازما والذي لم يتم بعد التعرف على خصوصياته وقوانينه الفيزيائية. ناقشنا في فصول سابقة الطور الصلب للمادة ثم الطور السائل وأهم الخواص الفيزيائية للمادة، وسوف نناقش في هذا الفصل القوانين والأسس التي توضح فيزيائية الطور الغازي.

5-2- الغازات المثالية وخواصها

تعرفنا خلال دراستنا للمادة وتغيرات حالتها، أن المادة عبارة عن جزيئات أو ذرات أو أيونات مترابطة فيما بينها بقوى تجاذب، تلك الارتباطات ومدى قوتها هي التي تحدد الطور الذي توجد عليه المادة إن كان صلباً أو سائلاً أو غازياً.

تتميز الحالة الغازية للمادة بحقيقة مفادها، تتواجد جزيئاتها على أبعاد كبيرة من بعضها بعضاً، بحيث أنها لا تبدي فيما بينها إلا تجاذباً طفيفاً، وهكذا تصبح جزيئات المادة الغازية قادرة على ملأ الإناء الذي يحويها ومهما كان حجمها أو عددها، ولها القدرة على التمدد والاستجابة للتغيرات الحاصلة في الضغط (Pressure) والحجم (Volume) ودرجة الحرارة (T) وكذلك فإن سلوكها الفيزيائي لا يتأثر بالطبيعة الكيميائية لجزيئاتها.

تتعامل القوانين الفيزيائية الأساسية التي درست الحالة الغازية مع غازات افتراضية تجريبية نقية وذات صفات فيزيائية مثالية من حيث التأثير

والتأثير ويفترض نظرياً وجودها في الطبيعة وهو عبارة عن جسيمات مادية صغيرة جداً (جزيئات) تعاني خلال حركتها تصادمات مرنة مع جدار الإناء الذي يحويها وعلى افتراض أن قوى التجاذب والتأثيرات المتبادلة بين الجزيئات مهمة وكذلك إهمال حجم الغاز بالنسبة لحجم الإناء على افتراض أن تلك الجزيئات ما هي إلا نقاطاً مادية مهمة الحجم وقد أسموه الغاز المثالي أو الغاز الكامل.

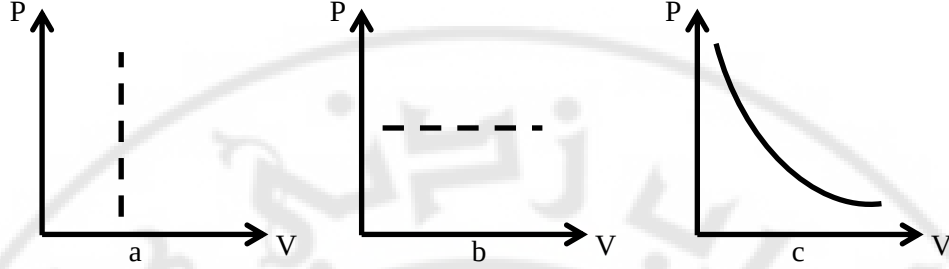
5-3- القوانين التجريبية للغازات المثالية:

تُعَدّ المعاملات الفيزيائية الأساسية (الضغط، الحجم، درجة الحرارة) التي تصف حالة جملة غازية معينة أساس التفكير لدراسة سلوكية الغازات وهي التي تصف حالة الجملة الغازية وتحولاتها.

يُسمى التحول الذي يتم وأحد تلك المعاملات الأساسية يبقى ثابتاً بالتحول المنتظم المثالي، فإن ثبت الحجم تغير الضغط مع الارتفاع في درجة حرارته وسمي هذا التحول بالتحول المتساوي الحجم (Isochor). وإن ثبت الضغط تغير الحجم مع التغير في درجة الحرارة وسمي هذا التحول بالتحول المتساوي الضغط (Isobar) وهكذا لو تم التحول بثبات درجة الحرارة فإن هذا يؤدي إلى تناسب عكسي بين الضغط والحجم وسمي هذا التحول بالتحول المتساوي الدرجة (Isotherm).

الشكل (5-1، a, b, c) يوضح بيانياً المتغيرات للمتحولات الأساسية.

نتناول في هذا الفصل أهم القوانين الفيزيائية للغازات المثالية التي ناقشت العلاقة البيئية بين تلك المتحولات.



الشكل (5-1)

5-3-1- قانون بويل وماريوط

تمكن كل من بويل وماريوط (1662-1667) من اكتشاف العلاقة الكائنة بين الحجم والضغط لكثلة غازية معينة عند ثبات درجة الحرارة وتوصلا إلى العلاقة القائلة:

يتناسب حجم كتلة معينة من غاز مثالي عكسا مع الضغط الخاضع له وذلك عند ثبات درجة الحرارة.

$$\left(V \propto \frac{1}{P}\right)_{T=con} \Rightarrow \left(V = K \frac{1}{P}\right)_{T=con}$$

$$\therefore P \cdot V = K_T$$

وتكتب علاقة بويل وماريوط بالشكل:

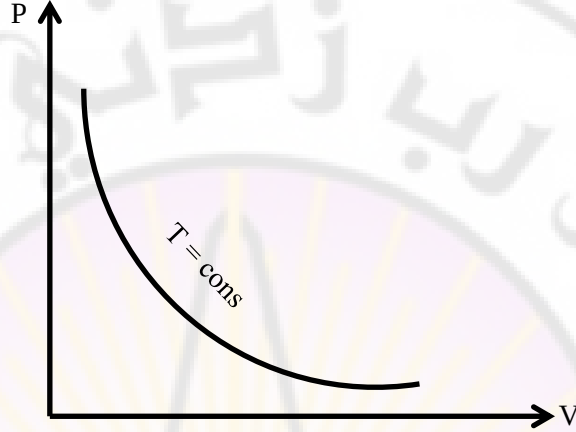
$$[P \cdot V = \text{Constant}]_{T=con} \quad (1-5)$$

نستنتج من المعادلة (1-5) «يبقى جداء ضغط كثلة غازية بحجمها مقدارا ثابتاً وذلك إذا تم إجراء العملية عند درجة حرارة ثابتة».

$$[P \cdot V = P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = P_3 \cdot V_3]_{T=c} \quad (2-5)$$

يمكن تمثيل قانون بويل وماريوط بيانيا في الاحداثيات (P V) عند ثبات درجة الحرارة، حيث يمر عبر النقاط التجريبية خط بياني له شكل القطع الزائد كما هو واضح في الشكل (2-5) وتسمى مثل هذه الخطوط البيانية بالخطوط متساوية

الدرجة أو خطوط الإيزوثيرم (Isotherm) وهي تعبر عن قانون بويل وماريوط.



الشكل (5-2)

5-3-2- قانون غاي-لوساك-تشارلز.

درس تشارلز (1787) وتبعه كل من غاي ولوساك العلاقة بين حجم كتلة غازية ودرجة الحرارة عند إجراء التجربة تحت ضغط ثابت.

نفترض حجما ابتدائيا V_0 لجملة من غاز مثالي درجة حرارته t_0 داخل أسطوانة تنتهي بمكبس حر الحركة، نزيد من درجة حرارة الجملة بمقدار Δt مما يؤدي إلى انزلاق المكبس ليتمدد الغاز شاغلا حجما جديدا قدره V .

تستخدم معادلة التمدد الحجمي المعروفة في الحالة الصلبة بعد إجراء بعض الاحتياطات الرياضية لتطبيقها في الحالة الغازية يكون:

$$V = V_0 (1 + \beta t) \quad (3 - 5)$$

حيث تعبر β عن معامل التمدد الحجمي وقيمه ثابتة وترتبط بدرجة الحرارة المقاسة بمقياس كلفن وتعادل $\frac{1}{273}$

$$\beta = \frac{1}{273} \quad (4 - 5)$$

يعني هذا من الناحية الفيزيائية أنه إذا بقي الضغط الذي تخضع له كتلة غازية معينة ثابتاً فإن حجمها يزداد بمقدار $\frac{1}{273}$ كلما ارتفعت درجة حرارتها درجة مئوية واحدة....

فإذا كان حجم الغاز في درجة صفر مئوية V_0 فإن ذلك الحجم يزداد بمقدار $V_0 \times \frac{1}{273}$ عند رفع درجة حرارته بمقدار t درجة مئوية ويصبح حجمه V :

$$V = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot t \right) \quad (5 - 5)$$

$$V = V_0 \left(\frac{273+t}{273} \right) \quad (6 - 5)$$

وبالتالي تصبح المعادلة (5-6) على الشكل:

$$V = V_0 \frac{T}{T_0}$$

$$\therefore \frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0}$$

حيث:

- V_0 حجم الغاز في درجة صفر مئوية.
- V_t حجم الغاز عند درجة t مئوية.
- T_0 درجة الحرارة المطلقة بمقياس كلفن المقابلة للصفر المئوي: $T_0=273$
- T درجة الحرارة المطلقة بمقياس كلفن المقابلة للدرجة t بالمقياس المئوي:

$$T = (273 + t)$$

يعبر بشكل عام عن قانون غاي-لوساك-تشارلز بالعلاقة التطبيقية الآتية:

$$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (7 - 5)$$

أي أن:

حجم كتلة من غاز مثالي تحت ضغط ثابت يتناسب طردياً مع درجة حرارته المطلقة

$$\left[\frac{V}{T} = \text{constant} \right]_{P=\text{con}}$$

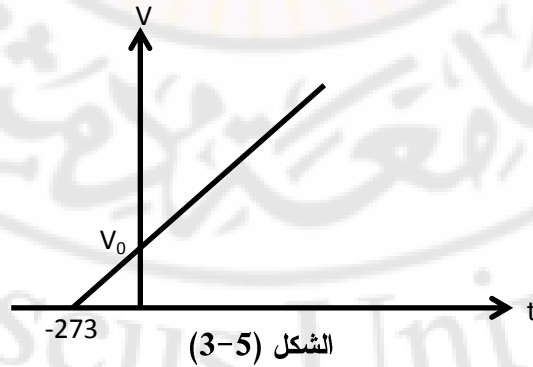
نلاحظ من خلال خطوات استنتاج العلاقة أن قانون غاي-لوساك-تشارلز قابل للتطبيق في أي وضع حراري باستثناء حالة كون درجة الحرارة المطلقة بمقياس كلفن T تساوي الصفر ($T=0$) وتسمى درجة الصفر المطلق بمقياس كلفن، والتي يقابلها بمقياس سلزيوس -273 كآلاتي:

$$(T = 273 + t = 0 \Rightarrow t = -273)$$

وهي درجة الحرارة التي يبدأ فيها الغاز بالتكاثف، وهذا يعني من الناحية الفيزيائية أن الغاز بدأ يتميع ويفقد حجمه وتصبح العلاقة (5-6) كالتالي:

$$V = V_0 \left(\frac{273 - t}{273} \right) \Rightarrow V = 0 \quad (5-8)$$

هذا يعني يفقد الغاز حجمه عند درجة الصفر المطلق، وإن المادة قد فقدت طورها الغازي.



5-3-3- قانون دالتون للضغوط الجزئية:

تتحرك جزيئات من أنواع مختلفة من الغازات المثالية ضمن حجم معين بشكل مستقل وكأن كل نوع من تلك الغازات هو وحده يشغل الحجم كاملاً. كذلك فإن الأنواع المختلفة لها القدرة على الامتزاج بشكل تام وبكميات مختلفة. عند مزج بعض الغازات المثالية ضمن حجم معين، فإن كلا منهما يملك ضغطاً خاصاً به ندعوه بالضغط الجزئي ويعرف بأنه الضغط الذي يؤثر به هذا الغاز فيما لو شغل وحده كل الحجم الذي يشغله المزيج وفي درجة الحرارة ذاتها.

عبر دالتون عام 1801 عن تلك الحقيقة التي تربط ما بين الضغط الكلي لمزيج غازي والضغوط الجزئية للغازات المكونة لذلك المزيج وقد أثبت تجريبياً أن الضغط الكلي لمزيج من غاز مثالي موجود في حجم محدد يساوي مجموع الضغوط الجزئية التي يملكها كل غاز فيما لو شغل لوحده كل الحجم الذي يشغله المزيج وعند درجة الحرارة ذاتها.

لنفترض أن حجماً V يحتوي على مزيج من الغازات المثالية A و B و C و..... عدد جزيئاتها الغرامية على التوالي n_a و n_b و n_c وعند درجة الحرارة T . وحسب الحقيقة السابقة فإن الضغط في الوعاء يساوي P_a فيما لو شغل الحجم فقط بالجزيئات n_a ، وبالمثل يكون الضغط مساوياً P_b و P_c فيما لو شغل الحجم فقط بالجزيئات n_b أو n_c وتحت نفس درجة الحرارة T ، وعلى افتراض أن P هو الضغط الكلي داخل الوعاء عند وجود تلك الغازات مجتمعة يكون:

$$P = P_a + P_b + P_c + \dots \quad (9 - 5)$$

5-3-4- قانون أفوغادرو:

قام أفوغادرو عام 1811 بتجاربه المتعددة على غازات مختلفة في شروط واحدة من الضغط والحرارة وتوصل إلى أنه يشغل المول الواحد (وزن من الغاز يساوي الوزن الجزيئي مقدرا بالغرام) في الشروط النظامية ($t=0$ و $P=1.013 \times 10^5$ pascal) من أي نوع من أنواع الغازات المثالية حجما مقداره V :

$$V = 22.4 \text{ L} = 22400 \text{ cm}^3/\text{mole} = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mole}$$

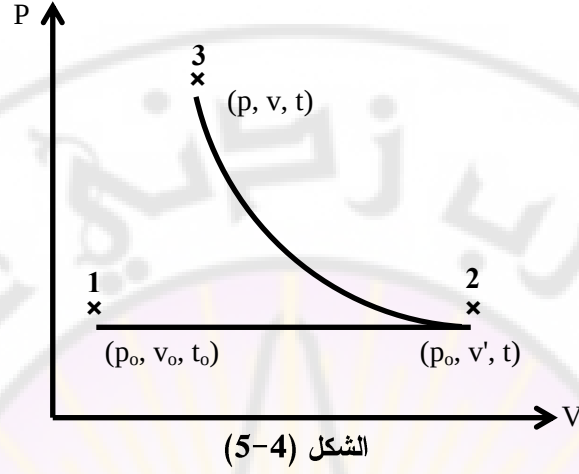
$$: 1 \text{ L.} = 1000 \text{ cm}^3$$

5-4- معادلة الحالة للغاز المثالي:

تحددت سلوكية الغاز المثالي بقوانين تجريبية معتمدة على الافتراضات التي وضعت الأساس للغازات المثالية حسب المتغيرات الأساسية للحالة الغازية (الضغط والحجم ودرجة الحرارة).

حاول العلماء أن يضعوا صيغة شاملة لسلوك الغازات المثالية وقد وضعوا بالاعتبار ما توصل إليه كلاً من بويل وماريوط، غاي-لوساك-تشارلز ودالتون وأفوغادرو.

نفترض جملة غازية مؤلفة من n مولا (جزيئاً غرامياً) مواصفاتها الأساسية في حالتها الابتدائية هي (p_0, v_0, t_0) قد تحولت إلى وضع متوازن آخر مواصفاته (p, v, t) كما هو واضح بالشكل (4-5).



نلاحظ من الشكل أن الجملة الغازية قد تحولت من وضع توازنها الابتدائي (p_o, v_o, t_o) إلى وضعها المتوازن الثاني (p_o, v', t) ثم إلى وضعها المتوازن النهائي (p, v, t) . ومن خلال دراسة الحالة نجد أن الجملة قد مرت بتحولين متتاليين:

1- تحولت الجملة من وضعها الابتدائي (p_o, v_o, t_o) إلى وضعها (p_o, v', t) وهذا يعني أن التحول قد تم عبر تحول متساوي الضغط (الأيزوبار) وحسب غاي-لوساك فإن

$$V' = \frac{V_o}{273} T \quad (10 - 5)$$

2- تحولت الجملة من وضعها (p_o, v', t) إلى وضعها النهائي (p, v, t) وهذا يعني أن التحول قد تم عبر تحول متساوي الدرجة (الإيزوثيرم) وحسب بويل ومايوط فإنه يكون:

$$P \cdot V = P_o \cdot V' \quad (11 - 5)$$

نعوض المعادلة (10-5) بالمعادلة (11-5) فنجد:

$$P \cdot V = \frac{P_o V_o}{273} T$$

حيث تمثل V_o الحجم الابتدائي للجولة وهو يساوي عدد المولات مضروباً بحجم المول الواحد ($V_o = n V_m$).

$$\therefore P \cdot V = n \frac{P_o V_m}{273} T$$

بما أن كلاً من P_o و V_m و 273 هي قيم عددية ثابتة لجميع الغازات فقد اعتبروا الكمية $P_o \cdot V_m / 273$ ثابتاً معيناً اسموه ثابت الغازات ورمزوا له ب R وهكذا يكون:

$$R = \frac{P_o V_m}{273} \quad (12 - 5)$$

$$\therefore P \cdot V = n R T \quad (13 - 5)$$

المعادلة (13-5) تعتبر المعادلة العامة للغازات المثالية وتسمى معادلة الحال للغاز المثالي

5-5- المعنى الفيزيائي لثابت الغازات R :

يتضح المعنى الفيزيائي لثابت الغازات R من خلال معرفة معادلة أبعاده ووحدته و قيمته العددية.

5-5-1 القيمة العددية ووحدات ثابت الغازات R :

من المعادلة (12-5) نجد أن:

$$R = \frac{P_o V_m}{273}$$

تعتمد قيمة R على قيم ووحدات كل من P_o و V_m حيث لدينا:

(a) P_o تعني ضغط الجولة وهو يتم حسابه من قانون تورشيلي وارتفاع عمود الزئبق بمقياس الضغط الجوي ونأخذها 1 جو (1 atm) على أساس ضغط نظامي.

إن مقياس الضغط يعطي ارتفاعاً في عمود الزئبق قدره في الحالة النظامية 76 سنتيمتر زئبقي لذلك فإن مقدار الضغط يحسب من خلال معرفتنا المسبقة بتأثير الجاذبية الأرضية لهذا العمود الزئبقي وحسب تورشيلي:

$$\therefore P_o = P_a = \rho_{Hg}gh$$

$$: \rho = 13600 \text{ kg/m}^3 = 13.6 \text{ gr/cm}^3$$

$$g = 9.8 \text{ m/sec}^2 = 980 \text{ cm/sec}^2$$

$$h = 0.76 \text{ mHg} = 76 \text{ cmHg}$$

$$\begin{aligned} \therefore P_a &= 13600 \times 9.8 \times 0.76 = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \text{ (pascal)} \\ &= 13.6 \times 980 \times 76 = 1.013 \times 10^6 \text{ dyn./cm}^2 \end{aligned}$$

V_m (b) تعني حجم المول الواحد من الغاز المثالي في الشروط النظامية وهذا معروف تجريبياً.

$$V_m = 22.4 \text{ Litre} = 22400 \text{ cm}^3 = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

لذلك لحساب قيمة R نعوض قيم P_o ، V_m الواردة في a و b بالمعادلة

$$R = \frac{P_o V_m}{273} \quad (12-5)$$

نجد:

1- في النظام السفئي (c.g.s) يكون:

$$\begin{aligned} R &= \frac{1.013 \times 10^6 (\text{dyne/cm}^2) \times 22400 (\text{cm}^3)}{273 (\text{°K})} = 8.31 \times 10^7 \text{ dyne cm}^{-2} \cdot \text{cm}^3 / \text{°K} \\ &= 8.3 \times 10^7 \text{ dyne.cm/°K} \\ &= 8.3 \times 10^7 \text{ erge/°K} \end{aligned}$$

2- في النظام المكثي (M.K.S) يكون:

$$R = \frac{1.013 \times 10^5 (N/m^2) \times 22.4 \times 10^{-3} (m^3)}{273 (^\circ K)} = 8.31 N \cdot m^{-2} \cdot m^3 / ^\circ K$$
$$= 8.31 N \cdot m / ^\circ K$$
$$= 8.31 \text{ Joule} / ^\circ K$$

3- في النظام الحراري (حريرة) يكون:

بما أن التحويلات الغازية تتم داخل جملة لذلك فإن الواحدات هي واحدات حرارية وليست ميكانيكية. لذلك لإيجاد قيمة R وواحداتها بالواحدات الحرارية نستخدم المكافئ الحراري الميكانيكي لجول

$$1 \text{ Joule} = \frac{1}{4.18} \text{ calory (حريرة)}$$

$$R = \frac{8.31}{4.18} = 1.99 \text{ calory} / ^\circ K$$

4- نصادف أحيانا أثناء حل السائل أن الحجم يعطى باللتر والضغط الجوي النظامي وحيث أن الضغط الجوي النظامي يعادل 1 جو (1 atm) فإنه بالإمكان إيجاد قيمة R مباشرة دون تحويل الحجم والضغط إلى واحدات أخرى وذلك كالآتي:

$$R = \frac{1(atm) \times 22.41(Liter)}{273 (^\circ K)} = 8.31 \times 10^{-2} \text{ atm} \cdot \text{Liter} / ^\circ K$$

ملاحظة مهمة: هذا يعني أن R ثابتاً فيزيائياً وليست ثابتاً عددياً لأنه يملك واحدات، وواحداته هي واحدات طاقة فهو يعبر عن طاقة.

مثال (5-1):

وعاء حجمه 100 لتر يحتوي على 300 غرام من الأكسجين في الدرجة 27 °م والمطلوب حساب الضغط في هذا الوعاء.

الحل:

من معادلة الحالة العامة للغازات المثالية:

$$P.V = n R T \rightarrow P = \frac{n R T}{V}$$

$$: V = 100 \text{ Liter} = 100 \times 10^{-3} = 0.1 \text{ m}^3$$

$$n = \frac{m}{m_p} = \frac{300 \times 10^{-3}}{32} = \frac{0.3}{32} \text{ mole}$$

$$R = 8.31 \text{ J/mole.}^\circ K$$

$$T = 273 + 27 = 300^\circ K$$

$$\therefore P = \frac{n R T}{V} = \left(\frac{0.3}{32} \times 8.31 \times 300 \right) / 0.1 = 234 \text{ N/m}^2 = 0.00234 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

مثال (5-2):

وعاء حجمه 20 لتر يحتوي على غاز في الدرجة 127 °م وتحت الضغط يعادل 2 جو. أوجد حجمه في الشروط النظامية.

الحل:

من معادلة الحالة في الوضعين يكون:

$$\left[\begin{array}{l} P_1 V_1 = n R T_1 \\ P_2 V_2 = n R T_2 \end{array} \right] \rightarrow \frac{P_1 V_1}{P_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2} \rightarrow V_2 = \frac{P_1 V_1 T_2}{P_2 T_1}$$

$$V_2 = \frac{2 \times 20 \times 273}{1 \times 400} = 27.3 \text{ Liter} = 27.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

مثال (3-5):

غاز داخل أسطوانة تنتهي بمكبس يشغل حجماً قدره 15 ليترًا عند ضغط 75 سم زئبقي. أحسب الضغط اللازم كي يتغير الحجم إلى 12 لتر بثبات درجة الحرارة.

الحل:

بما أن التغير يحصل بثبات درجة الحرارة فإنه حسب بويل وماريوط يكون:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$\therefore P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2}$$

$$: V_1 = 15 \text{ Liter} = 15 \times 10^{-3} m^3 = 0.015 m^3$$

$$V_2 = 12 \text{ Liter} = 12 \times 10^{-3} m^3 = 0.012 m^3$$

$$h_1 = 75 \text{ cm Hg} \rightarrow P_1 = \rho_{Hg} g h_1 = 13600 \times 9.8 \times 0.75 \approx 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$\therefore P_2 = \frac{1 \times 10^5 \times 0.015}{0.012} = 1.25 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = \frac{1.25 \times 10^5}{13600 \times 9.8} = 0.93 \text{ m Hg}$$

$$\therefore P_2 = 93 \text{ cm Hg}$$

مثال (4-5):

أسطوانة تنتهي بمكبس تحتوي على غاز حجمه V في الدرجة 27°م. تم تبريد الغاز تحت ضغط ثابت.

أوجد درجة التبريد اللازمة حتى يتناقص الحجم إلى 0.75.

الحل:

بما أن التغير يتم تحت ضغط ثابت فإنه حسب غاي - لوساك يكون:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$\therefore T_2 = \frac{T_1 V_2}{V_1}$$

$$: V_1 = V$$

$$V_2 = 0.75 V$$

$$T_1 = 27 + 273 = 300^\circ K$$

$$\therefore T_2 = \frac{300 \times 0.075 V}{V} = 300 \times 0.075 = 225 K^\circ = -48^\circ C$$

تمارين ومسائل

1- غرفة حجمها 50 m^3 ومقياس الضغط فيها يشير إلى 730 mmHg ودرجة

حرارتها 10°C تم تدفئة الغرفة لتصل درجة حرارتها إلى 20°C

والمطلوب حساب تغير كتلة الهواء داخل الغرفة بافتراض أن الكتلة الجزيئية

للhواء هي $m = 29 \text{ Kg/mol}$.

2- تحتوي قطرة من عطر على 10^{-7} Kg من مادة عطرية كتلتها المولية

1 Kg/mole تبخرت داخل غرفة حجمها 60 m^3 والمطلوب حساب عدد

جزيئات المادة العطرة التي تدخل إلى رئتي الإنسان عند كل شهيق بافتراض

أن حجم الهواء الداخل يساوي 1 Liter .

3- تحتوي أسطوانة حجمها 1 m^3 على 1 Kg من الآزوت عند الدرجة 27

$^\circ\text{C}$ والمطلوب حساب ضغط الآزوت وكتلته النوعية في هذه الحالة

(كثافته).

4- غرفة مساحتها 20 m^2 وارتفاعها 3 m عند الدرجة 17°C والضغط 752

mmHg والمطلوب حساب عدد جزيئات الهواء الموجودة في تلك الغرفة.

5- بالون حجمه 100 Liter يحتوي على أكسجين عند الدرجة 17°C أخذنا منه 3Kg ولم تتغير درجة حرارته. والمطلوب حساب مقدار الانخفاض في الضغط داخل البالون.

6- كتلة من الأكسجين مقدارها 10 gr ودرجة حرارتها 10°C تحت ضغط قدره $3.04 \times 10^5 \text{ Pas}$ تسخن تحت ضغط ثابت حتى يصبح حجمها 10 Liter والمطلوب:

- 1- حجم الغاز قبل التسخين.
- 2- درجة الحرارة بعد التسخين.
- 3- كثافة الغاز قبل التسخين وبعده.

الفصل السادس

النظرية الحركية للغازات

Kinetic Theory of Gases

6-1- تمهيد:

تختص نظرية الحركة للغازات بدراسة خواص وسلوك جزيئات الغاز من حيث تصادم الجزيئات ببعضها وكذلك بينها وبين جدران الإناء الذي يحويها. وسوف نتطرق في بادئ الأمر إلى دراسة حركة الجزيئات في إناء مغلق دون الأخذ في الاعتبار لقوى التجاذب المتبادلة بين جزيئات الغاز وكذلك الحجم الحقيقي الذي تشغله الجزيئات بالنسبة لحجم الإناء الذي يحويها أي أننا سنعالج حالة الغاز المثالي (Ideal gas). ثم بعد ذلك سوف ندرس تأثير هذه العوامل على حركة جزيئات الغاز الحقيقي (Real Gas).

6-2- صفات الغاز المثالي:

تعتمد نظرية الحركة للغازات على الفرضيات الأساسية التالية والتي تصف الغاز المثالي:

1- تتكون أي كمية من الغاز النقي مهما صغرت من عدد هائل من الجزيئات المتماثلة في الشكل والحجم. وتختلف جزيئات أي غاز عن جزيئات الغاز الآخر.

2- يمكن اعتبار الجزيئات كتلا تتركز في نقاط، ويعتبر قطر الجزيء مهماً بالقياس إلى الأبعاد التي تفصل الجزيئات عن بعضها البعض.

3- تتحرك الجزيئات حركة عشوائية (Random Motion) دائمة في جميع الاتجاهات وبسرعات متفاوتة.

4- تتصادم جزيئات الغاز مع بعضها البعض ومع جدران الإناء الذي يحوي الغاز، ويتحرك الجزيء بين تصادمين متتاليين في خط مستقيم. وتعرف المسافة بين تصادمين متتاليين بالمسار الحر (Free Path) للجزيء.

5- زمن التصادم بين جزيئات الغاز يمكن إهماله إذا ما قورن بالزمن الذي يتحرك فيه الجزيء حراً بين تصادمين متتاليين.

6- الجزيئات عبارة عن كرات مصمتة تامة المرونة ويمكن إهمال قوى التجاذب أو التنافر فيما بينها أو مع جدران الإناء الحاوي للغاز. وعند تصادم جزيء مع جدران الإناء فإنه يرتد بنفس سرعته في الاتجاه المباشر.

7- تتوزع الجزيئات في حالة غياب قوى خارجية مؤثرة عليها توزيعاً منتظماً خلال الإناء المحتوي عليها. وبالتالي يمكن اعتبار أن كثافة الجزيئات واحدة داخل الإناء.

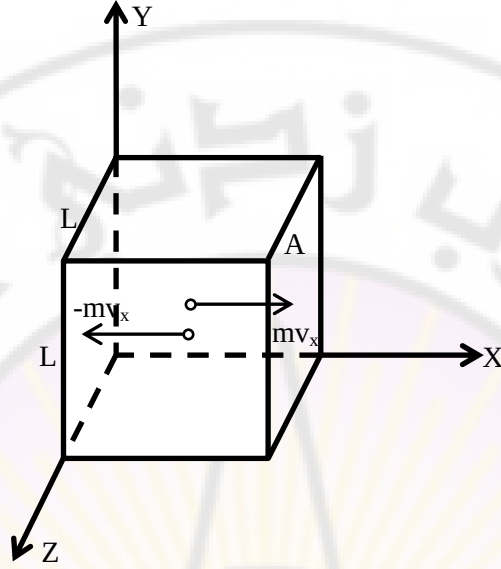
وقد أدت هذه الفرضيات الأساسية إلى معالجة كثير من الأمور المعقدة وتبسيطها والتي تدخل في نطاق نظرية الحركة للغازات.

3-6- ضغط الغاز المثالي Pressure of Ideal Gas

ينشأ الضغط الواقع على جدران إناء يحتوي على غاز من التصادمات المتتالية عليه بواسطة جزيئات الغاز. وإذا فرضنا جزيئاً يتحرك في خط مستقيم وبسرعة منتظمة في اتجاه عمودي على سطح جدار صلب ثم تصادم معه فإن الجزيء سوف يعكس اتجاهه مباشرة بعد لحظة التصادم. وحيث إن الجزيء

عبارة عن كرة مصمتة تامة المرونة لذلك تكون سرعته قبل التصادم V مساوية تماماً لسرعته بعد التصادم $(-V)$. وإذا كانت كتلة الجزيء هي m فإن كمية الحركة (momentum) سوف تتغير للجزيء من $(m V)$ قبل التصادم إلى $(-m V)$ بعد التصادم. ويكون مقدار التغير الكلي لكمية الحركة للجزيء يساوي $(2 m V)$ وهو يساوي في نفس الوقت قوة الدفع (Impulse) التي استقبلها سطح الجدار. وإذا استقبل الجدار عدداً كبيراً من هذه التصادمات في الثانية الواحدة فإنه يكون متوسط القوة الواقعة على سطح الجدار مساوية لمجموع التغير الكلي لكمية الحركة للجزيئات في نفس الزمن وذلك طبقاً لقانون الحركة الثاني لنيوتن. ومن هذا يمكن إيجاد مقدار الضغط الواقع على سطح الجدار بأخذ قيمة هذه القوة لوحدة المساحة. وسوف نستخدم فيما يلي هذه المبادئ الأساسية لإيجاد الضغط الناتج عن غاز مثالي.

نفرض إنشاء مكعب الشكل طول ضلعه L وجدرانه على امتداد المحاور Z, Y, X كما هو مبين بالشكل (1-6)، يحتوي على عدد N من جزيئات غاز نقي.



الشكل (6-1)

إذا اعتبرنا جزيء كتلته m ويتحرك بسرعة V_x في الاتجاه الموجب للمحور X وتصادم مع الجدار A للمكعب فإن مقدار التغير الكلي لكمية الحركة للجزيء تساوي $(2 m V_x)$.

ويلاحظ من الشكل أن الزمن الذي يأخذه الجزيء ليقطع طول ضلع المكعب هو $\frac{l}{V_x}$ وتكون الفترة الزمنية التي يأخذها الجزيء بين تصادمين متتاليين على الجدار A تساوي $\frac{2l}{V_x}$ وبالتالي تكون عدد التصادمات التي يتقبلها الجدار في وحدة الزمن تساوي $\frac{V_x}{2l}$.

وحيث أن كل تصادم في اتجاه المحور X يصاحبه تغيير في كمية الحركة تساوي $2 m V_x$ فإن التغير الكلي في كمية الحركة للجزيء في الثانية في اتجاه المحور X تساوي :

$$2 m V_x \cdot \frac{V_x}{2l} = \frac{m v_x^2}{l}$$

وطبقاً لقانون نيوتن الثاني في الحركة لنيوتن فإن التغير الكلي في كمية

الحركة في الثانية الواحدة يساوي قوة F . أي أن:

$$F = \frac{\text{التغير الكلي في كمية الحركة}}{\text{التغير في الزمن}}$$

$$\therefore F_x = \frac{m v_x^2}{l}$$

وإذا اعتبرنا N عدد الجزيئات الموجودة جميعها في المكعب فإن كل جزيء له مركبة سرعة في اتجاه المحور X تحدث على نفس الجدار قوة مماثلة وتكون القوة الكلية على جدار المكعب A العمودي على اتجاه المحور X هي:

$$F_{xT} = \sum_l^n F_x = \sum_l^n \frac{m v_x^2}{l}$$

$$\therefore F_{xT} = \frac{m}{l} (V_{1x}^2 + V_{2x}^2 + V_{3x}^2 + \dots + V_{Nx}^2)$$

حيث V_{1x} هي مركبة متوسط سرعة الجزيء الأول في الاتجاه x , V_{2x} مركبة متوسط سرعة الجزيء الثاني في الاتجاه x وهكذا.

كذلك إذا اعتبرنا المركبات على امتداد المحاور Y , Z لمتوسط سرعة الجزيئات فإن:

$$F_{YT} = \frac{m}{l} (V_{1y}^2 + V_{2y}^2 + V_{3y}^2 + \dots + V_{Ny}^2)$$

$$F_{zT} = \frac{m}{l} (V_{1z}^2 + V_{2z}^2 + V_{3z}^2 + \dots + V_{Nz}^2)$$

وطبقاً للفرض الثالث لنظرية الحركة للغازات حيث تتحرك الجزيئات

حركة عشوائية وغير موجهة فإنه يمكن القول بأن القوة التي تعمل بها جزيئات

الغاز في اتجاه المحور X تساوي القوة التي تعمل بها في اتجاه المحور Y

وتساوي القوة التي تعمل بها في اتجاه المحور Z .

أي أن:

$$F_{xT} = F_{yT} = F_{zT} = F$$
$$\therefore F_{xT} + F_{yT} + F_{zT} = 3F$$

Or

$$3F = \frac{m}{l} (V_{1x}^2 + V_{1y}^2 + V_{1z}^2) + (V_{2x}^2 + V_{2y}^2 + V_{2z}^2) + \dots + (V_{Nx}^2 + V_{Ny}^2 + V_{Nz}^2)$$
$$\therefore 3F = \frac{m}{l} (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 \dots \dots \dots V_N^2) \quad (1-6)$$

المعادلة (1-6) توضح أن لكل جزيء مربع سرعة تختلف عن مربع سرعة الجزيء الآخر ولإيجاد متوسط هذه السرعات فإن أفضل طريقة هي قسمة المجموع الحسابي لمربع هذه السرعات على عدد الجزيئات الكلية N الموجودة بالمكعب. نفرض أن $\overline{C^2}$ هي متوسط مربع هذه السرعات حينئذ:

$$\overline{C^2} = \frac{(V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_N^2)}{N}$$

وبالتالي يمكن كتابة المعادلة (1-6) على هذه الصورة:

$$3F = \frac{mN}{L} \overline{C^2}$$

$$\therefore F = \frac{1}{3} \frac{mN}{L} \overline{C^2}$$

وحيث أن ضغط الغاز هو القوة المؤثرة على وحدة المساحة. أي أن:

$$P = \frac{F}{\text{area}} = \frac{F}{l^2}$$

$$\therefore P = \frac{1}{3} \cdot \frac{mN}{l^3} \cdot \overline{C^2}$$

وحيث أن $L^3 = \text{حجم الإناء } V$

$$\therefore P = \frac{1}{3} \cdot \frac{mN}{V} \cdot \overline{C^2}$$

Or

$$P.V = \frac{1}{3}.m.N.\overline{C^2} \quad (2-6)$$

وإذا اعتبرنا أن جزيئاً غرامياً واحداً من الغاز حجمه V_0 سم³ ويحتوي على N_0 (عدد أفوجادرو) من الجزيئات الحقيقية حينئذ:

$$P.V_0 = \frac{1}{3}.m.N_0.\overline{C^2} \quad (3-6)$$

ولكن

$$mN_0 = M$$

حيث M هي الوزن الجزيئي للغاز بالغرام. حينئذ تؤول المعادلة (3-6) على الشكل:

$$P.V_0 = \frac{1}{3}M\overline{C^2} \quad (4-6)$$

والمعادلة (4-6) تعطي ميكانيكية الضغط بواسطة جرام جزيئي من غاز كما تفسرها نظرية الحركة للغازات والتي تربط بين ضغط الغاز وحجمه وكتلة الجرام الجزيئي ومتوسط مربع سرعته.

4-6- قانون تساوي توزيع الطاقة للغاز المثالي

Low of Equipartition of Energy

المعادلة (3-6) يمكن وضعها على الصورة:

$$PV_0 = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{2}mN_0\overline{C^2}\right) \quad (5-6)$$

إن الكمية بين القوسين تمثل متوسط الطاقة الحركية الانتقالية (average translational kinetic energy). وباعتبار جراماً جزيئياً واحداً من غاز مثالي يتبع القانون العام للغازات نجد أن:

$$P.V_0 = R T \quad (6-6)$$

حيث R الثابت العام للغازات. وبمساواة الطرفين الأيمن للمعادلتين (5-6)،
(6-6) نحصل على:

$$\frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} m N_o \overline{C^2} \right) = R T$$

$$\therefore \frac{1}{2} m N_o \overline{C^2} = \frac{3}{2} R T$$

ومنها يمكن إيجاد متوسط الطاقة الحركية لجزيء واحد كتلته m :

$$\frac{1}{2} m \overline{C^2} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_o} T$$

وحيث أن R كمية فيزيائية ثابتة وتساوي 8.3×10^7 إرج/جزيء غرامي. درجة مطلقة وكذلك N_o والمعروف بعدد أفوغادرو (Avogadro s number) ويساوي 6.022×10^{23} جزيء/جزيء غرامي.
حينئذ:

$$\frac{R}{N_o} = \text{Constant} = k \quad (7 - 6)$$

حيث k مقدار ثابت يعرف بثابت بولتزمان (Boltzmann' s Constant) وهو عبارة عن قيمة R لجزيء واحد ويساوي 1.38×10^{-16} إرج / درجة مطلقة.

$$\therefore \frac{1}{2} m \overline{C^2} = \frac{3}{2} K T \quad (8 - 6)$$

وهذه المعادلة تمثل متوسط طاقة حركة جزيء واحد من غاز مثالي يتحرك في فراغ ذو أبعاد X, Y, Z وبالتالي يكون متوسط طاقة الحركة للجزيء في اتجاه واحد هو:

$$\frac{1}{2} K T$$

مثال (1-6):

أوجد متوسط طاقة الحركة لجزيء من غاز مثالي عند درجة حرارة 300 درجة مطلقة (درجة حرارة الغرفة).

الحل

باستخدام المعادلة (6-8) وبالتعويض عن درجة الحرارة وثابت بولتزمان نحصل على:

$$\begin{aligned} A. K. E &= \frac{3}{2} K T \\ &= \frac{3}{2} \times 1.38 \times 10^{-16} \times 300 = 6.2 \times 10^{-14} \text{ ergs} \\ &= 6.2 \times 10^{-21} \text{ joules} \end{aligned}$$

$$\text{or} \quad A. K. E = \frac{6.2 \times 10^{-14}}{1.6 \times 10^{-12}} = 0.0387 \text{ e.v}$$

حيث إن وحدة الإرج تكون كبيرة عند معالجة مواضيع الفيزياء الذرية. لذلك تؤخذ وحدة أصغر منها تسمى الإلكترون فولت (e. V) وهي تساوي:

$$e. V = 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ joules}$$

6-5- تحقيق صحة نظرية الحركة للغازات المثالية:

تبين لنا باستخدام بعض فرضيات نظرية الحركة للغازات المثالية إمكانية إيجاد معادلة الحال لجرام جزيئي من غاز مثالي على الشكل:

$$P V_o = \frac{1}{3} M \overline{C^2}$$

وسوف نستخدم فيما يلي هذه العلاقة لاستنتاج بعض القوانين الفيزيائية الهامة والتي أثبتت التجارب العملية صحتها.

6-5-1- تعيين قيمة الجذر التربيعي لمتوسط مربع السرعة لجزيئات الغاز

يتضح لنا من المعادلة (6-3) أن الضغط الناتج من جرام جزيئي واحد من غاز مثالي يمكن وضعه على الصورة:

$$P = \frac{1}{3} m \frac{N_0}{V_0} \overline{C^2} = \frac{1}{3} \rho \overline{C^2}$$

حيث أن: mN_0 هي كتلة الجزيئات الموجودة في حجم V_0 وبالتالي تصبح ρ هي كثافته

$$\therefore \overline{C^2} = 3 \frac{P}{\rho}$$

$$\text{or} \quad \sqrt{\overline{C^2}} = \sqrt{3 \frac{P}{\rho}} \text{ cm./sec.} \quad (9 - 6)$$

وهذه المعادلة تعطي قيمة الجذر التربيعي لمتوسط مربع السرعة لجزيئات غاز مثالي. ومن المعروف أن سرعة الصوت في الغاز طبقاً لا بلاس تعطي بالعلاقة:

$$V = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \text{ cm/sec} \quad (10 - 6)$$

باعتبار $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ وهي النسبة بين الحرارة النوعية عند ثبات الضغط C_P والحرارة النوعية عند ثبات الحجم C_V وتأخذ γ القيمة العددية 1,4 للجزيئات الثنائية الذرة، والقيمة العددية 1,67 للجزيئات الأحادية الذرة. وبمقارنة المعادلتين (9-6)، (10-6) وبأخذ قيمة $\gamma = 1,4$ للهواء مثلاً نجد أن:

$$\sqrt{\overline{C^2}} : V = \sqrt{\frac{3P}{\rho}} : \sqrt{\frac{1.4P}{\rho}} : \sqrt{3} : \sqrt{1.4}$$

وقد أثبتت التجارب العملية صحة هذه النسبة العددية مما يؤكد صحة الفروض الأساسية لنظرية الحركة للغازات.

6-5-2- قانون الانتشار لجراهام Graham's Law of Diffusion

ينص قانون الانتشار لجراهام على أن معدل انتشار الغازات المختلفة خلال وسط مسامي وتحت نفس الظروف لدرجة الحرارة والضغط يتناسب عكسياً مع الجذر التربيعي لكثافة هذه الغازات. فإذا اعتبرنا غازين مختلفين تحت نفس الضغط ورمزنا للغاز الأول بالرمز (1) والغاز الثاني بالرمز (2) فإننا نجد أن معدل الانتشار لكل من الغازين يتناسب طردياً مع الجذر التربيعي لمتوسط مربع السرعة لكل غاز.

أي أن

$$\begin{aligned}\sqrt{C_1^2} &= \sqrt{\frac{3P}{\rho_1}} \\ \sqrt{C_2^2} &= \sqrt{\frac{3P}{\rho_2}} \\ \sqrt{\frac{C_1^2}{C_2^2}} &= \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}\end{aligned}\quad (11 - 6)$$

وهذا يبين أنه باستخدام نظرية الحركة للغازات أمكن استنتاج قانون جراهام لانتشار الغازات نظرياً مما يدل على صحة الفروض الأساسية لنظرية الحركة للغازات.

6-5-3- قانون أفوجادرو Avogadro's Law

ينص قانون أفوجادرو على أن الجزيء الغرامي من أي غاز مثالي يحتوي على نفس العدد من الجزيئات عند نفس الظروف لدرجة الحرارة والضغط.

نعتبر جرامين جزيئيين من غازين مثاليين حجم كل منهما V_0 عند نفس درجة الحرارة والضغط. ونفرض أن الحجم من الغاز الأول يحتوي على عدد N_1 جزيء وكتلة كل جزيء هي m_1 ومتوسط مربع سرعته هي $\overline{C_1^2}$ والحجم من الغاز الثاني يحتوي على عدد N_2 جزيء وكتلة كل جزيء هي m_2 ومتوسط مربع سرعته هي $\overline{C_2^2}$ وبتطبيق المعادلة (6-3) نحصل على:

$$PV_0 = \frac{1}{3} m_1 N_1 \overline{C_1^2}$$

and

$$PV_0 = \frac{1}{3} m_2 N_2 \overline{C_2^2}$$

$$\therefore m_1 N_1 \overline{C_1^2} = m_2 N_2 \overline{C_2^2} \quad (12-6)$$

وحيث أن كلا من الغازين عند نفس درجة الحرارة تتساوي طاقتي الحركة لجزيئاتها:

$$\therefore \frac{1}{2} m_1 \overline{C_1^2} = \frac{1}{2} m_2 \overline{C_2^2} \quad (13-6)$$

وبالتعويض للمعادلة (12-6) في المعادلة (13-6) نحصل على:

$$N_1 = N_2$$

أي أن الحجمين المتساويين من الغازين المختلفين يحتويان على نفس العدد من الجزيئات (عدد أفوجادرو) وهو ما يعرف بقانون أفوجادرو. وهذا دليل آخر على صحة الفروض الأساسية لنظرية الحركة للغازات.

6-5-4- قانون دالتون للضغوط الجزئية

Dalton's Law of Partial Pressure

ينص قانون دالتون للضغوط الجزئية على أن الضغط الكلي لخليط من عدة غازات (لا تتفاعل كيميائياً) عبارة عن مجموع الضغوط الجزئية لكل منها وكأنه يشغل الحيز بمفرده.

نعتبر حجماً قدره V يحتوي على ثلاثة غازات مختلفة. ونفرض أن الغاز الأول يتكون من عدد N_1 جزيء وكتلة كل جزيء m_1 ومتوسط مربع سرعته C_1^2 والضغط الناتج عنه P_1 ، وأن هذه القيم بالنسبة للغاز الثاني هي N_2 ، m_2 ، C_2^2 ، P_2 على الترتيب. وبالنسبة للغاز الثالث هي N_3 ، m_3 ، C_3^2 ، P_3 على الترتيب. وحيث إن كل غاز سوف يتمدد ليشغل الحجم V تحت تأثير ضغطه الذاتي، فيمكن كتابة المعادلة (3-6) للغازات الثلاثة كما يلي:

$$P_1 V = \frac{1}{3} m_1 N_1 \overline{C_1^2}$$

$$P_2 V = \frac{1}{3} m_2 N_2 \overline{C_2^2}$$

$$P_3 V = \frac{1}{3} m_3 N_3 \overline{C_3^2}$$

وحيث إن الغازات الثلاثة لها نفس درجة الحرارة لذلك تتساوى طاقات حركة جزيئاتها:

$$\therefore \frac{1}{2} m_1 \overline{C_1^2} = \frac{1}{2} m_2 \overline{C_2^2} = \frac{1}{2} m_3 \overline{C_3^2} = \frac{1}{2} m \overline{C^2}$$

حينئذ:

$$(P_1 + P_2 + P_3) V = \frac{1}{3} m N \overline{C^2}$$

حيث $N = N_1 + N_2 + N_3$. لخليط الغازات

$$P V = \frac{1}{3} m N \overline{C^2}$$

حيث P هو الضغط الكلي

$$\therefore P = P_1 + P_2 + P_3$$

أي أن الضغط الكلي يساوي مجموع الضغوط الجزئية للغازات وهذا هو قانون دالتون للضغوط الجزئية مما يبين صحة الفروض الأساسية لنظرية الحركة للغازات.

6-6- خواص الغازات الحقيقية Properties Of Real Gases

يتضح لنا مما سبق أن حجم الغاز يعتمد على كل من الضغط ودرجة الحرارة.

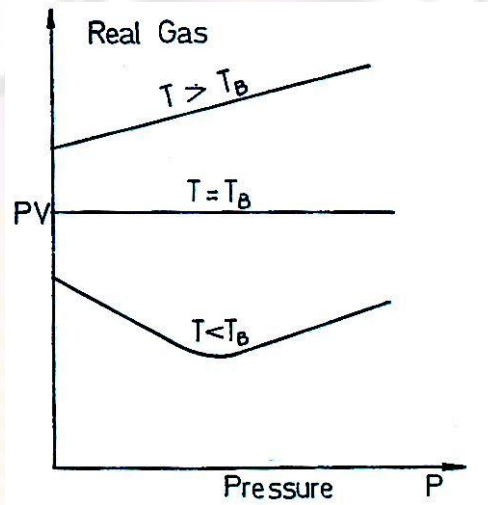
وقد وضع كل من بويل ومايوط أن حجم أي كمية معينة من غاز يتناسب عكسياً مع ضغطه عند ثبوت درجة الحرارة. أي أن:

$$P V = \text{Constant}$$

وقد سميت الغازات التي تخضع تماماً لقانون بويل في مدى الضغط كله بالغازات المثالية. والواقع أن الغاز المثالي هو غاز افتراضي لا وجود له في الطبيعة. وقد وجد عملياً أن الغازات المعروفة مثل الأكسجين والأيدروجين والنيوتروجين وغيرها لا تخضع لقانون بويل بالضبط بل تحيد عنه بنسبة ضئيلة جداً تبلغ واحداً في الألف عند درجة الحرارة والضغط المعتاد. ويزداد هذا الحيود بازدياد الضغط وانخفاض درجة الحرارة. لذلك سميت الغازات التي تحيد عن الخضوع التام لقانون بويل بالغازات الحقيقية (Real Gases).

وقد أجريت عدة تجارب عملية على عدد كبير من الغازات الحقيقية تحت مدى واسع من الضغوط وعند درجات حرارة مختلفة وتبين منها أن

حاصل الجداء $P.V$ مع ثبوت درجة الحرارة لا يكون مقداراً ثابتاً بل يعتمد على ضغط الغاز P . ويبين الشكل (6-2) تغير الكمية $P.V$ مع الضغط P في الصورة العامة التي تنطبق على جميع أنواع الغازات. ويلاحظ من الشكل ما يلي:



الشكل (6-2)

1- عند درجة حرارة معينة يصبح الغاز الحقيقي غازاً مثالياً ويتبع قانون بويل تبعية كاملة ولا يكاد يحيد عنه. وتعرف هذه الدرجة بدرجة بويل T_B (Boyle Temperature). وتعرف بأنها درجة الحرارة التي يصبح عندها الغاز الحقيقي كما لو كان غازاً مثالياً، وتختلف درجة بويل من غاز إلى آخر. وعند هذه الدرجة نجد أن الكمية $P.V$ لا تعتمد على ضغط الغاز P كما هو موضح بالمستقيم الأفقي من الشكل.

2- عند درجات حرارة أعلى من درجة بويل الخاصة بالغاز المستخدم نجد أن الكمية $P V$. تزداد بزيادة الضغط P كما هو موضح بالمنحنى العلوي من الشكل.

3- عند درجات حرارة أقل من درجة بويل الخاصة بالغاز نجد أن الكمية $P V$ تقل في البداية مع الضغط P حتى تصل إلى نهاية صغرى ثم تبدأ بعد ذلك في الزيادة التدريجية كما هو موضح بالمنحنى السفلي من الشكل. ونظراً لعدم خضوع الغازات الحقيقية لقانون بويل وبالتالي للقانون العام للغازات فقد بدا واجباً إجراء بعض التعديلات على القانون العام للغازات المثالية حتى يصبح صالحاً لاستخدامه في حالات الغازات الحقيقية. ولقد كان فاندرفال أول من قام بهذا التعديل.

6-7- معادلة فاندرفال للغازات الحقيقية

Vander Waalss Eqn for Real Gases

استخدمت عدة فرضيات حددتها نظرية الحركة للغازات حتى يمكن اشتقاق معادلة الحال للغاز المثالي في صورة مبسطة. أما في حالة إيجاد المعادلة لغاز حقيقي فإنه من الضروري اعتبار العاملين الأساسيين التاليين:

1- حقيقة وجود قوى تجاذب متبادلة بين جزيئات الغاز على أساس أنها كتلاً

مادية وبالتالي يجب الأخذ في الاعتبار قوى الجذب F التي تربط بين الجزيئات طبقاً لقانون الجذب بين الكتل المادية لنيوتن.

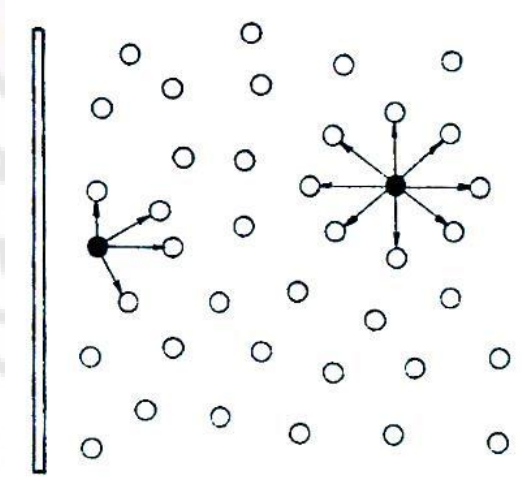
2- يجب الأخذ في الاعتبار الحجم الذي تشغله جزيئات الغاز بالنسبة لحجم الإناء الذي يحويها وذلك أيضاً على أساس كتل مادية وذات حجماً معيناً.

6-7-1 الضغط الحقيقي للغاز

إذا اعتبرنا إناء يحوي غازاً حقيقياً وأخذنا في الاعتبار قوى التجاذب المتبادلة بين جزيئات الغاز فإن نتيجة هذه القوى أن ضغط الغاز على جدران الإناء يكون أقل منه في باطن الإناء وذلك لأن الجزيء في داخل الإناء يكون متأثراً بقوى جذب من جميع الاتجاهات ولذلك تتعدم محصلة القوى المؤثرة عليه كما هو مبين بالشكل (6-3).

ولكن الجزيء المواجه لجدار الإناء يكون متأثراً بقوى جذب لها محصلة F واتجاه عمودي على جدران الإناء وتعمل إلى داخله.

ويعني هذا أن الضغط الواقع على سطح الإناء يكون أقل من الضغط الحقيقي للغاز ويكون ضغط الغاز داخل الإناء أكبر من الضغط المقاس على الجدران بمقدار يتناسب وقوى الجذب المؤثرة عند الجدران. لذلك كان من الضروري صياغة الضغط الحقيقي للغاز على الصورة: $P + F$



الشكل (6-3)

وقد تبين لفاندرفال أن محصلة قوى الجذب F تتناسب طردياً مع:

1- كثافة الغاز.

وحيث إن كثافة الغاز تتناسب طردياً مع عدد جزيئات الغاز في وحدة الحجم. أي أن:

$$F \propto \frac{N}{V}$$

حيث N تمثل عدد الجزيئات الموجودة في حجم قدره V .

2- عدد التصادمات في الثانية التي تتلقاها وحدة المساحة من سطح جدران الإناء:

حيث إن عدد التصادمات في الثانية تتوقف بدورها على عدد جزيئات الغاز في وحدة الحجم. أي أن:

$$F \propto \frac{N}{V}$$

ومن المعادلتين السابقتين حيث $N=1$ نجد أن:

$$F \propto \frac{N^2}{V^2} = \text{Constant} \cdot \frac{N^2}{V^2}$$

$$\therefore F = \frac{a}{V^2}$$

أي أنه يمكن القول بأن الضغط الحقيقي للغاز أكبر من ضغطه عند سطح الإناء بمقدار $\frac{a}{V^2}$ حيث إن a مقداراً ثابتاً يتوقف على نوع الغاز المستخدم.

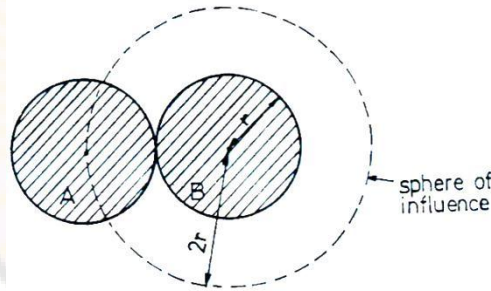
من هنا نصل إلى أن الضغط الحقيقي للغاز يجب أن يوضع على الهيئة:

$$P + \frac{a}{V^2}$$

6-7-2- الحجم الحقيقي للغاز:

الحجم الحقيقي الذي يشغله غاز موضوع في إناء هو بالطبع ليس سعة هذا الإناء كما افترضت النظرية الحركية. وذلك لأن الجزيئات عبارة عن كتل مادية وكل منها ذا حجم معين وبالتالي فإن الحجم الحقيقي للغاز هو ذلك الفراغ من الإناء الذي يتحرك خلاله جزيئات الغاز وهو يقل عن سعة الإناء ذاته بحجم مساو لحجم الجزيئات جميعها فيما لو تراكمت بجانب بعضها البعض بحيث لا تستطيع الحركة وقد وجد أن هذا الحجم من الجزيئات يساوي أربعة أمثال الحجم الحقيقي للجزيئات ويتعين ذلك مما يأتي:

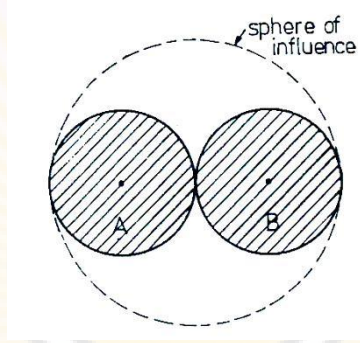
إذا اعتبرنا جزيئين A, B من غاز نقي عند لحظة التصادم كما هو مبين بالشكل (6-4) فإننا نجد أن:



الشكل (6-4)

مركز الجزيء A لا يمكن أن يقترب من مركز الجزيء B بمسافة أقل من قطر الجزيء (وذلك لتمثل جزيئات الغاز الواحد). وبالتالي يمكن لنا التصور بأن الجزيء B كما لو كان محاطاً بكرة تأثير (Sphere of Influence) نصف قطرها يساوي قطر الجزيء. ويكون الفراغ الذي يفصل كل من السطح الكروي للجزيء B وكرة التأثير هو الفراغ المحرم (Forbidden Space) لمركز الجزيء A للتواجد فيه.

ويتضح من الشكل (6-4) أن حجم كرة التأثير يساوي ثمانية أمثال حجم الجزيء الواحد أو أربعة أمثال حجم زوج من الجزيئات أثناء تلامسهما كما هو مبين بالشكل (6-5). وبأخذ جميع الجزيئات الموجودة في الإناء في مجموعات من كرات التأثير كل منهما يحتوي على زوج واحد من الجزيئات فإننا نجد أن حجم الفراغ المحرم يساوي أربعة أمثال الحجم الحقيقي للجزيئات. وبفرض أن حجم الفراغ المحرم هو b فإن الحجم الحقيقي الذي تستطيع جزيئات الغاز التحرك فيه هو $V - b$



الشكل (6-5)

حيث V يمثل حجم الإناء المحتوي على الغاز. وبناء على ذلك يمكن كتابة معادلة الحال للغاز الحقيقي كما أوضحها فاندرفال على الهيئة.

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (14 - 6)$$

حيث R هو الثابت العام للغازات، T درجة حرارة الغاز المطلقة. وتعدّ معادلة فاندرفال (14-6) من أبسط الصور لمعادلات الحال الممثلة للغازات الحقيقية وهي تستخدم في حال ما إذا كان حيود الغاز عن معادلة الحال للغاز المثالي حيوداً صغيراً.

تمارين ومسائل

1- كمية من غاز الاكسجين مقدارها 5 gr في أسطوانة حجمها 40 liter ودرجة حرارتها 27°C ، نضيف إلى الأسطوانة 2 gr من غاز الهليوم والمطلوب: حساب الضغط الذي استقر في الأسطوانة دون تغير بدرجة الحرارة.

2- لدينا كمية من الآزوت قدرها 1000 mole والمطلوب حساب مقدار الضغط الواجب تطبيقه ليشغل حجماً قدره 25 m^3 في الدرجة 37°C علماً بأن $P_c = 33.9 \times 10^{-6}\text{ N/m}^2$ ، $T_c = 126^{\circ}\text{K}$

3- احسب السرعة الوسطى $\bar{V}$ لحركة كل من الجزيئات التالية H_2 ، O_2 ، N_2 في غازاتها وذلك عند الدرجة 0°C .

4- يخضع غاز لضغط قدره $P = 10^{-6}\text{ mmHg}$ فإذا علمت أن تركيز جزيئاته (عدد الجزيئات في واحدة الحجم) $n_o = 10^9\text{ Mole/cm}^3$ والمطلوب حساب:

1- القيمة الوسطى للطاقة الحركية الإنسحابية لجزيئة واحدة من الغاز.

2- درجة حرارة الغاز.

5- توضع كمية من الآزوت قدرها 14 gr وكمية من الهليوم قدرها 30 gr ضمن أسطوانة سعتها 10 Liter والمطلوب: تعيين درجة الحرارة التي يبدأ عندها خطر انفجار الأسطوانة مع العلم أن جدرانها تتحمل ضغطاً حتى 10^7 N/m^2



الفصل السابع

مقاييس درجات الحرارة والطاقة الحرارية

Thermometers and Heat Energy

7-1- تمهيد:

نأتي بوعائين أحدهما كبير والآخر صغير، ونضع في كل منهما ماء حسب سعته وحساسين لدرجة الحرارة، نضع الوعائين تحت تأثير التسخين المتساوي خلال وقت محدد، نجد بعد فترة من التسخين أن درجة حرارة الوعاء الصغير أكثر بكثير من درجة حرارة الوعاء الكبير، مع أن كلاهما أخذ نفس الكم من التسخين أو نفس الكم من الحرارة. هذا يعني أن هناك فرقاً بين الحرارة ودرجة الحرارة، حيث أن الحرارة أو كمية الحرارة هي طاقة حرارية مثلها مثل أنواع الطاقات المعروفة ولها جملة من التأثيرات وجملة من المصادر والقوانين سوف نناقشها خلال الجزء الثاني من هذا الفصل.

إن درجات الحرارة هي مقدار عددي يعبر عن الإحساس في الزيادة أو النقصان في درجة الحرارة ومن البديهي أنه لا يمكن الاعتماد على حاسة اللمس باليد للحكم على درجة حرارة أي جسم إذ أنه لا يمكن بهذه الكيفية الحصول على قياس كمي عددي دقيق لدرجة الحرارة، كما أن استخدام اللمس لتقدير درجة الحرارة ولو بطريقة وصفية غير ممكن إلا في مدى صغير من درجات الحرارة إذ لا يصح مثلاً لمس جسم معدني متوهج أو بخار أو سائل يغلي بقصد تقدير درجة حرارة كل منهما.

7-2- مقاييس درجات الحرارة:

للحصول على تقدير كمي لدرجة الحرارة، تُستخدم خاصية فيزيائية من خواص الحرارة بحيث عندما تتغير حالة المادة المتبلورة من نوع معين من طور الصلابة إلى طور السيولة ومن طور السيولة إلى الطور الغازي فإن هذا التغير يحدث دائماً عند درجات حرارة ثابتة. وقد تم الاتفاق على اعتبار نقطة انصهار الجليد ونقطة غليان الماء النقي تحت ظروف الضغط الجوي العادي نقطتين ثابتتين عند إعداد مقاييس درجات الحرارة المختلفة والتي يطلق عليها اسم الترمومترات. ناقش هذا الموضوع كلاً من سلزيوس وفهرنهايت وريموري وكلفن وفق تدريجات معينة باستخدام أنبوب زجاجي ينتهي بمستودع يحوي مادة حساسة يوضع في مجروش الثلج وماء يغلي ويلاحظ ارتفاع وانخفاض المادة الحساسة في الحاليتين.

في تدريج سلزيوس تم اعتبار درجة انصهار الجليد هي الصفر ودرجة غليان الماء هي 100، وتقسم المسافة بينهما إلى 100 قسمًا متساوياً يسمى كل قسم منها درجة مئوية $^{\circ}\text{C}$. وسمي هذا المقياس بالمقياس المئوي أو مقياس سيلزيوس وفي التدريج الفهرنهايتي تم اعتبار درجة انصهار الجليد هي 32 ودرجة غليان الماء النقي هي 212، وتقسم المسافة بينهما إلى 180 قسمًا متساوياً يسمى كل قسم منها درجة فهرنهايتية $^{\circ}\text{F}$. وفي التدريج الريومري أو الريئوري تم اعتبار درجة انصهار الجليد هي الصفر ودرجة غليان الماء النقي هي 80، وتقسم المسافة بينهما إلى 80 قسمًا متساوياً يسمى كل قسم منها درجة ريومرية $^{\circ}\text{R}$ ، لاحظ الشكل (1-7).

خلال تلك المقاييس المختلفة هناك مبدأ فيزيائي يفيد بأن:

درجة الحرارة في مقياس ما - درجة انصهار الجليد في ذلك المقياس مقسوماً على فرق درجتي غليان الماء وانصهار الجليد في ذلك المقياس يساوي مقدراً ثابتاً. أي أن:

$$\frac{^{\circ}\text{C}-0}{100-0} = \frac{^{\circ}\text{F}-32}{212-32} = \frac{^{\circ}\text{R}-0}{80-0} = \text{Constant}$$

ولتحويل قراءة درجة الحرارة من تدرّج لآخر، نفرض أن درجة حرارة معينة قد قيست بالتدرّجات الثلاثة ورمز لها بالرمز $^{\circ}\text{C}$ ، $^{\circ}\text{F}$ ، $^{\circ}\text{R}$ في كل من التدرّج المئوي والفهرنهايتي والريموري على الترتيب، فإن هناك علاقة تساوي ثابتة.

$$\therefore \frac{^{\circ}\text{C}}{100} = \frac{^{\circ}\text{F}-32}{180} = \frac{^{\circ}\text{R}}{80} = C \quad (1-7)$$

3-7- درجات الحرارة والتدرّج الغازي المطلق

لقد سبقنا الإشارة إلى أنه للحصول على تقدير كمي لدرجة الحرارة نستخدم خاصية فيزيائية من خواص الحرارة تتغير قيمتها بتغير درجة الحرارة. نفترض أن هذه الخاصية X (ضغط أو حجم أو كثافة أو تركيز)، وأن قيمتها عند درجة انصهار الجليد X_0 وقيمتها عند درجة غليان الماء النقي هي X_{100}

∴ التغير في قيمة هذه الخاصية لدرجة مئوية واحدة = $\frac{X_{100}-X_0}{100}$ ثابت

ولنفترض أن قيمة هذه الخاصية عند درجة حرارة مجهولة t مئوية هي X_t

∴ التغير في قيمة هذه الخاصية لدرجة حرارة t مئوية = $\frac{X_t-X_0}{t}$ ثابت

وعلى ذلك فإن:

$$\therefore \frac{x_t - x_0}{t} = \frac{x_{100} - x_0}{100}$$

$$t = \frac{x_t - x_0}{x_{100} - x_0} \cdot 100 \quad (2 - 7)$$

ويمكن أن تُكتب أيضاً على الصورة:

$$x_t - x_0 = \frac{x_{100} - x_0}{100} \cdot t$$

$$x_t = x_0 + \frac{x_{100} - x_0}{100} \cdot t$$

$$x_t = x_0 + \frac{x_{100} - x_0}{100x_0} \cdot x_0 \cdot t$$

$$x_t = x_0 \left(1 + \frac{x_{100} - x_0}{100x_0} \cdot t \right) \quad (3 - 7)$$

$$\alpha = \frac{x_{100} - x_0}{100x_0} \quad \text{نفترض أن:}$$

$$\therefore x_t = x_0 (1 + \alpha t) \quad (4 - 7)$$

$$x_t = x_0 \propto \left(\frac{1}{\alpha} + t \right)$$

$$x_t = x_0 \propto (273 + t) \quad (5 - 7)$$

$$T = 273 + t \quad \text{بحيث } \frac{1}{\alpha} = 273 \text{ وإن}$$

$$\therefore x_t = x_0 \propto T \quad (6 - 7)$$

وتعرف α بمعامل زيادة الخاصية x مع درجة الحرارة.

وتختلف درجة الحرارة التي يمكن أن نحصل عليها بهذه الطريقة حسب

الخاصية الطبيعية الفيزيائية المعطاة x . ولما كان هذا الاختلاف غير مرغوب

فيه، فقد أُتفق على أن يكون ترمومتر غاز الأيدروجين عند ثبات حجمه

ترمومتراً عيارياً، وأنه يجب معايرة المقاييس المختلفة حسب الخاصية الفيزيائية

مع هذا الترمومتر العياري لتصحيح الاختلاف. وفي ترمومتر غاز الأيدروجين عند ثبوت حجمه، يتغير ضغطه مع درجة الحرارة. فإذا فرضنا أن الضغط عند درجة الصفر هو P_0 وأن الضغط في درجة 100 هو P_{100} وأن الضغط في درجة t هو P_t وأن معامل زيادة الضغط مع درجة الحرارة هو α ، وعند استخدام المعادلة (7-3)، نجد أن:

$$\begin{aligned} P_t &= P_0 \left(1 + \frac{P_{100}-P_0}{100 \cdot P_0} \cdot t \right) \\ &= P_0 (1 + \alpha t) \\ &= P_0 \propto \left(\frac{1}{\alpha} + t \right) \end{aligned}$$

وقد وجد عملياً أن قيمة α تعادل $\frac{1}{273}$ هذا يعني أن $\frac{1}{\alpha}$ تعادل 273

$$\begin{aligned} P_t &= P_0 \propto (273 + t) \\ P_t &= P_0 \propto T \end{aligned}$$

تسمى $(273+t)$ بـ T درجة الحرارة الغازية المطلقة أو درجة الحرارة المطلقة بالتدريج الغازي المقابلة للدرجة t بالمقياس المئوي وأن T_0 درجة الحرارة المطلقة المقابلة للصفر المئوية هذا يعني أن كل درجة حرارة t بمقياس سلزيوس يقابلها T بالتدريج الغازي المطلق. أي أن:

$$\begin{aligned} T &= 273 + t \\ \therefore t &= T - 273 \end{aligned}$$

يقع صفر هذا التدريج الغازي المطلق عند الدرجة $(T = 0)$ والتي

تسمى درجة الصفر المطلق، ويقابلها بمقياس سلزيوس -273 حسب المعادلة:

$$T = 273 + t = 0 \Rightarrow$$

$$\therefore t = -273^{\circ}\text{C}$$

هذا وقد اكتشف كلفن (Kelvin) تدريجيا يقوم على أسس الحرارة

الديناميكية يتفق مع التدريج الغازي المطلق سمي بتدريج كلفن $^{\circ}\text{K}$ ويقع صفر

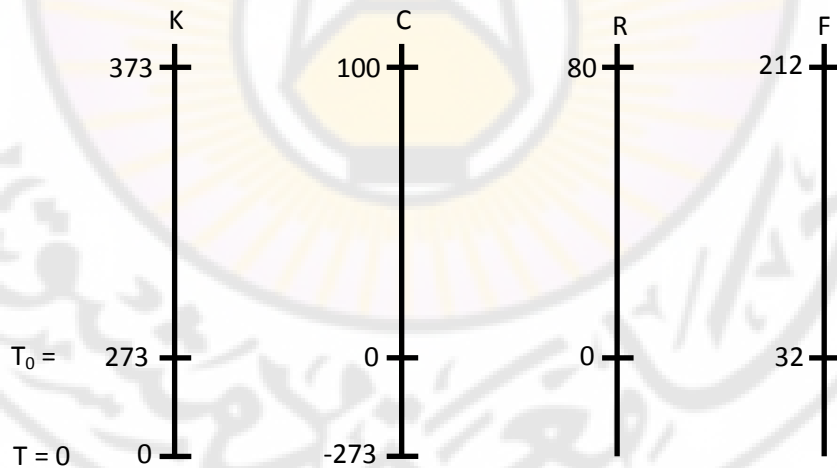
هذا التدريج عند الدرجة -273.16 بمقياس سلزيوس وتسمى درجة الصفر

المطلق ($T = 0, t = -273$). وفي كلا التدريجين تكون درجة انصهار الجليد

273.16°C ودرجة غليان الماء النقي 373.16°C . وعلى ذلك فإن العلاقة (7-1)

(1) يمكن أن تشتمل على تدريج كلفن وتصبح على الصورة:

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{100} = \frac{^{\circ}\text{F}-32}{180} = \frac{^{\circ}\text{R}}{80} = \frac{^{\circ}\text{K}-273.16}{100}$$



الشكل (7-1)

مثال (1-7):

جسم درجة حرارته ضعف درجة حرارة الإنسان السليم. كم تعادل درجة حرارة الجسم بالمقياس الفهرنهايتي؟

الحل:

درجة حرارة الانسان السليم بمقياس سلزيوس 37.5 م°.

درجة حرارة الجسم بالمقياس السلزيوس 75 م°: $(2 \times 37.5 = 75^\circ C)$.

$$\therefore \frac{C^\circ}{100} = \frac{F^\circ - 32}{180} \Rightarrow$$

$$\frac{75}{100} = \frac{F^\circ - 32}{180} \Rightarrow F - 32 = 13.5 \Rightarrow F^\circ = 13.5 + 32 = 45.5 F^\circ$$

7-4- طبيعة الحرارة والطاقة الحرارية

Nature of the Heat Energy

كان الاعتقاد قديماً بأن الحرارة عبارة عن سائل شفاف لا وزن له يتناثر مع نفسه اسمه كالوريك (caloric) ينتقل من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة. وظل هذا الاعتقاد سائداً حتى منتصف القرن التاسع عشر عندما أُعلنت نظرية بقاء الطاقة والتي تنص على أن الطاقة لا تفني و لا تستحدث وأن الحرارة هي نوع من أنواع الطاقة مثلها مثل الطاقة الميكانيكية والكيميائية والكهربائية. وقد دلت المشاهدات في ذلك الحين على إمكانية تحويل أنواع الطاقة المعروفة إلى حرارة، أي طاقة حرارية ونسميها في علم الحرارة كمية الحرارة Q أو (كمية الطاقة الحرارية Q) quantity of heat.

7-5- مصادر الطاقة الحرارية:

1- التفاعلات الكيميائية:

عندما تتحد مادتان كيميائياً ينتج عادة عن هذا التفاعل امتصاص أو انبعاث للحرارة. فالحرارة الناشئة عن احتراق المكون الكيميائي مثلاً هي في الواقع نتيجة لتفاعل كيميائي بين المادة الكيميائية وأوكسجين الهواء، أي أن بعض التفاعلات الكيميائية تُعد مصدراً من مصادر الطاقة الحرارية.

2- الطاقة الميكانيكية:

تتولد الطاقة الحرارية من الطاقة الميكانيكية إما عن طريق الاحتكاك الخارجي أو الداخلي للأجسام المتحركة أو عندما تتصادم مع بعضها.

3- الطاقة الكهربائية:

إذا أمرارنا تياراً كهربائياً في سلك مقاومة نتج عن ذلك تسخيناً مما يدل على تحويل الطاقة الكهربائية إلى حرارة أو طاقة حرارية.

4- الطاقة النووية:

تؤدي التفاعلات النووية إلى إنتاج طاقة حرارية هائلة نتيجة لتحول جزء صغير من كتلة المادة المتفاعلة إلى طاقة. وقد وضع آينشتاين العلاقة الآتية بين كتلة المادة التي تتحول والطاقة الحرة الناتجة عن ذلك.

$$\text{الطاقة المتحررة} = \text{الكتلة} \times \text{مربع سرعة الضوء}$$

5- الطاقة الشمسية:

وهي نوع من الطاقة النووية، إذ أن حرارة الشمس تنشأ نتيجة تفاعل نووي يتم فيه اتحاد ذرات الأيدروجين لتكوين ذرات هيليوم مع تحويل كتلة من المادة إلى طاقة أثناء التفاعل.

7-6- وحدة كمية الحرارة Unite of The Quantity of heat

تُسمى وحدة كمية الحرارة Q بالسعر أي الحرارة Calory ويعرف بأنه كمية من الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غرام واحد من الماء درجة مئوية واحدة من 14.5°C إلى 15.5°C . أي أن كمية الحرارة تعتمد على التغير في درجة الحرارة من t_1 إلى t_2 ونوعية المادة وكميتها

$$Q \propto t_1, t_2 \Rightarrow Q = c (t_2 - t_1)$$

حيث c تعبر عن السعة الحرارية للمادة وهي من ضمن الثوابت الفيزيائية المعروفة جدولياً وللماء النقي $c = 1$.

وبذلك تكون كمية الحرارة Q اللازمة لرفع درجة حرارة كمية من المادة m gr. من درجة $t_1^\circ\text{C}$ إلى درجة $t_2^\circ\text{C}$ هي

$$\therefore Q = m \cdot C (t_2 - t_1) \quad (7 - 7)$$

وتُعرف السعة الحرارية C لجسم ما بأنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارته درجة مئوية واحدة. فإذا فرضنا وجود كمية من الماء وأعطيناه كمية من الحرارة حتى ارتفعت درجة حرارته درجة مئوية واحدة سميت هذه الكمية من الحرارة بالمكافئ المائي للجسم Water equivalent.

تتوقف السعة الحرارية لجسم ما على طبيعته. فالغرام من النحاس له سعة حرارية تختلف عن الغرام من الحديد وهكذا. وتسمى السعة الحرارية للغرام الواحد من المادة بالحرارة النوعية لها Specific of Heat أما إذا اعتبرنا وزن غرام جزئي من المادة فإن سعته الحرارية تسمى بالحرارة الذرية. وقد وجد ديولنج وبتي أن الحرارة الذرية لمعظم المواد واحدة تقريباً في درجات الحرارة المرتفعة وتساوي في القيمة 6. أما في درجات الحرارة المنخفضة تقل

الحرارة الذرية للمادة وتقترب قيمتها من الصفر عندما تقترب درجة حرارته من درجة الصفر المطلق.

7-7- طرائق تعيين الحرارة النوعية للمواد المختلفة Calorimetry

يستخدم عادة لتعيين الحرارة النوعية لمادة ما أحد الطرائق الآتية والتي يتوقف الاختيار بينها على حالة المادة (صلبة، سائلة، أو غازية) وكذلك على الكمية التي يمكن الحصول عليها من المادة (كبيرة أو صغيرة).

1- طريقة الخلط Method of mixures

2- طريقة المسعر الجليدي

3- طريقة التبريد

4- الطريقة الكهربائية

5- طريقة التكثيف

7-7-1 تعيين الحرارة النوعية بطريقة الخلط Method of Mixtures

من المعروف أنه إذا تلامس جسمان درجة حرارتهما مختلفة انتقلت الحرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد حتى تتساوى درجتيهما. ويطلق على هذا الانتقال للحرارة بالخلط. فإذا فرضنا كتلة الجسم الأول m_1 غ ودرجة حرارته $\theta_1^\circ\text{C}$ وأن S_1 هي الحرارة النوعية لمادة الجسم. فإذا خلطنا حرارياً هذا الجسم إلى جسم آخر بأخذ كتلته m_2 غ ودرجة حرارته $\theta_2^\circ\text{C}$ وأن S_2 هي حرارته النوعية فإن الحرارة تنتقل من الجسم الساخن إلى البارد حتى تتساوى درجتيهما وتصبح $\theta^\circ\text{C}$. وبتطبيق قانون بقاء الطاقة تكون:

$$m_1 S_1 (\theta_1 - \theta) = m_2 S_2 (\theta - \theta_2) \quad (8 - 7)$$

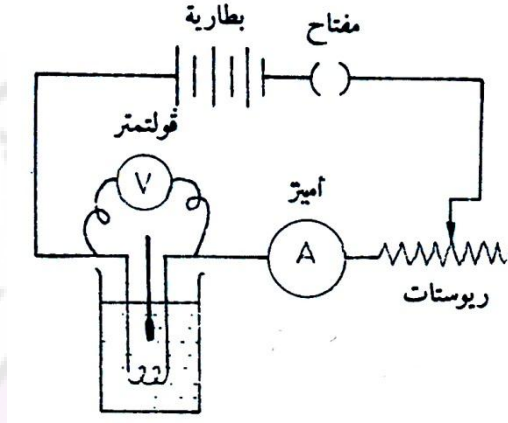
وقد أهملنا هنا كمية الحرارة المفقودة بالإشعاع للوسط المحيط بالجسمين عند خلطهما.

يمكن استخدام المعادلة السابقة لإيجاد الحرارة النوعية لجسم ما باستخدام الماء كمادة عيارية حرارتها النوعية الوحدة. وتصلح هذه الطريقة عادة في حالة الأجسام الصلبة أو السائلة ويشترط لنجاحها أن تكون السعات الحرارية لكل من الجسمين المخلوطين متقاربة وإلا كان الاختلاف في درجة الحرارة النهائية عند درجة حرارة الجسم ذو السعة الكبيرة صغيراً ويكون خطأ القياس عندئذ كبيراً.

7-7-2- الطريقة الكهربائية لتعيين الحرارة النوعية

إذا مر تيار كهربائي شدته 1 أمبير في موصل وكان فرق الجهد بين طرفيه V فولت. فإن الطاقة الكهربائية المارة في زمن t ثانية هي Vt جول (1جول = 10^7 أرج) تظهر هذه الطاقة داخل الموصل في شكل حرارة كميتهما $\frac{I V t}{J}$ سعراً حيث J هو ثابت التناسب بين الطاقة الكهربائية والطاقة الحرارية ويعرف بالمكافئ الكهربائي الحراري وسيتم ذكره فيما بعد.

تستخدم هذه الطريقة لتعيين الحرارة النوعية لمادة ما (سائل مثلاً) وذلك بتسخينه بواسطة سلك مقاومة يتصل ببطارية ومقاومة متغيرة وآمتر كما هو مبين بالشكل (7-2).



الشكل (7-2)

بإمرار التيار الكهربائي لمدة معينة t ثانية ترتفع درجة حرارة السائل بالمسعر من θ_1 إلى θ_2 وتكون الحرارة المكتسبة من المسعر ومحتوياته في الزمن t هي:

$$(m_1 S_1 + m_2 S_2)(\theta_2 - \theta_1)$$

حيث m_1 , m_2 هما كتلتي المسعر والسائل على الترتيب، S_1 , S_2 هما حرارتيهما النوعية.

وبتطبيق قانون بقاء الطاقة فإن هذه الكمية من الحرارة يجب أن تساوي الطاقة الكهربائية التي تحولت إلى حرارة داخل سلك التسخين.

أي أن

$$\frac{I.V.t}{J} = (m_1 S_1 + m_2 S_2)(\theta_2 - \theta_1) \quad (9-7)$$

وبذلك يمكن إيجاد الحرارة النوعية المجهولة S_2 بالتعويض في المعادلة بالقيم الأخرى المعروفة.

7-7-3- طريقة التكثيف لتعيين الحرارة النوعية

تعد هذه الطريقة من أدق الطرائق المستعملة لإيجاد الحرارة النوعية للمواد وتعتمد نظرية هذه الطريقة على تعليق الجسم المراد تعيين حرارته النوعية في كفة ميزان حساس بحيث يكون متديلاً في غرفة يمكن إمرار داخلها بخار ماء في درجة 100م°. يعادل أولاً وزن الجسم بالصنج (أوزان) ونفرض كتلته m_1 غ ودرجة حرارته الابتدائية $\theta^\circ\text{C}$ ثم يمرر بخار الماء في غرفة البخار فيكتسب الجسم من البخار كمية من الحرارة وترتفع درجته من الدرجة θ إلى الدرجة 100م° وتظل ثابتة وينتج عن ذلك تكثيف كتلة m غ من البخار على الجسم. فإذا عودلت كفة الميزان مرة ثانية بعد إمرار البخار لمدة كافية تكون الزيادة في وزن الجسم عبارة عن كتلة البخار المتكثف والتي استهلكت حرارتها الكامنة في رفع درجة حرارة الجسم من θ إلى 100م°. فإذا كانت الحرارة النوعية للجسم S والحرارة الكامنة لتصعيد البخار L سعر/غ فإن الحرارة المكتسبة من الجسم تساوي:

$$m_1 S (100 - \theta)$$

بينما تساوي الحرارة المفقودة من البخار $m L$ سعرا. وبمساواة الحرارة

المكتسبة بالحرارة المفقودة نحصل على المعادلة

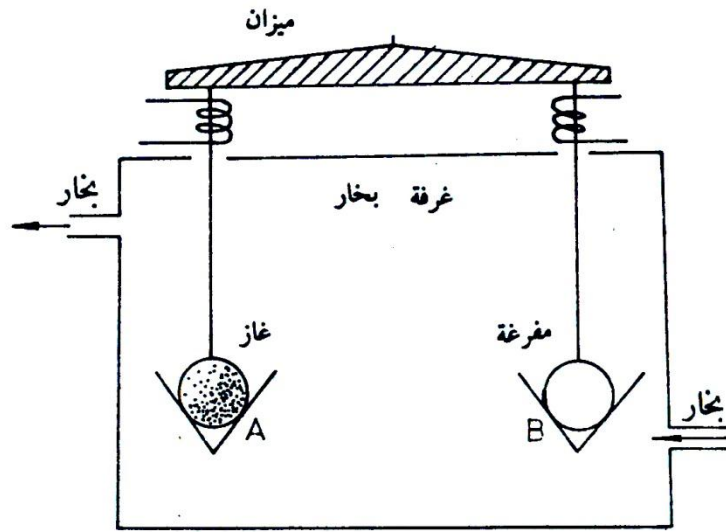
$$m L = m_1 S (100 - \theta)$$

ومنها يمكن تعيين الحرارة النوعية S للجسم بمعرفة حرارة التصعيد.

وقد استخدم جولي هذه الطريقة لتعيين الحرارة النوعية للغازات تحت حجم ثابت C_v . ويطلق على الجهاز الذي استخدمه لذلك مسعر جولي البخاري.

7-7-4- مسعر جولي البخاري Joly s Steam Calorimeter

يتركب هذا الجهاز من كرتين A, B متماثلتين ومفرغتين ومعلقتين من كفتي ميزان ويتدليان في غرفة بخار الشكل (7-3).



الشكل (7-3)

تعاذل أولاً كفتي الميزان بينما تكون الكرتان فارغتين ثم يضغط الغاز تحت الاختبار في الكرة A بضغط كبير وبتعاذل الميزان لإيجاد كتلة الغاز m_1 الذي وضع بالكرة عند إمرار البخار على الكرتين يتكثف على الكرة A بمقدار أكبر من ذلك الذي يتكثف على الكرة B بسبب وجود الغاز في A والذي يمتص هو أيضاً كمية من الحرارة تساوي

$$m_1 C_V (100 - \theta)$$

حيث C_V هي الحرارة النوعية للغاز تحت حجم ثابت، θ هي درجة حرارة الغاز الابتدائية.

إذا كانت الزيادة في وزن البخار المتكثف على (A) هي m فإن الحرارة التي فقدها البخار المتكثف هي $m L$

وتكون معادلة تساوي الحرارة المكتسبة بالحرارة المفقودة هي:

$$m L = m C_V (100 - \theta) \quad (10 - 7)$$

ومنها نوجد قيمة الحرارة النوعية للغاز C_V .

ويراعى في هذه التجربة أن يثبت بأسفل كل كرة مخروط معدني كما بالشكل ليتجمع فيه قطرات البخار المتكثف على كل كرة. ولتفادي تكثيف البخار على أسلاك تعليق الكرات بالميزان يوضع حولها ملفات تسخين يمرر بها تيار كهربائي ليرفع درجة الحرارة ويمنع تكثيف البخار عليها.

مثال (2-7):

مسعر نحاس كتلته 100 غ يحتوي على 150 غ من الماء في درجة 30م°. أسقط فيه قطعة جليد لم تجفف من الماء العالق بها فكانت درجة الحرارة النهائية بعد تقليب المخلوط 5م°، فإذا أصبحت كتلة المسعر ومحتوياته 300 غ. أوجد كتلة الماء الذي كان عالقاً بقطعة الجليد. (الحرارة الكامنة لانصهار الجليد = 80 سعر/غ).

الحل:

كتلة الجليد المبلل الذي أسقط في المسعر = 300 - 250 = 50 غ.

ويشمل ذلك كتلة الماء العالقة بالجليد عند اسقاطه.

كتلة الجليد الجاف = m

المكافئ المائي للمسعر = $10 = 100 \times 0.1$

المكافئ المائي للمسعر والماء = 150 + 10 = 160

الحرارة المفقودة = (30-5) 160

الحرارة المكتسبة من الجليد الجاف = 4000 cal = $m \times 5 + m \times 80$

الحرارة التي اكتسبها الماء الذي يبلل الجليد = $5(m=50)$

الحرارة الكلية المكتسبة = $80m + 250 = 5m + 250$

الحرارة المكتسبة = الحرارة المفقودة $4000 = 80m + 250$

∴ كتلة الجليد الجاف = $m = 46 \frac{7}{8} \text{ gm}$

وكتلة الماء الذي يبلله = $3 \frac{1}{8} \text{ gm}$

مثال (3-7):

وضع سائل متطاير في درجة الصفر المئوي في مسعر بنزن الجليدي فوجد أن كل 1 غ من السائل يتحول إلى بخار يتحرك شريط الزئبق في الأنبوبة الشعرية هو 13,9 سم، فإذا كانت مساحة المقطع الداخلي للأنبوبة الشعرية هو 2,49 مم² وكثافة الجليد عند الصفر هي 0.917 غ/سم والحرارة الكامنة للانصهار 80 سعر/غ أوجد الحرارة الكامنة لتبخير السائل المتطاير.

الحل

الزيادة في الحجم نتيجة تجمد الماء عند تطاير 1gm من السائل = $13.1 \times 2.49 \times 10^{-2} \text{ cm}^3$

كتلة الجليد المتكون نتيجة التطاير = 3.6 gm $\frac{13.1 \times 2.49 \times 10^{-2}}{\frac{1}{0.917} - 1}$

الحرارة التي فقدها الماء عند التجمد = $288 \text{ cal} = 80 \times 3.6$

هذه الحرارة هي التي اكتسبها 1gm من السائل المتطاير ليتبخر أي أن الحرارة

الكامنة لتبخير السائل = 288 cal/gm

تمارين ومسائل

- 1- ماهي درجة الحرارة التي لها القيمة نفسها على كل من التدرجتين المئوي والفهرنهايتي.
- 2- ماهي درجة الحرارة التي تكون قيمتها على التدرج المئوي ضعف قيمتها على التدرج الفهرنهايتي.
- 3- عند أية درجة يتطابق مقياسي تدرج سلزيوس مع تدرج فهرنهايت.
- 4- درجات حرارة تم قياسها بمقياس سلزيوس فكانت 30م°، 70م°، 8م° كم تعادل تلك الدرجات بمقياس ريموري وكلفن.
- 5- أسقطت قطعة من جليد كتلتها 50غ ودرجة حرارتها -10م° في إناء به ماء في درجة الصفر المئوي. أوجد كتلة الماء الذي يتجمد عليها.
($L = 80 \text{ cal / gm}$)
- 6- سخنت 30غ من البلاتين في فرن ثم أُلقيت في ماء بارد كتلته 100غ فارتفعت درجة حرارة الماء من 15م° إلى 25م°. أوجد درجة حرارة الفرن علماً بأن متوسط الحرارة النوعية للبلاتين 0.023 سعر/غ/درجة.



الفصل الثامن

الثيرموديناميك (الحرارة والتحريك) Thermodynamics

8-1- تمهيد:

درسنا في الميكانيك والحركة، أن أي جسم يتحرك بتأثير قوة ما سوف تطرأ عليه تغيرات في حالته السكونية أو الحركية ويخضع في ذلك لقوانين الحركة المختلفة وهذا يعني أننا تعاملنا مع الفعل على أساس نظري وافترضنا أن الحركة حصلت في عالم مبسط ومنظور دون أن نفكر أو نضع في الحسبان التغيرات المايكروسكوبية التي تتم فيما بين المكونات الجزيئية أو الذرية للجسم أو المحيط المادي الذي تمت فيه الحركة.

نفترض حادثة ميكانيكية معينة، سقوط جسم من منحدر أو صدماً أو قذفاً أو ما شابه ذلك ونلاحظ أننا تعاملنا مع تلك الحركات والحوادث من خلال قوانين الحركة من حيث مقدار القوة واتجاهها والسرعة وتغيراتها والتسارع ونوعيته وثقل الجسم والفعل ورد الفعل.. وكنا نتجاهل أو نهمل وبسابق معرفة للتغيرات المايكروسكوبية غير المنظورة الحاصلة من جراء تلك الحوادث، مثل التغيرات البلورية في تشكيل الجسم والتكافؤ في الطاقة بين ما أعطي وما تم اكتسابه وكنا نعزو الفاقد إلى طاقة ضائعة، كذلك كنا نتجاهل المواصفات الدقيقة للجسم من حيث طوره أو نوعيته والوسط وتأثيراته.

نظراً لأهمية الحوادث الميكانيكية الواقعية وما يترافق معها من انتشار حرارة أو امتصاص لها أو تغير في وضع الجسم ماكروسكوبياً، فقد وضع علماء الفيزياء مبادئ تربط بين العمل الميكانيكي المبذول والطاقة الحرارية التي

تنشأ ومدى قابلية تحويل أي منها للآخر اعتماداً على قوانين عدم فناء الطاقة، وقد وضعوا أسساً لعلم جديد أسموه علم التحريك الحراري أو الديناميكا الحرارية (التيرموديناميك).

من خلال المفهوم الأساسي لعلم التيرموديناميك يتبين أنه العلم الذي يربط فيما بين الطاقة الحرارية (كمية الحرارة Q) والطاقة الميكانيكية (العمل W) وتحويل أي منهما للآخر. ويعتمد هذا العلم أساساً على قانون بقاء الطاقة الذي ينص على أنه إذا حدثت تغيرات نوعية في الطاقة داخل مجموعة معزولة، فإن مجموع الطاقات المتفاعلة قبل التغيير وبعده لابد أن تتساوى.

خلال دراستنا في هذا الفصل سوف نتناول المكان أو الحيز الذي تتم فيه العمليات والذي أسموها الجملة ثم التعرف على مواصفاتها وأنواعها وأهم التحولات التيرموديناميكية والحالة التيرموديناميكية، وتوابعها ومن ثم نناقش المبدأ الأول في التيرموديناميك وتطبيقاته المختلفة.

8-2- الجملة التيرموديناميكية وأنواعها:

يُقصد بالجملة التيرموديناميكية ذلك الحيز الذي تتم فيه العمليات والتحويلات التيرموديناميكية أو يمكن تعريف الجملة التيرموديناميكية على أساس أنها سطح هندسي مغلق محدد بجدران يمكن أن تكون جدراناً عازلة أو ناقلة تقسم الفراغ من الناحية الفيزيائية إلى قسمين:

أ- ما هو داخل هذه السطوح وهو القسم الذي يحتوي المادة قيد الدراسة وهي ذات طبيعة كيميائية متغيرة وبحالات فيزيائية مختلفة (صلبة، سائلة، غازية) قابلة للتجاوب مع متغيرات الحالة.

ب- ما هو خارج هذا السطح وهو المحيط الخارجي، ويمكن أن يكون فراغاً يؤثر بطريقة غير مباشرة على ما هو داخل السطح ويمكن أن يكون مصدراً حرارياً يحيط بالجملة ويحتويها ويؤثر فيها بطريقة مباشرة أو لا مباشرة.

يمكن القول من خلال التعريف أن الجملة التيرموديناميكية يمكن أن تكون ذات أبعاد محدودة كأى جملة يتعامل معها الطالب مخبرياً (مسعراً، دورقاً، حوالة، خزاناً، أسطوانة، حافظات سوائل، حلة ضغط، إبريق....) أو ذات أبعاد غير مألوفة وذات سطح واسع لا يمكن إدراكه مثلاً: الغرفة، المدرج، المكتبة، المقصف، المنزل، الحي، المدينة، القطر، العالم، الكرة الأرضية بالنسبة للفضاء الخارجي، الجملة التي تحوي النظام الشمسي بكامله أو قد تحوي مجرة كاملة أو قد تكون الكون كله، وهكذا.

يجدر بنا أن نعرف أنه في المسألة التيرموديناميكية التي نحن بصدددها، يجب أن نحدد وبدقة الجملة الفيزيائية التي نتعامل معها ونحدد نوعية الوسط وتأثيره في ما تحويه بالجملة، لذلك لا بد من التركيز في دراستنا هنا على الجملة ذات الأبعاد المألوفة والتي نسميها الجملة المايكروسكوبية أو الجملة المخبرية أو الجملة التيرموديناميكية والتي تتحدد بجدران ذات مواصفات معروفة تحتوي على مادة معروفة الطور.

يمكن تصنيف الجمل التيرموديناميكية من حيث علاقتها بالوسط الخارجي وفق ستة أصناف:

1- الجملة المعزولة تماماً:

هي الجملة التي لا تسمح بتبادل المادة ولا تسمح بتبادل الطاقة (الحرارية والميكانيكية) مع الوسط الخارجي وهي جملة خاصة وجدرانها معزولة عزلاً تاماً مخبرية لا تتوفر إلا من الناحية النظرية.

2- الجملة المعزولة حرارياً أو الجملة الأدياباتيكية (الكظومة):

هي الجملة التي لا تسمح بتبادل المادة ولا تسمح بتبادل الطاقة الحرارية مع الوسط الخارجي وهي تملك سطحاً ذا حجم ثابت وجدرانها معزولة حرارياً تماماً وبشكل دقيق (ولو أن قضية العزل الحراري الكامل قضية مثالية إذ لا يمكن أن نعزل حيزاً عزلاً مطلقاً عن الوسط الخارجي لأن جميع المواد العازلة المتوافرة صناعياً تسمح ولو بنسبة ضئيلة بالتسرب الحراري بمرور الزمن) وتسمى مثل هذه الجملة بالجملة الكظومة أو الجملة الأدياباتيكية وكمثال معروف لدينا على هذا النوع من الجمل هو زجاجة ديوار (الترمس).

3- الجملة المغلقة:

هي الجملة التي لا تسمح بتبادل المادة لكنها قد تسمح بتبادل الطاقة مع الوسط الخارجي. مثلها كأبي جهاز منزلي (إبريق الشاي، حلة المطبخ ...) أو مخبري عادي.

4- الجملة المفتوحة:

هي الجملة التي تسمح بتبادل المادة وتبادل الطاقة مع الوسط الخارجي ومثلها كأبي جهاز فخاري متداول.

5- الجملة غير المتجانسة:

هي الجملة التي تمتلك داخلها سطوح فصل تقسم الجملة إلى أجزاء مختلفة بالمواصفات وتتغير فيها بعض المتحولات الفيزيائية وبشكل مفاجئ.

6- الجملة المتجانسة:

هي الجملة المؤلفة من طور واحد ولا تمتلك سطوح فصل بين أجزائها وقيم متحولاتها ثابتة لجميع أجزاء الجملة أو قد تكون متغيرة باستمرار.

8-3- الحالة التيرموديناميكية ومتغيراتها:

يقصد بالحالة التيرموديناميكية وضع الجملة ومواصفات ما تحويها من مادة عندما تكون في وضع ثابت. أي أن حالة الجملة تعرف من خلال الخواص الفيزيائية للجملة ككل.

هناك عدد من الكميات الفيزيائية التي تحدد حالة الجملة نسميها متحولات الحالة التيرموديناميكية أو متغيرات الحال. ويمكن تقسيمها إلى نوعين: 1- متحولات أو متغيرات قابلة للقياس آنياً وعند أي وضع من أوضاع الجملة، تعرف مثل هذه المتحولات بالكميات الأساسية التي تصف حالة الجملة في أي وقت مثل الضغط (P)، الحجم (V)، درجة الحرارة (T)، الكثافة (ρ)، التركيز (A)، الخ ونسميها متحولات أساسية.

2- متحولات غير قابلة للقياس آنياً بمعنى أنه لا يمكن تحديدها كمياً مباشرة عند أي وضع وإنما هي كميات يمكن تحديدها عند ثبات وضع الجملة (الوضع البدائي والنهائي المترنين) فقط وبطريقة غير مباشرة بمعنى أننا نستطيع تحديد الفرق الكمي لها بين وضعي الجملة البدائي والنهائي. نسمي مثل هذه

المتغيرات توابع الحالة التيرموديناميكية ومن أمثلتها التغير في الطاقة الداخلية للجملة ($\Delta u = u_2 - u_1$) التغير في الانتروبية (ΔS)، أو التغير في الانتالبية وسوف نناقش هذه الكميات الفيزيائية لاحقاً من خلال المبادئ الثلاثة في التيرموديناميك.

8-4- التوازن التيرموديناميكي:

نفترض جسماً ما في حالة سكون عن الحركة أو أن جسماً يتحرك بتسارع منتظم في كلتا الحالتين، فإن الجسم لا يطرأ عليه تغير مع الزمن لذلك نقول أن الجسم متوازن ميكانيكياً كذلك نقول أنه عندما تمزج مواد كيميائية معينة ويحدث التفاعل فيما بينها ثم يستقر الوضع نقول إن المزيج متوازن كيميائياً.

أما لو ألقينا كتلة معدنية معينة متوهجة حرارياً في إناء مغلق ومعزول فيه كمية من الماء الدافئ فإننا نلاحظ أن الكتلة المتوهجة تفقد شيئاً من حرارتها وأن الماء قد ارتفعت درجة حرارته وبمرور الزمن نلاحظ أن درجة حرارة الماء والكتلة المعدنية قد تساوت ولم يطرأ عليها أي تغير مهما مضى من الزمن مع الافتراض أن الإناء معزول عزلاً كاملاً. نقول عن الجملة (الإناء والكتلة) إنها في حالة توازن حراري.

لو ناقشنا المسألة من الناحية التيرموديناميكية واسترجعنا متغيرات الحالة التيرموديناميكية نستطيع القول إن التوازن التيرموديناميكي هو الوضع الذي تبقى فيه متغيرات الحالة (الضغط، الحجم، درجة الحرارة، الكثافة، التركيز، ... الخ) دون تغير مع الزمن. إن موضوع التوازن التيرموديناميكي هو عملية

نسبية وغالباً ما تكون الجملة متزنة في وضعها البدائي وفي وضعها النهائي بعد استقرار وضعها الفيزيائي.

8-5- أنواع التحولات التيرموديناميكية:

التحول التيرموديناميكي معناه انتقال الجملة التيرموديناميكية من حالة ذات مواصفات معينة إلى وضع آخر ذي مواصفات مغايرة إما من حيث الضغط أو الحجم أو درجة الحرارة أو كمية الحرارة وتسمى عملية الانتقال هذه تحولاً تيرموديناميكياً. ونستطيع أن نميز عدة أنواع من التحولات حسب ثبات أحد متغيرات الحالة، (الضغط أو الحجم أو درجة الحرارة).

1- التحول متساوي الدرجة Isotherm:

نقول عن تحول تيرموديناميكي إنه تحول متساوي الدرجة إذا انتقلت الجملة من وضع متوازن معين إلى وضع آخر متوازن دون أن تتغير درجة حرارة الجملة.

هذا التحول يمكن الحصول عليه إذا تم تأمين تدفق حراري للجملة بإحاطة الجملة بمستودع حراري ثابت، مثلاً حمام مائي.

2- التحول متساوي الضغط Isobar:

وهو تحول تنتقل فيه الجملة من حالة متوازنة معينة إلى حالة أخرى متوازنة دون أن يتغير ضغط الجملة وكمثال نذكر عملية تمدد غاز موضوع في أسطوانة تحت الضغط الجوي، أو عملية تثبيت مكبس الأسطوانة بوضع ثقل معين عليه ومن ثم متابعة التحول في الجملة. أو عملية انطلاق الغازات من التفاعلات الكيميائية، أو عملية التبخر من الأوعية المفتوحة.

3- التحول متساوي الحجم Isochor:

وفيه تنتقل الجملة التيرموديناميكية من وضع متزن معين إلى وضع آخر متزن دون أن يتغير الحجم ومثال على ذلك عملية احتراق مادة عضوية داخل أسطوانة صغيرة محكمة الإغلاق (قنبلة مسعرية).

4- التحول الكظوم Adiabatic:

وفيه تنتقل الجملة من حالة متزنة إلى حالة أخرى متزنة دون أن تتبادل الجملة خلاله أية طاقة حرارية مع الوسط الخارجي ومثال ذلك عملية تمدد الغاز أو انضغاطه ضمن وعاء معزول حرارياً عزلاً جيداً.

5- التحول المغلق (دورة) Cycle:

إذا نفذت الجملة التيرموديناميكية تحولاً أو سلسلة من التحولات من مرحلة متوازنة ابتدائية إلى مرحلة متوازنة نهائية بحيث تنطبق مواصفات الحالة النهائية تماماً على مواصفات الحالة الابتدائية. وهنا يمكن أن يجري على الجملة سلسلة من التحولات تعود بعدها الجملة إلى وضعها الابتدائي المتزن. يسمى هذا التحول الدورة أو التحول المغلق أو التحول الدوري.

8-6- المفاهيم الأساسية في قوانين التيرموديناميك:

هناك مفاهيم أساسية في الفيزياء لكثير من الكميات الميكانيكية سوف تتكرر في علم التيرموديناميك ويبقى لها طبعاً التعريف نفسه والعلاقة نفسها وإنما من وجهة نظر ميكانيكية وحرارية في آن واحد.

8-6-1- الطاقة الميكانيكية والعمل:

الطاقة من الناحية الفيزيائية هي القدرة على إحداث عمل، حيث إن طاقة أي جسم مادي تتكون من:

أ- الطاقة الحركية Kinetic Energy (E_k) وهي تمثل قدرة مجموع مكونات الجسم (جزيئات، ذرات، شوارد) على الحركة وتغيير وضعها السكوني أو حركتها المنتظمة.

ب- الطاقة الكامنة Potential Energy (E_p) وهي طاقة يمتلكها الجسم بفصل موضعه في حقل قوى خارجية، وتتناسب قيمتها مع شدة الحقل.

ت- الطاقة الذاتية Intrinsic Energy (E_I) وهي تمثل الطاقة الناجمة عن قوى التأثير التجاذبي المتبادلة بين الجسيمات المكونة للجسم وهي تتعلق بكل من كتلة الجسم ودرجة حرارته.

نشير هنا من الناحية الفيزيائية إلى أن مجموع الطاقتين الحركية والكامنة تعبر عن الطاقة الميكانيكية التي تفسر مدى قابلية الجسم على الحركة إذ أن كلا منهما قابل للتحويل للآخر حيث إنه بمجرد الحركة شاقولياً قذفاً إلى الأعلى تبدأ الطاقة الحركية بالتناقص على حساب الطاقة الكامنة التي تتزايد ويحدث العكس عند السقوط الحر ويبقى دائماً مجموع كلتا الطاقتين الحركية والكامنة ثابتاً لجسم معين.

من ناحية أخرى فإن مجموع الطاقات الحركية E_k والكامنة E_p والذاتية E_I تسمى فيزيائياً الطاقة الكلية Total Energy للجسم (E_T).

تعتبر الطاقة الكلية E_T للجملة عن الطاقة الداخلية u (Internal Energy) وهي ما تملكه الجملة من قدرة على إنجاز عمل وهي كمية مصنونة للجملة لا يمكن تعيينها مباشرة وبأي وضع من أوضاع الجملة إلا في حالتها الاستقرار أو التوازن البدائي والحالة النهائية المستقرة للجملة التيرموديناميكية، وقد تكلمنا عن الطاقة الداخلية وذكرنا أنها تابع من توابع الحالة التيرموديناميكية وليست من متغيراتها أو متحولاتها الأساسية إذا أن الطاقة الكلية للجملة والتي هي الطاقة الداخلية لها مقدار كمي يتعين من خلال الفرق في الطاقة الكلية بين وضعي الجملة النهائي والبدائي المتوازنين $(\Delta u = u_2 - u_1)$ ولا تتعلق قيمتها بالطريق الذي تسلكه الجملة، وهذا ما سنناقشه في فقرات هذا الفصل.

8-6-2- الطاقة الحرارية والعمل:

تعرفنا على الطاقة الحرارية من خلال الفصل السابق وذكرنا أن الطاقة الحرارية هي كمية الحرارة (Q) والتي تعتمد على نوعية الجسم وكتلته والتغير في درجة حرارته أي أن: $Q = m c \Delta t$. من الناحية التيرموديناميكية واعتماداً على مبدأ مصونية الطاقة، فإن الطاقة الحرارية للجملة التيرموديناميكية هي كمية الحرارة المكتسبة للجملة من الوسط الخارجي أو كمية الحرارة التي تخسرها الجملة لتعطيها للوسط الخارجي على شكل ما من أشكال الطاقة.

الجملة التيرموديناميكية حين تنتقل من وضع لآخر نتيجة تحول ما فإنها تحتاج إلى قدرة تحول إن كانت طاقتها الحرارية لا تكفي وهذه القدر تعطى لها من الوسط الخارجي على شكل عمل لإنجاز هذا التحول. أو أن تقوم الجملة

بإعطاء عمل للوسط الخارجي نتيجة الطاقة الحرارية التي امتصها لإنجاز هذا التحول. نستنتج من ذلك أن العمل (W) والطاقة الحرارية (Q) طريقان متكافئان تتحول الجملة خلالهما من حالة تيرموديناميكية إلى أخرى.

العمل فيزيائياً هو طاقة ميكانيكية وهذا يعني أنه خلال جملة تيرموديناميكية فإن الطاقة الحرارية والطاقة الميكانيكية هما اللتان تؤديان لتحول الجملة على حساب طاقتها الداخلية، حيث أنه إذا تم تحويل كمية من الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حرارية داخل جملة معزولة فإنه يوجد تناسب بين هذه الطاقات. يسمى ثابت التناسب هذا معامل جول (المكافئ الميكانيكي الحراري) وتقدر قيمته بـ 4.18 جول/حريرة. يسمى هذا القانون الذي يُعبر عن العلاقة بين العمل الميكانيكي والطاقة الحرارية بقانون جول ($W=J.Q$) وقد درسه الطالب خلال المراحل الدراسية السابقة.

8-7- المبدأ الأول في التيرموديناميك:

يعد المبدأ الأول في التيرموديناميك الخطوة الأولى التي استطاعت تنظيم العلاقة بين الطاقة الحرارية (Q) والطاقة الميكانيكية (W) اعتماداً على مبدأ مصونية الطاقة، الذي ينص على أنه إذا حدثت أي تغيرات نوعية في الطاقة داخل مجموعة معزولة فإن مجموعة الطاقات قبل حدوث التغير وبعده لا بد أن تتساوى.

بما أن الجملة التيرموديناميكية تمتلك في وضع توازنها البدائي طاقة داخلية معينة فإذا أردنا لهذه الجملة أن تتحول إلى وضع توازن جديد فإن ذلك يتطلب إعطاءها كمّاً من الطاقة الحرارية لتؤدي دور التحول وهذا الكم من

الطاقة الحرارية قد اكتسبته الجملة وجعلتها قادرة على امتلاك قدرة التغير والتحول، وتظهر هذه القدرة على شكل طاقة ميكانيكية تعطىها للوسط الخارجي ليبقى مبدأ مصونية الطاقة محققاً.

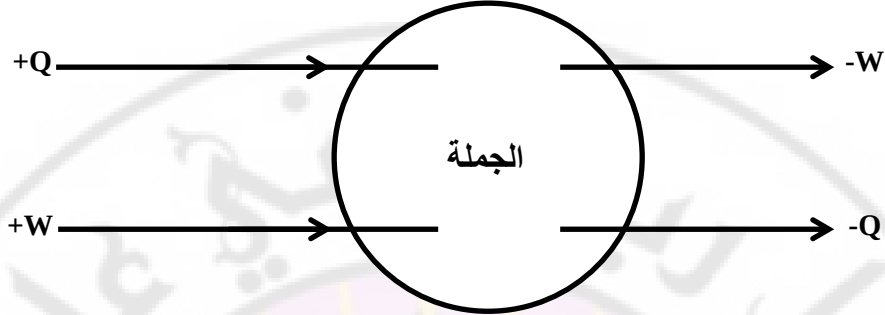
نفترض جملة تيرموديناميكية معزولة حرارياً طاقتها الداخلية في وضع توازنها البدائي (u_1) تأخذ هذه الجملة كمية من الحرارة (Q) وبالتالي سوف تعطي الوسط الخارجي عملاً (W) منتقلة بذلك إلى وضع توازن جديد تكون فيه الطاقة الداخلية للجملة (u_2).

وتدل التجربة على أنه مهما كان الطريق أو الوسيلة التي تم فيها التحول فإن فرق الطاقة الداخلية بين الوضعين المتوازنين النهائي والبدائي ($\Delta u = u_2 - u_1$) يعادل تماماً الفرق بين كمية الحرارة التي أخذتها الجملة (Q) من الوسط الخارجي (طاقة مكتسبة) وكمية العمل (W) الذي أعطته الجملة للوسط الخارجي (طاقة معطاة) وهذا يعني أن:

$$u_2 - u_1 = Q - W \Rightarrow \Delta u = Q - W \quad (1 - 8)$$

هذا هو مضمون المبدأ الأول في التيرموديناميك. واضعين في الحسبان الآتي:

- 1- يجب أن تكون واحدات طرفي المعادلة متماثلة.
- 2- كمية الحرارة Q تكون موجبة في حالة إعطائها للجملة وسالبة في حالة إعطاء الجملة لها للوسط الخارجي.
- 3- العمل W نعهه سالباً في حالة انتقاله من الجملة للوسط وموجباً في حالة بذله على الجملة من الوسط الخارجي كما هو واضح من الشكل (1-8).



الشكل (8-1)

8-8- تطبيق المبدأ الأول على الجمل التيرموديناميكية المختلفة:

يعد المبدأ الأول في التيرموديناميك ($\Delta u = Q - W$) أساس تحليل حالة الجمل والتحويلات المختلفة وهو محقق دوماً مهما كانت نوعية الجملة أو نوعية التحول.

$$\Delta u = Q - W$$

1- حالة الجملة المعزولة تماماً:

من خلال التعريف فإن الجملة المعزولة لا تسمح بتبادل المادة و(لا تسمح بتبادل الطاقة) وهذا يعني أن الجملة لا تتبادل مع الوسط أي نوع من أنواع الطاقة وهنا يكون: $Q = 0$ و $W = 0$

$$\therefore \left. \begin{matrix} Q = 0 \\ W = 0 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \Delta u = 0 \Rightarrow u_1 = u_2 \quad (2-8)$$

2- حالة الجملة المعزولة حرارياً (الظومة):

وهي الحالة التي لا تسمح بتبادل المادة ولا تسمح بتبادل الطاقة الحرارية ($Q=0$)، هذا يعني أن الجملة يحصل بداخلها تغيرات مع ثبوت كمية الحرارة (لا تتبادل طاقة حرارية) أي تتبادل العمل على حساب طاقتها الداخلية.

$$Q = 0 \Rightarrow \Delta u = 0 - W$$

$$\therefore \Delta u = -W \quad (3 - 8)$$

3- حالة الجملة المغلقة:

بما أن الجملة المغلقة لا تسمح بتبادل المادة و(تسمح بتبادل الطاقة)، فإن هذا يعني أن هناك تبادل طاقة حرارية (Q) وعملاً (W) مع الوسط الخارجي. وحيث أن الجملة تحتفظ بما تملكه من مادة دون تغيير في درجة حرارتها فإن طاقتها الداخلية لا تتغير. أي أن: $\Delta u = 0$

$$\begin{aligned} 0 &= Q - W \\ \therefore Q &= W \end{aligned} \quad (4 - 8)$$

4- حالة الجملة المفتوحة:

بما أن الجلة المفتوحة تسمح بتبادل المادة وتسمح بتبادل الطاقة، فإن هذا يعني أن الجملة المفتوحة تعبر عن الصيغة العامة للمبدأ أي أن:

$$\Delta u = Q - W \quad (5 - 8)$$

8-9- تطبيق المبدأ الأول على التحولات التيرموديناميكية المختلفة:

1- حالة التحول متساوي الدرجة (الأيزوثيرم):

ينتج عن التحول المتساوي الدرجة، أن التحول التيرموديناميكي قد تم بثبات درجة الحرارة وهذا يعني أن الجملة خلال مرحلة التحول لم تتهيج حرارياً وبالتالي فإن طاقتها الداخلية بقيت دون تغيير ($\Delta u = 0$) وحيث أن الجملة قد انتقلت من حالة متوازنة إلى حالة أخرى متوازنة فإن هذا يعني أن كل الطاقة الحرارية المقدمة قد تحولت إلى عمل للتغلب على القوى الخارجية أي أن:

$$\therefore \Delta u = 0 \Rightarrow 0 = Q_T - W_T \Rightarrow Q_T = W_T = \text{Const.}$$

هذا يعني أن الطاقة الحرارية بثبات درجة الحرارة Q_T تساوي تماماً العمل الميكانيكي بثبات درجة الحرارة W_T ، وسوف نشق أحدهم. نفترض أن مادة الجزمة غاز مثالي لذلك فإن عملية التحول متساوية الدرجة يحقق القانون العام للغازات المثالية:

$$\therefore p \cdot v = n R T \Rightarrow P = \frac{n R T}{v}$$

$$(p \cdot v)_{T=c} = W_T \Rightarrow$$

$$dW_T = p \, dv$$

$$\therefore W_T = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv$$

$$\begin{aligned} \therefore W_T &= \int_{v_1}^{v_2} n R T \frac{dv}{v} \\ &= n R T \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} \\ &= n R T \ln v \Big|_{v_1}^{v_2} \\ &= n R T \ln v_2 - \ln v_1 \\ &= n R T \ln \frac{v_2}{v_1} \end{aligned}$$

$$\therefore Q_T = W_T = n R T \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (6 - 8)$$

بما أن الضغط متناسب عكساً مع الحجم فإنه بالأسلوب ذاته يكون:

$$Q_T = W_T = n R T \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (7 - 8)$$

ويعني هذا أنه للمحافظة على ثبات درجة الحرارة عند تمدد الغاز فإنه من الضروري أن نعطي للجزمة كمية من الحرارة تعادل العمل الناتج عن عملية التمدد.

2- حالة التحول متساوي الضغط (الآيزوبار):

نفترض جملة غازية على شكل أسطوانة بمكبس، نستطيع من خلاله تثبيت الضغط عند وضع محدد. في تلك الحالة فإن كمية الحرارة المقدمة للجملة تُستهلك بطريقتين، أحدهما يعمل لزيادة الطاقة الحركية للجملة أي زيادة حركة الجزيئات الغازية داخل المكبس نتيجة لرفع درجة حرارتها، والآخر يعمل على المحافظة على وضع المكبس عند ضغط ثابت.

نحسب كل من Q و W ونعوض في المبدأ الأول.

وحيث أن كمية الحرارة اللازمة لتغيير درجة حرارة غرام واحد من الغاز درجة مئوية واحدة تحت ضغط ثابت تعبر عن الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت ويرمز لها C_p فإنه يكون:

$$C_p = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p$$

$$\therefore dQ_p = C_p dT$$

$$Q_p = C_p \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\therefore Q_p = C_p (T_2 - T_1) \quad (8 - 8)$$

$$w_p = \int_{v_1}^{v_2} p dv \Rightarrow$$

$$w_p = P \int_{v_1}^{v_2} dv$$

$$\therefore w_p = p(v_2 - v_1) \quad (9 - 8)$$

من خلال قيمتي كمية الحرارة Q_p والعمل w_p بثبات الضغط فإن المبدأ الأول يصبح من الشكل:

$$\Delta u = C_p (T_2 - T_1) - p(v_2 - v_1) \quad (10 - 8)$$

3- حالة التحول متساوي الحجم (آيزوشور):

نفترض جملة غازية مجهزة بمكبس كما ورد في الفقرة السابقة وإنما مع بقاء حجم الأسطوانة ثابتاً هذا يعني أن كمية الحرارة Q المقدمة للجملة تتحول إلى طاقة حركية مسببة رفع درجة حرارة المكبس:

$$C_v = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_v \Rightarrow dQ_v = C_v dT$$

$$\therefore Q_v = C_v (T_2 - T_1) \quad (11 - 8)$$

وحيث أن حجم الجملة يبقى ثابتاً فإن الجملة لن تقوم بأي عمل لأن كل الطاقة الحرارية المقدمة قد تحولت إلى طاقة حركية لرفع درجة حرارة الجملة ويعني هذا أن العمل عند ثبات الحجم ($dv = 0$) يكون معدوماً:
إذا ثبت الحجم انعدم العمل.

$$w_v = 0 \quad (12 - 8)$$

نعوض كلاً من (Q_v) و (W_v) بالمبدأ الأول ويصبح على الشكل:

$$\Delta u = C_v(T_2 - T_1) - 0$$

$$\therefore \Delta u = C_v (T_2 - T_1) \quad (13 - 8)$$

4- حالة التحول الكظوم (أدياباتيك):

في حالة التحول الكظوم فإن الجملة تنتقل من وضع متوازن لآخر دون أن تتبادل طاقة حرارية مع الوسط:

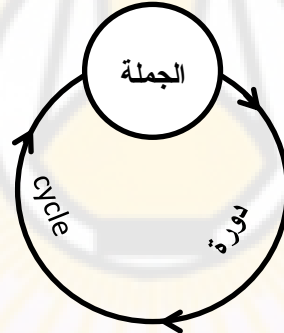
$$\left. \begin{array}{l} Q = 0 \\ W = p \cdot \Delta v \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta u = -W$$

$$\begin{aligned}\Delta u &= -p\Delta v \\ \therefore \Delta u &= -p(v_2 - v_1) \\ \Delta u &= p(v_1 - v_2) \quad (14 - 8)\end{aligned}$$

5- حالة التحول المغلق (دورة):

في حالة التحول المغلق تنتقل من وضع متوازن ابتدائي معين إلى وضع متوازن نهائي بحيث تكون مواصفات الوضع النهائي مطابقة تماماً للوضع البدائي بعد تحول أو سلسلة من التحولات. هذا يعني أن التغير في الطاقة الداخلية للجملة معدوم لأن $u_1 = u_2$

$$\begin{aligned}\Delta u &= 0 \\ 0 &= Q - W \\ \therefore Q &= W \quad (15 - 8)\end{aligned}$$



الشكل (8-2)

8-10- علاقة العمل بالطريق الذي تسلكه الجملة:

درسنا في فصل سابق العمليات الميكانيكية والقوانين التي تحدد نوعية الحركة، نفترض جسماً ما أردنا نقله من الأرض إلى الطابق الثالث من بناء، من الناحية الميكانيكية، يمكن لعملية النقل أن تتم بأحد طريقتين:

أ- الطريق المباشر: أن يتم النقل بواسطة حبل يمر على بكرة بعد بذل عمل معين.

ب- الطريق غير المباشر: أن يتم نقل الجسم حملاً على الأكتاف من خلال سلم البناء.

نترك للطالب تقدير العمل المبذول من الناحية الميكانيكية خلال كل من الطريقين ليتبين ما إذا كان العمل المبذول يعتمد على الطريق الذي نسلكه لنقل الجسم أم لا.

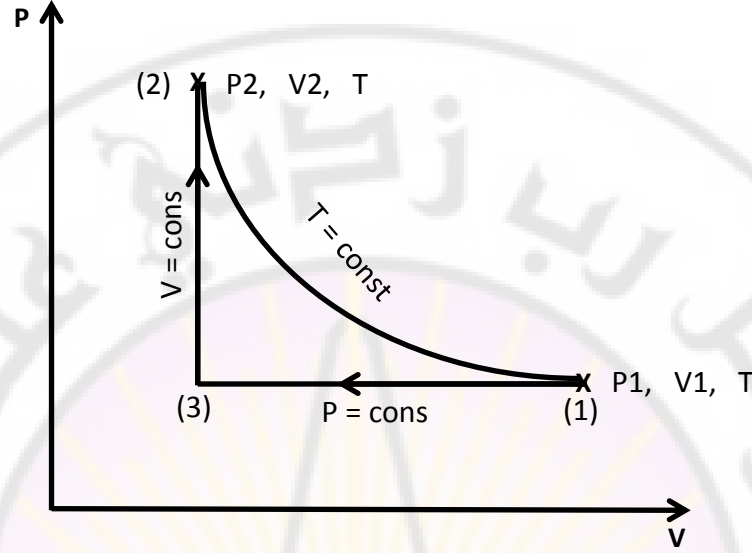
نفترض جملة تيرموديناميكية في وضع توازن معين (1)، متغيراتها الأساسية (p_1, v_1, T) حسب الشكل (3-8) نريد نقلها إلى الوضع المتزن (2) متغيراتها (p_2, v_2, T) .

نلاحظ من الشكل أن الجملة يمكن أن تسلك أحد طريقين. إما الطريق المباشر من (1) إلى (2) أو الطريق غير المباشر ماراً بوضع متوازن بيني من (1) إلى (3) إلى (2).

والمطلوب إيجاد علاقة العمل خلال الطريقين الذي تسلكه الجملة وهل هو متساو؟

1- الطريق المباشر:

لو انتقلت الجملة من (1) إلى (2) مباشرة هذا يعني أن الجملة قد سلكت تحولاً متساوي الدرجة حسب بويل وماريوط: عندها يكون العمل $w_1 = w_T$



الشكل (8-3).

حسب بويل ومايوط فإن:

$$(p \cdot v)_T = (p_1 \cdot v_1)_T = (p_2 \cdot v_2)_T = \text{Const.} = n R T$$

$$\therefore p \cdot v = n R T \Rightarrow p = \frac{n R T}{v}$$

$$w_1 = w_T = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv \quad (16 - 8)$$

نعوض في (16-8)

$$w_1 = w_T = n R T \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} \Rightarrow$$

$$\therefore w_1 = w_T = n R T \ln \frac{v_2}{v_1} = n R T \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (17 - 8)$$

2- الطريق غير المباشر:

نفترض أن الجملة قد انتقلت من الحالة (1) إلى الحالة (2) بطريقة غير

مباشرة، هذا يعني أن الجملة قد انتقلت عبر تحول مركب (تحولين متوازنين

متتاليين) مكون من:

أ- تحول متساوي الضغط، فيكون العمل المنجز خلال هذا التحول (w_p) ولما كان حجم الجملة قد تغير من v_1 إلى v_2 وبقي ضغط الجملة ثابتاً ومساوياً p_1 فإنه يكون:

$$w_p = \int_{v_1}^{v_2} p_1 dv$$

$$\therefore w_p = p_1(v_2 - v_1) \quad (18 - 8)$$

ب- تحول متساوي الحجم، ومن المعروف تيرموديناميكياً أن العمل في التحول المتساوي الحجم معدوم.

$$\therefore w_v = 0 \quad (19 - 8)$$

من خلال (أ) و(ب) نستنتج أن العمل المنجز خلال التحول غير المباشر هو حاصل جمع المعادلتين (18-8) و (19-8) أي:

$$w_{II} = w_p + w_v$$

$$\therefore w_{II} = p_1(v_2 - v_1) \quad (20 - 8)$$

بمقارنة المعادلتين (17-8) و (20-8) نجد أن العمل بالطريق المباشر لا يساوي العمل بالطريق غير المباشر أي أن: $w_I \neq w_{II}$ نستنتج أن تغير الطريق يؤدي تغير العمل أي أن العمل المنجز تيرموديناميكياً يعتمد على الطريق الذي تسلكه الجملة.

8-11- إيجاد علاقة C_p و C_v خلال جملة تيرموديناميكية:

من المعروف أن رفع درجة حرارة أية جملة غازية يؤدي إلى تغير كل من حجمها وضغطها. نفترض 1 مولاً من غاز داخل جملة على شكل أسطوانة تنتهي بمكبس، إن كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 مولاً درجة مئوية واحدة تحت حجم ثابت نسميها الحرارة النوعية تحت حجم ثابت (C_v).

كذلك فإن كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 مولاً درجة مئوية واحدة تحت ضغط ثابت تعبر عن الحرارة النوعية للغاز تحت ضغط ثابت (C_p) .
أي أن:

$$\left. \begin{aligned} C_v &= \left(\frac{dQ}{dT} \right)_v \\ C_p &= \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} dQ_v &= C_v dT \\ dQ_p &= C_p dT \end{aligned} \quad (21 - 8)$$

لإيجاد العلاقة بين C_p و C_v من خلال المبدأ الأول في التيرموديناميك نتبع الخطوات التالية:

1- نفترض أننا حافظنا على ثبات حجم الأسطوانة بوضع المكبس عند وضع معين وأعطينا الجملة كمية من الحرارة تكفي لرفع درجة حرارتها درجة مئوية واحدة. فإن كمية الحرارة هذه سوف تستخدمها الجملة لرفع طاقة حركة الجزيئات الغازية وبذلك يزداد الضغط ويكون العمل المنجز معدوماً:

$$\begin{aligned} du &= dQ_v - dW_v \\ du &= dQ_v - 0 \end{aligned}$$

$$\therefore du = C_v dT \quad (22 - 8)$$

2- نفترض أننا حافظنا على ثبات الضغط بجعل المكبس حر الحركة وأعطينا الجملة كمية من الحرارة تكفي لرفع درجة حرارتها درجة مئوية واحدة، نجد أن كمية الحرارة هذه قد استخدمت في شكلين أولهما استخدم لرفع طاقة

حركة جزيئات الغاز والآخر على شكل عمل يقوم بدفع المكبس للإبقاء على ثبات الضغط، أي أن:

$$du = (dQ - dW)_p \Rightarrow du = dQ_p - dW_p$$

$$\therefore dQ_p = du + dw_p \quad (23 - 8)$$

وأن $w_p = p \cdot dv$ قد بذل من الجملة

نعوض (21-8) و (22-8) في المعادلة (23-8) آخذين بالاعتبار أن:

$$dw_p = p \cdot dv = R dT$$

$$\therefore C_p dT = C_v dT + p dv \Rightarrow (C_p - C_v) dT = p dv = R dT$$

$$\therefore (C_p - C_v) dT = R dT$$

وبمكاملة الطرفين وحذف T لأن الزيادة هي درجة مئوية واحدة يكون:

$$C_p - C_v = R \quad (24 - 8)$$

هذا يعني فيزيائياً أن الفرق بين الحرارتين النوعيتين C_p و C_v يساوي مقداراً يعادل قيمة ثابت الغازات R وقد أثبتنا مسبقاً أن ثابت الغازات R له معنى طاقى أي أنه يعبر عن طاقة وحرصاً على عدم الالتباس في الواحدات في طرفي العلاقة (24-8) حيث أن كلا من C_p و C_v هو كميات حرارة وواحداتها واحداث طاقة حرارية (حريرة) وأن R يعبر عن طاقة ميكانيكية وواحداتها الجول فإنه من الأفضل أن نستخدم المكافئ الحراري الميكانيكي J ونكتب:

$$\therefore (C_p - C_v) = \frac{R}{J} \quad (25 - 8)$$

هذا يعني أن ثابت الغازات R يساوي الفرق بين الحرارتين النوعيتين

للغاز تحت ضغط وحجم ثابتين وحيث أن: $C_p > C_v \Leftarrow R > 0$

8-12- معادلة الحالة للغاز المثالي في التحول الكظوم:

عرفنا التحول الكظوم بأنه تحول تيرموكوديناميكي يتم دون أن تتبادل

الجملة أي كمية حرارية مع الوسط الخارجي أي:

$$\therefore dQ = 0 \Rightarrow du = -dw \quad (26 - 8)$$

إن إشارة الناقص للعمل تعني من الناحية التيرموكوديناميكية، أن تمدد

الغاز يترافق مع تناقص في طاقته الداخلية، أي أن الجملة تقدم عملاً على

حساب طاقة مكوناتها أي على حساب طاقتها الداخلية للحفاظ على ثبات الضغط،

وأن تلك الطاقة الداخلية تزداد عندما تتم زيادة الضغط.

يتبين مما سبق أن التحول الكظوم يتم خلال جملة معزولة حرارياً وأن

الطاقة الداخلية العنصرية للجملة (du) تعتمد على الحرارة النوعية للغاز تحت

حجم ثابت أي:

$$\therefore du = C_v dT \quad (27 - 8)$$

وأن تلك الطاقة سوف تخسرها الجملة أو تعطيها للحفاظ على ثبات الضغط على

شكل عمل ميكانيكي أي:

$$d w = p . dv \quad (28 - 8)$$

نعوض المعادلتين (27-8) و (28-8) بالمعادلة (26-8) فيكون:

$$C_v dT = -p dv$$

ولكن من معادلة الحالة للغاز المثالي ومن أجل 1 مولاً لدينا:

$$pv = R T \Rightarrow p = \frac{R T}{v}$$

$$\therefore C_v dT = -R T \frac{dv}{v} \Rightarrow$$

$$C_v \frac{dT}{T} = -R \frac{dv}{v}$$

$$\therefore R \frac{dv}{v} = -C_v \frac{dT}{T}$$

ومن المعادلة (24-8) يكون:

$$(C_p - C_v) \frac{dv}{v} = -C_v \frac{dT}{T}$$

نقسم الطرفين على C_v فنجد:

$$\left(\frac{C_p}{C_v} - 1\right) \frac{dv}{v} = -\frac{dT}{T}$$

نفرض $\frac{C_p}{C_v}$ تساوي γ ونسميها المعامل الكظوم فيكون:

$$(\gamma - 1) \frac{dv}{v} = -\frac{dT}{T}$$

ومنه:

$$\frac{dT}{T} = -(\gamma - 1) \frac{dv}{v}$$

نكامل الطرفين فنجد:

$$\ln T = -(\gamma - 1) \ln v + \ln c$$

$$\ln T + (\gamma - 1) \ln v = \ln c$$

$$\ln T + \ln v^{(\gamma-1)} = \ln c$$

$$\ln(T \cdot v^{(\gamma-1)}) = \ln c$$

نفاضل الطرفين:

$$\therefore T \cdot v^{(\gamma-1)} = c \quad (29 - 8)$$

تمثل المعادلة (29-8) معادلة الحالة للغاز المثالي للتحويل الكظوم.



مسائل وتمارين

1- حين يتحول 1 غراماً من الماء إلى بخار يصبح حجمه 1671 تحت الضغط

الجوي فإذا كانت الحرارة الكامنة لتصعيد الماء 539 حريرة/غرام. احسب

العمل المبذول والزيادة في الطاقة الداخلية.

2- أوجد المكافئ الميكانيكي الحراري J من المعلومات التالية:

$$C_p \text{ للهواء} = 0.239$$

$$C_v \text{ للهواء} = 0.169$$

وحيث إن كثافة الهواء في معدلي الضغط ودرجة الحرارة النظاميين تساوي

1.29 غراماً / لتر وأن كثافة الزئبق تساوي 13.6 غراماً / سم³.

3- تصدم رصاصة سرعتها 350م/ثا حاجزاً وتستقر فيه في حالة سكون. ما

هو ارتفاع درجة حرارتها إذ لم تفقد الرصاصة أي حرارة للوسط المحيط.

4- تحتوي أسطوانة تنتهي بمكبس على 4 غرامات نيتروجين في درجة الصفر

المئوي، فإذا كان حجم الغاز 1.6 لتر حيث كان الضغط يعادل 2 جواً، وإذا

سُخن الغاز تحت ضغط ثابت حتى درجة 127م°. أوجد:

1- كمية الحرارة التي أعطيت للغاز.

2- العمل الذي بذله النتروجين ليتمدد.

3- التغير في الطاقة الداخلية للغاز بافتراض $C_p = 24 \text{ cal}$.

5- ليكن لدينا 10 لترات من الآزوت موجودة تحت ضغط $P_1 = 1 \text{ atm}$

تضغط حتى $P_2 = 100 \text{ atm}$ والمطلوب حساب عمل الانضغاط في

الحالتين:

1- انضغاط الغاز مع ثبات درجة الحرارة.

2- انضغاط الغاز انضغاطاً كظوماً.

الفصل التاسع

الحث الكهرومغناطيسي والتيار المتناوب

Electromagnetic Induction And alternating current

9-1- تمهيد:

التيار المتناوب هو التيار الذي تتغير شدته واتجاهه دورياً مع الزمن بحيث تكون القيمة المتوسطة لشدة هذا التيار خلال زمن الدورة معدومة. ويكون تردد التيار دورياً لأنه بعد فترة من الزمن قدرها T يتكرر تغير التيار وتسمى هذه الفترة الزمنية الدور ويرمز لها بالرمز T وتعرف بأنها الفترة الزمنية التي تستغرقها الدورة الواحدة للتيار المتناوب. أما التردد الذي هو مقلوب الدور فيرمز له بالرمز f حيث $(f=1/T)$ ويعرف بأنه عدد الدورات في الثانية ويقدر بالهرتز.

يمكن الحصول على تيار متناوب عند دوران ملف ناقل مستو في حقل مغناطيسي منتظم إذ تتولد فيه قوة محركة كهربائية تحريضية جيبية نبضها مساو السرعة الزاوية لدوران الملف. فإذا كانت دائرة الملف مفتوحة، نشأ بين نهايتيها فرق في الكمون مساو هذه القوة المحركة الكهربائية. سندرس في هذا الفصل القوى المحركة الجيبية فقط وسنقبل النظر إلى التيارات المتناوبة المستخدمة عملياً، على أنها تيارات جيبية.

9-2- قانون فاراداي ولينز في التحريض المغناطيسي:

اكتشف فاراداي (Faraday) أنه إذا تغير عدد خطوط القوة المغناطيسية التي تقطع دائرة أو موصلاً، تولدت قوة محركة كهربائية تحريضية E_{ind} .

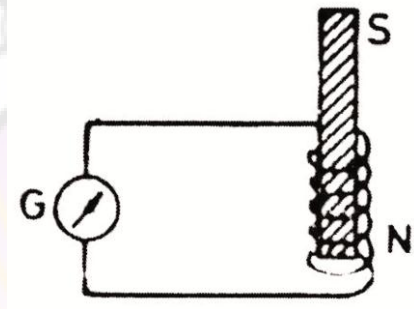
ويمر تيار كهربائي بالدائرة إذا كانت مغلقة وتستمر القوة المحركة المتولدة والتيار التحريضي طوال فترة تغير الحقل المغناطيسي ويتوقف مقدارهما على معدل تغير الحقل، بمعنى تغير التدفق المغناطيسي ($\Delta\Phi$):

$$E_{ind} \propto \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

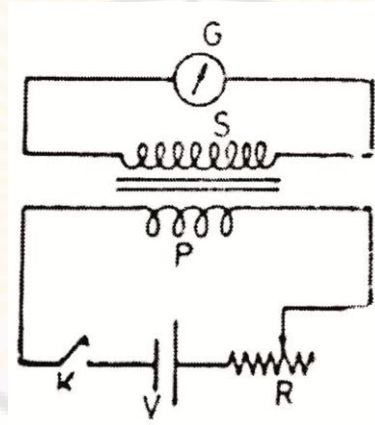
بشكل عملي يمكن الحصول على التيارات التحريضية (المنتجة بالتأثير) باستعمال مغناطيس وملف يتصل طرفاه بمقياس غلفاني حساس (G) كما هو مبين بالشكل (9-1). عند إدخال القطب الشمالي مثلاً للمغناطيس بسرعة في الملف، نشاهد انحرافاً ملحوظاً في المقياس الغلفاني في الاتجاه المضاد. وإذا قلت سرعة إدخال أو إخراج المغناطيس قل الانحراف تبعاً لذلك. ويشاهد الانحراف طالما تحرك المغناطيس وينعدم عندما يقف المغناطيس عن الحركة. وتحدث الظاهرة ذاتها إذا ثبت المغناطيس وتحرك الملف ثم ينقطع التيار عندما يثبت الملف. تسمى هذه التيارات المنتجة بالتأثير التيارات التحريضية (Induced current) والقوة المحركة الكهربائية الناتجة بالتأثير القوة المحركة التحريضية (Induced e.m.f). وقد أثبتت التجارب العملية على أن شدة التيار التحريضي تزداد بزيادة عدد لفات الملف ومساحة الملف وشدة القطب المغناطيسي المؤثرة إضافة إلى سرعة الحركة النسبية بين الملف والمغناطيس.

كذلك يمكن الحصول على التيارات التحريضية باستعمال ملف ابتدائي P وملف ثانوي كما هو مبين بالشكل (9-2) حيث يلتف الملفان حول النواة نفسها من الحديد المطاوع، وبجرد الضغط على المفتاح K ومرور التيار في دائرة الملف الابتدائي ينحرف المقياس الغلفاني G وبمجرد وقف التيار نشاهد أيضاً

انحرافاً في المقياس الغلفاني ولكن في الاتجاه المضاد. إن الانحراف اللحظي في الحالتين ناتج عن تولد قوة محرّكة تحريضية لحظية في حالة نمو التيار عند البدء واطمحاّله عند فتح الدارة الابتدائية.



الشكل (9-1)



الشكل (9-2)

استنتج لينز من خلال تجاربه المتعاقبة أنه عندما يُقرب قطب شمالي لمغناطيس من الملف في محاولة لإدخاله فإن الجزء العلوي من الملف (بتأثير القوة المحركة التحريضية والتيار التحريضي الذي ظهر) يصبح قطباً شمالياً يعيق حركة دخول القطب الشمالي (بالتنافر) وبالمثل عند إخراجهِ حيث تعمل القوة المحركة التحريضية والتيار التحريضي على أن يصبح الجزء العلوي من

الملف قطباً جنوبياً ليحول دون خروج القطب الشمالي للمغناطيس (بالتجاذب). إن هذا التفسير لذلك التأثير يتفق وقانون بقاء الطاقة. فعند اقتراب القطب الشمالي للمغناطيس من الملف يقابل بقوة تنافر وعند إبعاده تؤثر فيه قوة تجاذب، وهذا العمل الميكانيكي يتحول إلى طاقة كهربائية، وتتكرر هذه العملية في حركة إخراج القطب الشمالي.

9-3- معادلة القوة المحركة الكهربائية التحريضية:

اعتماداً على نتائج فراادي ولينز، نفترض أن $\emptyset$ هو مقدار التدفق المغناطيسي الكلي الذي يقطع دائرة مغلقة، تتولد في الدارة قوة محركة كهربائية تحريضية تعاكس معدل تغير التدفق، أي أن:

$$E_{ind} \propto \frac{\Delta \emptyset}{\Delta t} \Rightarrow E_{ind} = -K \frac{\Delta \emptyset}{\Delta t} \quad (1-9)$$

حيث E_{ind} هي القوة المحركة التحريضية و $\Delta \emptyset$ هي التغير في التدفق المغناطيسي في زمن قدره Δt وأن K ثابت التناسب وتتوقف قيمته على الوحدات المستخدمة.

في النظام المكثي (الدولي) M.K.S حيث تقدر E_{ind} بالفولط و $\emptyset$ بالفبير و t بالثانية فإن قيمة K تساوي الواحد أي أن:

$$E_{ind} = -\Delta \emptyset / \Delta t \text{ volts}$$

وفي النظام السغثي C.G.S. حيث تقدر E_{ind} بالفولط و $\emptyset$ بالماكسويل و t بالثانية فإن k مساوية (10^{-8}) أي أن:

$$E_{ind} = -10^{-8} \Delta \emptyset / \Delta t \text{ volts}$$

من ناحية أخرى، إذا كانت الدارة المغلقة عبارة عن ملف مساحة مقطعه

A ويتكون من n من اللفات فإن $\Delta\Phi = n.A.B$ حيث B كثافة التدفق المغناطيسي، وتصبح القوة المحركة الكهربائية التحريضية على الشكل:

$$E_{ind} = -K n A \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad \text{volts} \quad (2-9)$$

ففي النظام المكثي تقاس B (بالفيبر / م²) و A (بـ م²) فإن:

$$E_{ind} = -n A \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad \text{volts}$$

وفي النظام السعوي تقاس B (بالغاوص) و A (بـ سم²) فإن:

$$E_{ind} = -10^{-8} n A \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad \text{volts}$$

4-9- التحريض الذاتي: self-Induction

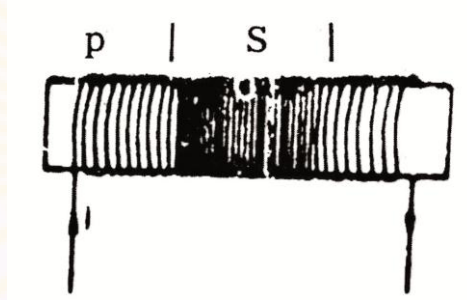
عندما يتغير التيار المار في ملف بالزيادة أو بالنقصان يتغير تبعاً لذلك التدفق المغناطيسي الذي يقطعه فينشأ عن ذلك تولد قوة محرقة كهربائية تحريضية في الملف تعاكس زيادة أو نقص شدة التيار. وهذه الظاهرة تعرف بالتحريض الذاتي.

أي أن التحريض الذاتي لملف هو خاصية الملف لمقاومة زيادة أو نقصان التيار فيه، وهذه الخاصية واضحة في دارات التيار المتناوب Alternating Current (A.C) كما سوف نلاحظ بالتفصيل.

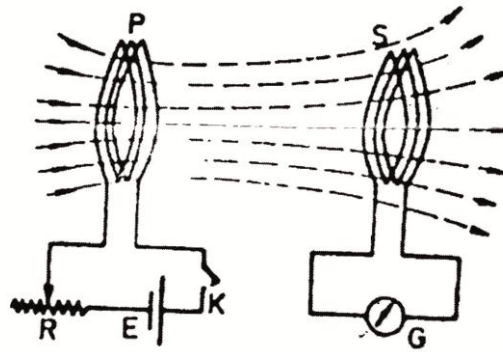
من السهولة فهم معنى التحريض الذاتي إذا لاحظنا أن كل لفة من لفات الملف تعمل بمثابة ملف ثانوي بالنسبة للفة التي تجاورها فينتج في هذه اللفة عند إغلاق الدارة تيار مضاد أو زيادة في شدة التيار يعمل على تأجيل الوقت الذي ينمو فيه التيار حتى يبلغ قيمته الثابتة (أو العظمى)، وبالمثل إذا نقصت شدة

التيار أو انقطع التيار فإن كل لفة من الملف تتولد فيها قوة محركة كهربية تحريضية تعمل على تأخير اضمحلال التيار ووصوله إلى قيمته الثابتة (الصغرى أو الصفر).

من المعروف أن الزمن الذي يستغرقه التيار للوصول من قيمته الثابتة إلى الصفر عن القطع (cut off) صغير جداً بالنسبة للزمن الذي يستغرقه للوصول من الصفر إلى قيمته العظمى الثابتة عند التوصيل ولذلك فإن القوة المحركة الكهربائية التحريضية عند لحظة القطع تكون أكبر من القوة الكهربائية التحريضية عند لحظة التوصيل ولذلك نشاهد شرارة كهربائية عند طرفي المفتاح عند لحظة القطع (الشكل 9-3، والشكل 9-4).



الشكل (9-3) التحريض المتبادل بين ملفين ملفوفين أحدهما على الآخر.



الشكل (9-4) التحريض المتبادل بين ملفين متقابلين.

9-5- معامل التحريض الذاتي - Coefficient of self Inductance

عندما يتغير التيار المار في ملف فإن التدفق المغناطيسي (Φ) الذي يقطعه في أية لحظة يتناسب طراداً مع شدة التيار (I) عند هذه اللحظة. وحيث أن القوة المحركة الكهربائية التحريضية (E_{ind}) تتناسب طردياً مع معدل تغير التدفق المغناطيسي ($\Delta\Phi/\Delta t$)، وهذا يعني أن E_{ind} تتناسب مع معدل تغير شدة التيار عند اللحظة نفسها.

$$\therefore E_{ind} \propto \frac{\Delta I}{\Delta t} \Rightarrow E_{ind} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3-9)$$

$$\therefore -L = \left(\frac{\Delta t}{\Delta I} \right)^{-1} \quad (4-9)$$

حيث يعرف ثابت التناسب L بمعامل التحريض الذاتي لهذا الملف. فإذا كانت $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 1$ فإن $(-L = E_{ind})$ ولذلك يعرف معامل التحريض الذاتي L بأنه يساوي عددياً القوة المحركة الكهربائية التحريضية المتولدة في الدارة عندما يكون معدل تغير التيار بالنسبة للزمن مساوياً للواحد.

إن الوحدة العملية لمعامل التحريض الذاتي لدارة هي الهنري (Henry) وهي التي إذا ازداد فيها التيار بمعدل واحد أمبير في الثانية تتولد فيها قوة محركة كهربائية تحريضية قدرها فولط واحد.

$$\therefore 1 \text{ Henry} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ amp./sec}}$$

توجد واحدة أصغر من الهنري تعرف بالميلي هنري mH وتساوي 10^{-3} هنري.

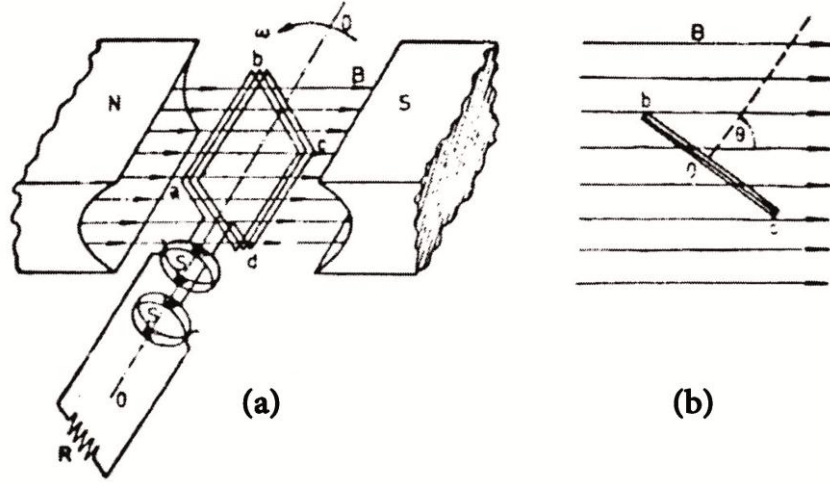
كذلك هناك واحدة الميكروهنري μH وتساوي 10^{-6} هنري وهي واحدة شائعة الاستعمال في دارات أجهزة الاستقبال والإرسال اللاسلكية.

9-6- القوة المحركة الكهربائية المتولدة في وشيعة تدور في مجال مغناطيسية منتظم (الدينامو):

من خلال داستنا لعملية التحريض الكهرومغناطيسي، وجدنا أن التيار في الدارة الكهربائية التي تحوي وشيعة ينتج من التأثير المتبادل لكمون منبع الطاقة الكهربائية V وللقوة المحركة الكهربائية للتحريض الذاتي E_{ind} والتي تظهر في الدارة نتيجة لتغيرات التيار.

نفترض وشيعة مستطيلة الشكل $a b c d$ تدور حول محور $0-0$ عمودياً على مجال مغناطيسي منتظم B الشكل (9-5a). يتصل طرفا الملف بحلقتين $s-s$ ينطبق محورهما على محور الملف وتتصل بهما فرشأتان تصلان الوشيعة بالدارة الخارجية R . تستعمل قوة ميكانيكية ناتجة عن أية آلة حرارية أو عنفة مائية أو شلالات مائية أو رياح أو بخار ناتج عن التسخين في المفاعلات النووية مثلاً في إدارة الوشيعة في المجال المغناطيسي المتولد عن مغناطيس دائم $N-S$.

نفرض A مساحة الوشيعة وعدد لفاتها n وأنها في وضع بحيث يصنع العمود على مستويها زاوية قدرها θ مع اتجاه خطوط القوة المغناطيسية B . الشكل (9-5b).



الشكل (5-9).

إن مقدار التدفق المغناطيسي Φ الذي يمر خلال مقطع الوشعة في هذه الحالة يعطى بالعلاقة:

$$\Phi = n A \cos \theta \quad (5 - 9)$$

وتكون القوة المحركة الكهربائية التحريضية المتولدة في الملف:

$$E_{\text{ind}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -n A B \frac{d}{dt} \cos \theta$$

وحيث أن التفاضل $\left(\frac{d}{dt} \cos \theta\right)$ يساوي $\left(-\sin \theta \frac{d\theta}{dt}\right)$ ، حينئذ تؤول المعادلة السابقة إلى الشكل:

$$E_{\text{ind}} = n A B \sin \theta \frac{d\theta}{dt} \quad (6 - 9)$$

وإذا كانت ω هي السرعة الزاوية (angular velocity) للوشعة فإن

الزاوية θ التي دراتها الوشعة في زمن قدرها t هي $\theta = \omega t$ وبالتفاضل

بالنسبة للزمن نستنتج $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ وبالتعويض بالمعادلة (5-9) نحصل على:

$$E_{\text{ind}} = n A B \omega \sin \omega t \quad (7 - 9)$$

ولكن المقدار $(n A B \omega)$ يمثل القوة المحركة الكهربائية التحريضية حين تكون $\sin \theta = 1$ أي حين يكون مستوى الوشيجة موازياً لاتجاه خطوط القوة المغناطيسية $(\theta = \frac{\pi}{2})$ وتكون في تلك الحالة القوة الكهربائية التحريضية في نهايتها العظمى E_m .

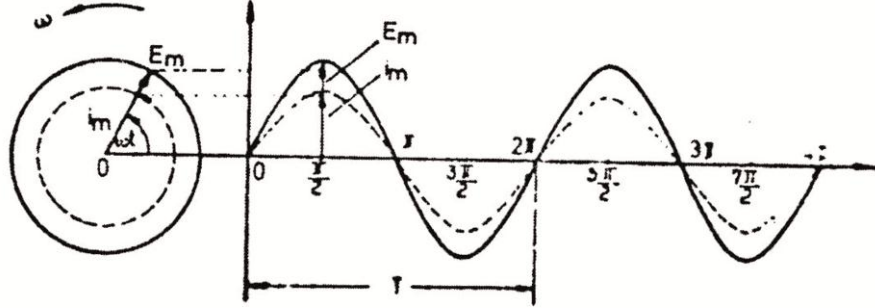
$$\therefore E_{ind} = E_m \sin \omega t \quad (8-9)$$

نلاحظ أن المعادلة (8-9) تمثل معادلة منحنٍ جيبي (sine curve) أو معادلة الحركة التوافقية البسيطة (simple harmonic motion) وهذه القوة المحركة الكهربائية التحريضية E_{ind} هي المطبقة بين طرفي المقاومة الخارجية R . وإذا كانت T تمثل زمن دورة كاملة واحدة للوشيجة خلال الحقل المغناطيسي التحريضي حول محور $0-0$ مقدرة بالثانية، فإن f تمثل عدد الدورات الكاملة للوشيجة في الثانية الواحدة وتعرف بالتردد (Frequency). لذلك يمكن التعبير عن السرعة الزاوية ω بالعلاقة:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad \text{rad./sec.} \quad (9-9)$$

يمكن تمثيل منحنى الجيب بيانياً للقوة المحركة الكهربائية التحريضية أي المعادلة (8-9) كما هو مبين بالشكل (9-6) حيث يمثل المتجه E_m القيمة العظمى للقوة المحركة التحريضية ويبدأ من الصفر بزاوية $\omega t = 0$ وبعد زمن قدره t ثانية نفرض أن المتجه دار زاوية قدرها ωt وبالتالي تكون قيمة القوة المحركة الكهربائية التحريضية عند هذه اللحظة هي:

$$E_{ind} = E_m \sin 2\pi f t = E_m \sin \frac{2\pi}{T} t$$



الشكل (6-9).

يلاحظ من الشكل أن E_{ind} تتغير قيمتها من لحظة لأخرى وتكون موجبة في النصف الأول $\frac{T}{2}$ للدورة وسالبة في النصف الثاني للدورة. أي أنها قوة محرك متناوبة في اتجاهين متضادين، لذلك نستخدم هذه القوة المحركة عند توصيل المقاومة R بطرفي دائرة خارجية كمصدر للجهد المتناوب ويرمز لها للسهولة عند استخدامها في الدارات الكهربائية بالرمز E أو $e.m.f$ أو V أو بالإشارة $\sim$.

7-9- أسس التيار المتناوب (A.C): Alternating Current

تعد القوة المحركة الكهربائية التحريضية $e.m.f$ الناتجة عن حركة ناقل في حقل مغناطيسي الوسيلة الرئيسية لتوليد التيار المتناوب لذلك تعد مصدراً للتوتر المتناوب (V) .

إن سبب تولد التيار المتناوب ناتج عن التدفق المغناطيسي Φ يزداد في النصف الأول من الدورة وينقص في النصف الثاني من الدورة مما يجعل التيار يمر في اتجاه معين في الملف في النصف الأول ثم تنعكس جهته في النصف الثاني من الدورة. كما أن سرعة تدوير الوشعة يمكن أن يؤدي إلى كمونات

عالية جداً بسبب التغير السريع في التدفق. وتتميز مولدات التيار المتناوب بهذه الصفة عن مولدات التيار المستمر. بالأسلوب نفسه الذي تم فيه مناقشة القوة الدافعة التحريضية في البند السابق، فإنه يتضح أنه:

$$V = E_{ind} = V_m \sin \omega t$$

$$\frac{V}{R} = \frac{V_m}{R} \sin \omega t$$

$$\therefore I_{ind} = I_m \sin \omega t \quad (10 - 9)$$

توضح المعادلة (10-9) أن التيار المتناوب I تتغير قيمته واتجاهه تغيراً دورياً بمرور الزمن بحيث تكون القيمة المتوسطة لهذا التيار خلال زمن الدورة الواحدة مساوياً للصفر. ويكون تردد التيار دورياً لأن بعد فترة من الزمن قدرها T يتكرر تغير التيار. تسمى هذه الفترة الدور ويرمز لها بالرمز T وتعرف بأنها الفترة الزمنية التي تستغرقها الدورة الواحدة للتيار المتناوب. أما التردد والذي هو مقلوب الدور فيرمز له بـ f ولدينا $f = \frac{1}{T}$ ويعرف بأنه عدد الدورات في الثانية ويقدر بالهرتز.

يلاحظ من مناقشة المعادلة (10-9) أن التيار المتناوب يسلك سلوك الحركة الجيبية لذلك يمكن تمثيله بيانياً على أساس دورات متناوبة حيث I_m هي النهاية العظمى لقيمة التيار التحريضي. وإذا كانت T تمثل الزمن بالثانية لدورة كاملة واحدة للملف حول محور 0-0 وتعرف بزمن الذبذبة فإن f عدد الدورات الكاملة للملف في الثانية ويعرف بالتردد (frequency) فإنه من الممكن أن نعبر عن السرعة الزاوية ω بالعلاقة:

لذلك يمكن تمثيل التيار بمتجه طوله I_m وهو أكبر قيمة للتيار وتكون قيمته في أية لحظة هي:

$$I_{ind} = I_m \sin 2\pi f t = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t$$

ويختلف هذا التيار عن التيار المستمر في أن قيمته متغيرة إذ تغير من (I_m) إلى $-(I_m)$ لذلك يعرف بالتيار المتناوب والشكل (6-9) يوضح سلوك هذا التيار مقارناً مع الجهد المتناوب (V) أو القوة المحركة الكهربائية التحريضية E_{ind} .

للتيار المتناوب قيمة تعرف بالقيمة الفعالة للتيار المتناوب effective value وتعرف بأنها قيمة ذلك التيار المستمر الذي يولد معدل الحرارة نفسه في مقاومة معينة ويرمز لها غالباً $I_{root\ mean\ square}$ أو $I_{r.m.s}$ وتساوي:

$$I_{r.m.s} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.7 I_m \quad (9 - 11)$$

ومن المهم أن يعرف الطالب أن القيمة الفعالة للتيار المتناوب $I_{r.m.s}$ هي القيمة التي تقيسها أجهزة القياس مثل مقياس الأمبير وهي بالتالي القيمة المستخدمة في أية حسابات. كذلك بالنسبة لمصدر الجهد المتردد يوجد قيمة فعالة له تعطى بالعلاقة:

$$E_{r.m.s} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.7 E_m \quad (9 - 12)$$

والقيمة الفعالة للجهد المتردد في القيمة التي يقيسها مقياس الفولط للجهد المتردد هي بالتالي القيمة المستخدمة في أية حسابات.

9-8- مميزات التيار المتناوب:

يمر التيار المتناوب دائماً في اتجاه واحد بينما يغير التيار المتناوب اتجاهه دائماً في الناقل من اتجاه إلى عكسه وهكذا يميز التيار المتناوب عادة بعدد هذه التغيرات في الثانية وتسمى عدد الذبذبات أو عدد الدورات في الثانية وتعرف كهربائياً بالتردد أو التواتر (frequency) ووحدته دورة في الثانية أو الهرتز.

يختلف تواتر التيار المتناوب حسب استخدامه. إن تواتر التيار المتناوب المستخدم في إمداد الجمهور والمدن بالكهرباء يتراوح ما بين 25 إلى 100 هرتزاً وقد شاع حديثاً استخدام تواتر عياري قدره 50 هرتزاً (في أمريكا 60 هرتزاً). أما في المجالات الصناعية فإن التواتر للتيار يتراوح ما بين 15 إلى 25 هرتزاً وحسب مجالات استخدامه.

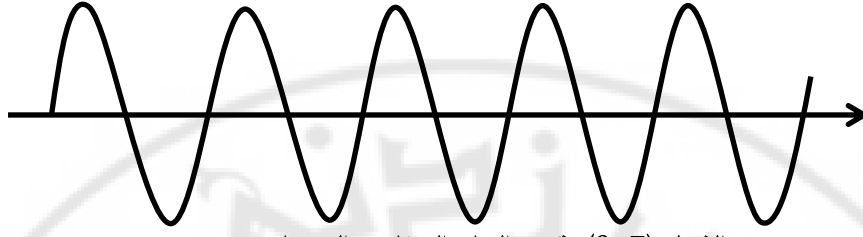
إن التيارات الهاتفية التي دورها يساوي دور الصوت الذي تنقله لها تواتر من مرتبة 1000 هرتز. تستخدم في البرق واللاسلكي تواترات بين 10^4 و 2×10^7 هرتزاً ويصل التواتر في بعض الأجهزة إلى 30×10^9 هرتزاً وتدعى التواترات المقابلة للأصوات التواترات المسموعة أو الموسيقية.

عند توزيع الطاقة الكهربائية تبلغ فروق الكمون المنتجة بضع آلاف فولت بين مربطي المنوبة و 100 إلى 200 فولت بين مربطي أجهزة التوزيع وتبلغ أو تفوق 500000 فولت في خطوط النقل.

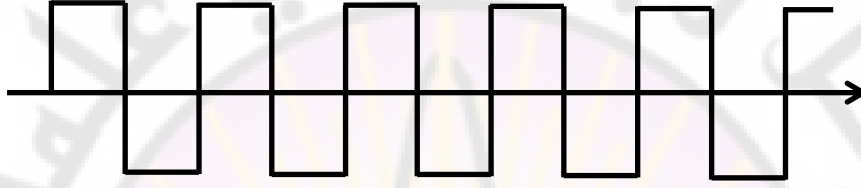
نفترض لدينا محطة لتوليد الكهرباء تعطينا تياراً مستمراً، فإذا أردنا إمداد بعض البيوت البعيدة بالكهرباء من هذه المحطة فإنه يجب أن نستعمل

أسلاكاً للتوصيل مقاومتها صغيرة أي قطرها كبير وهذا يجعلها ثقيلة وغالية الثمن وحيث إن الطاقة المفقودة في تسخين الأسلاك تساوي $(I.V)$ أو $(I^2 R)$ حيث تمثل V مقدار الجهد و R المقاومة. يتضح من ذلك أنه إذا صغرت قيمة التيار فإن الطاقة المفقودة التي تتناسب مع مربع شدة التيار تصغر كثيراً ولكن تصغير قيمة التيار وبالتالي زيادة قيمة الجهد ($V.I = \text{Cons}$) عملية يصعب تحقيقها في حالة التيار المستمر. أما إذا كانت المحطة تمدنا بتيار متناوب فإنه يمكننا بسهولة زيادة جهده V وتصغير شدة التيار I بواسطة محول رافع الجهد (step – up transformer) دون خسارة تذكر في الطاقة وهذا يجعل في الإمكان نقل التيار إلى المنازل البعيدة خلال أسلاك نحاسية رفيعة وهي رخيصة وسهلة الحمل بالمقارنة مع الأسلاك ذات القطر الكبير وبالتالي والأهم فإن خسارة الطاقة نتيجة تسخين الأسلاك طفيفة جداً. يمكننا بسهولة تصغير الجهد حين يصل التيار إلى مكان الاستهلاك إلى الجهد المناسب منزلياً أو صناعياً خفيفاً وذلك باستعمال محول خافض للجهد (step – down transformer) وسوف نناقش المحولات في فقرات تالية من هذا الفصل.

من ناحية أخرى، فإنه بالإمكان تقويم التيار المتناوب (أي تحويله من تيار متناوب إلى تيار مستمر) باستخدام مقوم التيار (rectifier) الشكل (7-9) ولكن يصعب إجراء العملية العكسية أي تحويل التيار المستمر إلى تيار متناوب لكن من الممكن تحويله إلى تيار متقطع (Varying) والشكل (8-9) يوضح ذلك.



الشكل (7-9) تقويم التيار المتناوب إلى تيار مستمر



الشكل (8-9) تحويل التيار المستمر إلى تيار متقطع

9-9- دارات التيار المتناوب Alternating Current Circuits

قد تحتوي الدارات الكهربائية ذات التيار المتناوب على مقاومة R (resistance) أو مكثف C (capacitance) ذي سعة أو ملف (Inductance) ذي تحريض ذاتي L .

إذا وصلت بعض الأجزاء أو جميعها في دائرة تيار مستمر (موحد الاتجاه) فإن شدة التيار لا تتأثر إلا بالمقاومة فقط إذ أن كلاً من التحريض الذاتي والسعة له تأثير لحظي فقط عند التوصيل والقطع.

لكن في حالة التيار المتناوب وهو متغير في شدته واتجاهه فإن التيار يتغير بكل من هذه الأجزاء. فالمقاومة تؤثر في قيمة شدة التيار I والتحريض الذاتي يؤثر في معدل شدة التيار $\Delta I/\Delta t$ والسعة تؤثر في معدل تغير قيمة الجهد $\Delta v/\Delta t$.

وقد تناول الطالب هذه الدارات بشكل مفصل خلال السنين الماضية وسوف نتناول فقط حالة دائرة تحوي مقاومة صرف.

9-9-1 حالة دائرة تحوي مقاومة R:

نفرض مصدر جهد قيمته عند أي لحظة يعطى بالعلاقة:

$$E = E_m \sin \omega t \quad (13 - 9)$$

وصل إلى طرفي مقاومة R (سلك مستقيم مقاومته R أوماً) الشكل (9-9) فإن

التيار المتناوب المار خلال هذه المقاومة عند أي لحظة يعطى بالعلاقة:

$$I = I_m \sin \omega t \quad (14 - 9)$$

نلاحظ من المعادلتين السابقتين أن فرق الجهد والتيار يتبعان منحنى

الجيب ويسلكان سلوكاً واحداً بمرور الزمن، بمعنى أنه عندما يكون فرق الجهد

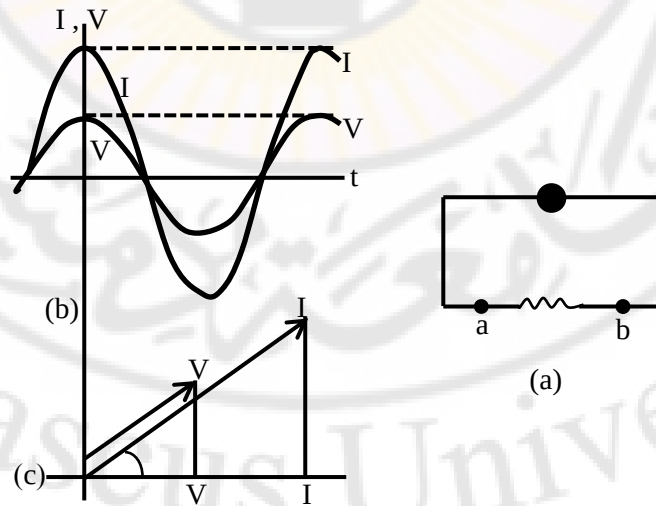
صفرًا فإن التيار يساوي صفرًا أيضاً في حين عند وصول فرق الجهد إلى

أقصى قيمة له فإن التيار يصل إلى قيمته القصوى أيضاً.

يقال في هذه الحالة أن فرق الجهد بين طرفي المقاومة والتيار المار

خلالها يتفق دائماً في الطور (in phase) ويمكن تمثيل فرق الجهد والتيار بيانياً

كما هو واضح بالشكل (9-9).

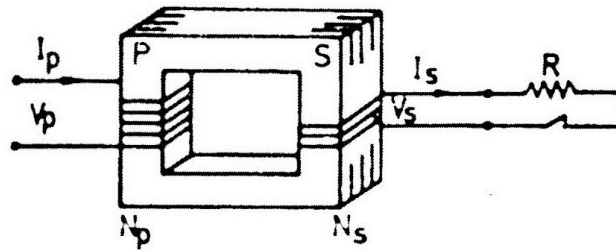


الشكل (9-9).

9-10- المحول الكهربائي The Transformer:

المحول جهاز كهرومغناطيسي يتحول خلاله التيار المتناوب بفرق كمون معين إلى تيار متناوب بالقيمة نفسها للتواتر f السابق ولكن بفرق كمون مختلف. يتركب المحول الكهربائي أساساً الشكل (9-10) من ملفين ابتدائي p وثانوي s عدد لفاتها N_p و N_s على التوالي، معزولين عن بعضهما وملفوفين حول نواة من الحديد (iron core) وذلك لزيادة خطوط القوة المغناطيسية وبالتالي زيادة خاصية التأثير.

يعد المحول منبعاً للطاقة الكهربائية من جانب الملف الثانوي حين يزود الملف الابتدائي بطاقة كهربائية، وتكون مواصفات الجهد أعلى أو أقل من الجهد المطبق بحسب نسب اللفات (أي حسب نوعية المحول رافع أو خافض). حين تتغير شدة التيار الكهربائي في الملف الابتدائي ينتج بالتأثير قوة دافعة كهربائية في الملف الثانوي يتوقف مقدارها على مادة النواة وعلى نسبة عدد لفات الملف الابتدائي إلى عدد الملف الثانوي. هذا يعني أنه عند وصل جهد كهربائي متناوب V_p على الملف الابتدائي p يتكون جهد تأثيري V_s على طرفي الملف الثانوي s .



الشكل (9-10).

إن الجهد اللحظي في الملف الابتدائي يعطى بالعلاقة:

$$V_p = N_p \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (15 - 9)$$

ويكون الجهد التأثيري الناشئ في الملف الثانوي.

$$V_s = N_s \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (16 - 9)$$

حيث: $\Delta \phi / \Delta t$ هي القوة المحركة الكهربائية على كل لفة من الملف والناشئة عن تغير التدفق المغناطيسي. وبقسمة المعادلتين (9-19) و (9-20) نحصل على:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (17 - 9)$$

أي أن النسبة بين عدد لفات الملف الابتدائي إلى عدد لفات الملف الثانوي تساوي النسبة بين قيمة الجهد الفعال أو التوتر الفعال بين مربطي الملف الابتدائي إلى التوتر الفعال بين مربطي الملف الثانوي. كذلك فإن العلاقة بين الجهد والتيار في كل من الملفين تعطى بالعلاقة

التالية:

$$V_p I_p = V_s I_s = \text{const.} \quad (18 - 9)$$

من المعادلتين (9-17) و (9-18) نجد أن:

$$V_p / V_s = I_s / I_p = N_p / N_s \quad (19 - 9)$$

أي أن النسبة بين التيارات في كل من الملفين الابتدائي والثانوي تتناسب عكساً مع عدد لفات كل من الملفين، بمعنى أنه كلما كان عدد لفات الملف صغيراً كانت شدة التيار فيها أكبر.

إن النسبة بين الجهد أو التوتر الفعال للملف الابتدائي إلى الجهد أو التوتر الفعال للملف الثانوي والتي تساوي نسبة عدد لفات الملف الابتدائي إلى

عدد لفات الملف الثانوي تسمى نسبة التحويل T.R للمحول (Transformaion Ratio).

$$\therefore T.R = V_p / V_s = N_p / N_s \quad (20 - 9)$$

9-10-1- استطاعة المحول:

الاستطاعة بالمعنى الفيزيائي هي القدرة على إنجاز عمل خلال فترة زمنية معينة. والمحول كما بينا يتكون من ملفين ولكل منهما قدرة تتحدد من خلال مادة التصنيع. والمفروض أن استطاعة كل من الملفين متكافئة، إلا أن المحول حين يعمل يستهلك شيئاً من الطاقة تنتشر في الملف الابتدائي على شكل حرارة من جراء فعل جول، ويمكن تقليل هذا الجزء الضائع حين يتم عمل المحول دون حمل (الحالة التي يكون فيها الملف الابتدائي موصولاً بجهد متناوب والملف الثانوي مفصلاً) وبالتالي فإن الاستطاعة المسحوبة من الدارة الثانوية تساوي تقريباً الاستطاعة الجاهزة في الدارة الابتدائية إلا أنه ورغم كل الاحتياطات الصناعية فإن $(W_1 > W_2)$ دائماً وأن هذا الفرق يمثل الاستطاعة الضائعة أو المستهلكة في المحول نفسه نتيجة لسببين رئيسيين:

(1) المادة النحاسية التي تصنع منها الملفات: يظهر هذا الضياع على شكل حرارة من جراء فعل جول في الملفين ويزداد هذا الضياع أو الاستهلاك كلما زادت الاستطاعة المستهلكة في المحول.

(2) النواة الحديدية التي يلف حولها الملفين: تتسبب النواة الحديدية في ضياع أو استهلاك الاستطاعة لعدة أسباب يمكن إيجازها كالاتي:

(a) نتيجة لانعكاسات اتجاه التدفق المغناطيسي في النواة الحديدية مرات عديدة تنشأ ظاهرة البطء المغناطيسي وينتج عنها ضياع بعض الطاقة وللتخفيف

من هذا التأثير تصنع نوى المحولات من الحديد مع نسبة من مادة السليسيوم.

(b) نتيجة التأثير في كتلة معدن النواة تبدو تغيرات في عدد خطوط القوة تنشأ عنها تيارات ليست في الدارات المقفلة تسمى تيارات دوامية أو ما يعرف بتيارات فوكو الإعصارية يضيع بسببها شيء من الطاقة، ولتقليل هذا الضياع تصنع النواة على شكل صفائح حديدية رقيقة تفصل بينها طبقة رقيقة من مادة عازلة.

رغم كل الاحتياطات الصناعية فإن نسبة من الطاقة تضيع نتيجة للتأثيرات المختلفة بخاصة المحولات الضخمة والمحولات المستمرة في العمل، لذلك تغمر تلك المحولات في حمام زيت معدني حتى لا تزداد حرارتها إلى درجة يتلف عندها المحول.

9-10-2- مردود المحول أو القدرة Efficiency:

يقاس مردود أية آلة بكمية العمل المنجز منسوباً إلى الطاقة المبذولة $(r = \frac{W_2}{W_1})$ وحيث إن المحول يفقد شيئاً من استطاعته لإنجاز عمله نتيجة للتأثيرات المختلفة فإن مردوده المئوي هو أقل من 100%. ويتغير مردود محول معين مع مقدار الاستطاعة المستهلكة في ملفه الثانوي، وتبلغ حدها الأعظمي حين يكون التيار المار في الملف الثانوي ذا شدة منتظمة، كما يعتمد المردود على طريقة تصميم المحول وحجمه وبشكل عام لا يتجاوز المردود 95% للمحولات العادية وقد يصل إلى 99% في المحولات الضخمة.

9-10-3- أنواع المحولات:

هناك نوعان من المحولات حسب نسبة التحويل:

- (1) محول رافع للجهد (step – up Transformer) كما في المحولات المركزية في المناطق السكنية ومحولات المنازل (المنظم) ويسمى صناعياً محول الجهد العالي. يكون المحول رافعاً للجهد إذا كان $(N_p/N_s < 1)$ وهذا يعني أن $V_p < V_s$ بمعنى أن عدد لفات الملف الابتدائي أقل منها في الثانوي $N_p < N_s$ وينتج عن ذلك التيار المتناوب المار في الملف الابتدائي تياراً متناوباً في الملف الثانوي جهده أعلى من جهد التيار الابتدائي.
- (2) محول خافض للجهد (step – down Transformer) كما في المناطق الصناعية والأجهزة الحساسة ويسمى صناعياً محول الجهد المنخفض. يكون المحول خافضاً للجهد إذا كان $(N_p/N_s > 1)$ وهذا يعني أن $V_p > V_s$ بمعنى أن عدد لفات الملف الابتدائي أكثر منها في الملف الثانوي $N_p > N_s$ وعندها ينتج التيار المتناوب المار في الملف الابتدائي تياراً متناوباً في الملف الثانوي جهده أقل من جهد التيار الابتدائي.

مسائل وتمارين

(1) يؤثر حقل مغناطيسي منتظم كثافة تدفقه $10 \times 200 \text{ m}^{-4}$ فيبر / م² في اتجاه عمودي في مستوى ملف مساحة مقطعه 100 سم² وعدد لفاته 50 لفة. فإذا أُبعد الملف عن الحقل خلال 0.1 ثانية. أوجد القوة المحركة التحريضية مقدرة بالفولط؟

(2) احسب معامل التحريض الذاتي لملف حلزوني داخله هواء طوله 1 م ومساحة مقطعه $10 \times 6 \text{ m}^{-4}$ وعدد لفاته 100 لفة، كذلك أوجد معامل تحريضه الذاتي إذا لف على قضيب من الحديد نفوذته النسبية 500.

(3) يوصل مصباح كهربائي مكتوب عليه 120 فولطاً، 60 واطاً بمنبع جهد متناوب جهده 120 فولطاً وتردده 60 ذبذبة في الثانية.

أوجد القيمة الفعالة وكذلك القيمة العظمى للتيار المار خلال فتيل المصباح. ثم احسب مقاومة المصباح.

(4) يدور ملف لمولد كهربائي (A-C generator) بسرعة ثابتة وبمعدل 1800 دورة في الدقيقة في حقل كهربائي منتظم كثافة تدفقه 8.5 فيبراً لكل متر مربع، فإذا كانت مساحة الملف 0.06 م² احسب:

أ. أقصى قيمة للقوة المحركة الكهربائية التحريضية المتولدة في الملف
المحتوي 25 لفة.

ب. القوة المحركة الكهربائية اللحظية في الملف عند دورانه زاوية قدرها
30 درجة عن وضعه الرأسي.

5) وصل مكثف سعته 0.05 ميكروفاراد على طرفي منبع لجهد متناوب قيمته
الفعالة 220 فولطاً وتردده 500 ذبذبة بالثانية.

أ. احسب التيار المار خلال دارة المكثف.

ب. احسب التيار المار بالدارة إذا استبدل المكثف بملف تحريضه الذاتي
0.20 هنري.

الفصل العاشر

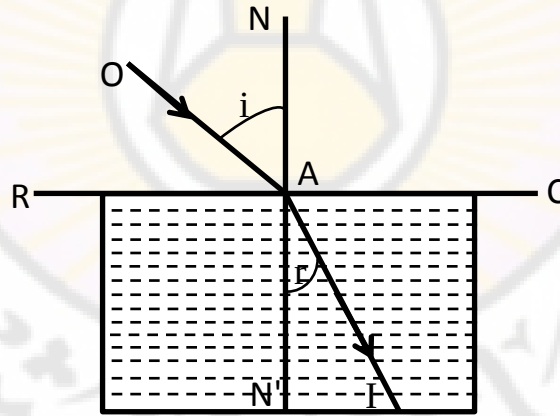
الانكسار والتبديد وتطبيقاتهما

Application of Refraction and Dispersion

10-1- الانكسار :refraction

إذا ورد الضوء بصورة مائلة من وسط شفاف إلى آخر عانى تغيراً في اتجاه انتشاره، نسمي هذه الحادثة الانكسار. وكنتيجة لهذه الحادثة تبدو المسطرة لدى غمسها بالماء بصورة مائلة وكأنها تعاني انكساراً عند الحد الفاصل بين الهواء والماء.

يبين الشكل (10-1) شعاعاً OA يرد بصورة مائلة على سطح الماء.



الشكل (10-1) انكسار الشعاع الضوئي لدى مروره من وسط شفاف لآخر

ولدى بلوغ الشعاع سطح السائل يعاني الشعاع OA تغيراً مفاجئاً في اتجاه انتشاره، ويتبع الخط AI : تسمى الزاوية $\hat{OAN}$ بين الشعاع الوارد OA والناظم NN' زاوية الورود ونرمز لها بـ $(\hat{i})$ في حين تسمى الزاوية $\hat{IAN'}$

زاوية الانكسار ونرمز لها بـ $(\hat{r})$. ولدى انكسار أي شعاع ضوئي يخضع الشعاع المنكسر إلى القوانين التالية:

1. إن الشعاع المنكسر والوارد والناظم على السطح تقع جميعها في مستوى واحد.

2. إن النسبة بين جيب زاوية الورود وجيب زاوية الانكسار ثابتة ومستقلة عن زاوية الورود.

يسمى القانون الثاني من قانوني الانكسار باسم قانون سنلز Snelli's law نسبة إلى مكتشفه.

تعتمد النسبة $\sin i / \sin r$ على طبيعة الوسطين على طرفي السطح الذي يحدث عنده الانكسار. ولمقارنة الانكسار في حالة أوساط مختلفة نعيد قياسات الانكسار إلى وسط وحيد ولقد اختير الخلاء Vacuum كوسيط عياري للمقارنة.

10-2- قرينة الانكسار Index of refraction:

تعرف قرينة انكسار وسط ما بأنها تساوي النسبة بين جيب زاوية الورود مقيسة في الخلاء إلى جيب زاوية الانكسار لدى قياسها في وسط آخر. فعندما نقول إن قرينة انكسار الزجاج هي 1.5 أو إن قرينة انكسار الماء هي 1.33 فإننا نعني أن الضوء يرد من الخلاء كوسط عياري قرينة انكساره الواحد إلى الوسط المعني. ويصبح قانون سنل كالآتي:

[قرينة انكسار وسط الورود × جيب زاوية الورود = قرينة انكسار وسط الانكسار × جيب زاوية الانكسار]
 فإن كان وسط الورود خلاءً فإن:

$$1 \sin i = n \sin r$$

هذا يعني أن قرينة انكسار الوسط الكاسر n تساوي إلى جيب زاوية الورود في الخلاء إلى جيب زاوية الانكسار في السطح المعني.
 ونورد في الجدول (10-1) قرائن الانكسار العائدة لعدد من المواد الشفافة. ويتضح من هذا الجدول أن قرينة انكسار الهواء لا تختلف عن الواحد إلا بمقدار ضئيل، وهذا يعني أن ورود الضوء من الخلاء أو من الهواء على وسط الانكسار لا يغير من الأمر شيئاً يذكر.

لقد قدم هويغنز تعليلاً واضحاً لسبب حادثة الانكسار. وفي الواقع فإنه عندما تنتقل موجة من وسط تسير فيه بسرعة V_1 إلى وسط آخر بسرعة V_2 فإن الأمواج تغير اتجاه انتشارها بحيث يكون $\sin i / \sin r = V_1 / V_2$ حيث تمثل (i) زاوية الورود و (r) زاوية الانكسار.

الجدول (10-1): قرائن الانكسار لبعض المواد
 من أجل $\lambda = 589 \text{ m}$ وهو ضوء الصوديوم

المادة	n.	المادة	n.
الهواء	1.00029	الغليسيرين	1.47
ثاني أكسيد الكربون	1.00045	الماء	1.333
بلسم كندا	1.53	الزجاج التاجي	1.52
الكحول الاتيلي	1.36	زجاج الفلنت	1.63
ثاني كبريتات الكربون	1.63	زجاج الفلنت الثقيل	1.66
الألماس	2.42	الكوارتز	1.54

ويمكننا بصورة عامة أن نكتب قرينة انكسار وسط ما على أنها تساوي:

$$n = \frac{\sin i \text{ (في الخلاء)}}{\sin r \text{ (في الوسط)}} = \frac{C}{V} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1 - 10)$$

حيث ترمز C إلى سرعة الضوء في الخلاء و V إلى سرعة الضوء في الوسط، فإن $n_1 = 1$ ونشير هنا أن $n \geq 1$ مهما كان الوسط.

10-3- قرائن الانكسار النسبية:

تم اختيار عند تعريف قرينة الانكسار أن يرد الضوء من الخلاء. إلا أنه غالباً ما نصادف أن يكون السطح الفاصل بين الوسطين الشفافين مغايراً كأن يكون الزجاج والماء مثلاً. إن قانوني الانكسار يبقيان قائمين في هذه الحالة أيضاً وتكون النسبة $\sin i / \sin r$ مساوية في هذه الحالة قرينة انكسار الوسط الثاني بالنسبة للوسط الأول وبصورة عامة فإن نسبة جيب زاوية الورود إلى جيب زاوية الانكسار تساوي نسبة سرعة الضوء في الوسط الأول V_1 إلى سرعة الضوء في الوسط الثاني V_2 أي أن قرينة انكسار الوسط الأول والتي نرمز لها بـ $n_{2,1}$ تعطى بالعلاقة:

$$n_{2,1} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2 - 10)$$

فإذا مر الضوء من وسط أكثر شفافية تكون سرعته فيه عالية أي ذو قرينة قليلة وليكن الخلاء لآخر تكون سرعته فيه أخفض أي ذو قرينة أكبر وليكن الماء فإن الضوء ينكسر مقترباً من الناطم، أما إذا كان الانتقال إلى وسط تكون السرعة فيه أعلى وذي قرينة قليلة فإن الضوء ينكسر مبتعداً عن الناطم.

ومن المفيد في حالة انتشار الضوء من وسط A إلى وسط B أن نكتب

قانون سنل كما يلي:

$$n_A \sin \theta_A = n_B \sin \theta_B \quad (3 - 10)$$

حيث ترمز n_A و n_B الى قرينتي انكسار الوسيطين، θ_A و θ_B إلى زاوية الشعاع مع الناظم في الوسيطين A و B. ويمكن تطبيق هذه العلاقة سواء كان شعاع الضوء يمر من A إلى B أو من B إلى A. فإذا كان الضوء يرد من B إلى A فإن قرينة انكسار الوسط A بالنسبة إلى B هي:

$$n_{A,B} = \frac{\sin \theta_B}{\sin \theta_A} = \frac{V_B}{V_A} = \frac{N_A}{N_B} \quad (4 - 10)$$

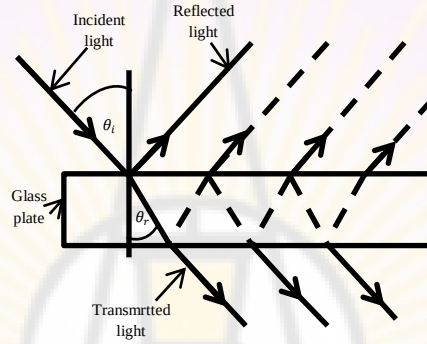
أما إذا كان الضوء يرد من A إلى B فإن قرينة انكسار الوسط B بالنسبة إلى A تكون:

$$n_{B,A} = \frac{\sin \theta_A}{\sin \theta_B} = \frac{V_A}{V_B} = \frac{N_B}{N_A} \quad (5 - 10)$$

10-4- انكسار الضوء في لوح زجاجي متوازي الوجهين:

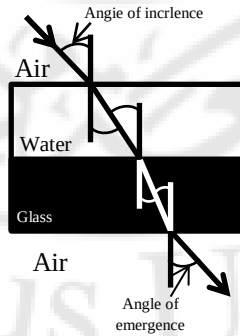
إذا ورد شعاع ضوئي من الخلاء أو الهواء على صفيحة زجاج متوازية الوجهين، فإن هذا الشعاع ينكسر مقترباً من الناظم لدى دخوله إلى الزجاج. وعند خروج الشعاع من جديد إلى الهواء ينكسر مبتعداً عن الناظم. ولما كان وجهها الصفيحة متوازيين فإن الناظم على الوجه الأول سيكون موازياً للناظم على الوجه الآخر وعليه فإن الزاوية θ_B بين الناظم والزجاج على كلا الوجهين ستكون واحدة. وبالتالي فإن اتجاه الشعاع البارز من الزجاج سيتفق مع اتجاه الشعاع الوارد. إلا أن الشعاع البارز سيكون منزاحاً انزياحاً جانبياً عن الشعاع الوارد.

إذا مر الضوء من وسط شفاف لآخر ذي خواص ضوئية مغايرة، حدث انعكاس للضوء عند الحد الفاصل بين الوسطين بالإضافة إلى الانكسار. ويبين الشكل (10-2) هذا الوضع بشكل رمزي. ولدينا انعكاس عند الوجه العلوي للصفحة بالإضافة إلى الوجه السفلي لها. ويقال عن الضوء الذي يعاني من انعكاسات عديدة إنه متعدد الانعكاس multiply reflected، وكذلك فإن الضوء الذي يعاني انكسارات عديدة إنه متعدد الانكسار multiply refraction.



الشكل (10-2) الانعكاس والانكسار على صفحة متوازية الوجهين

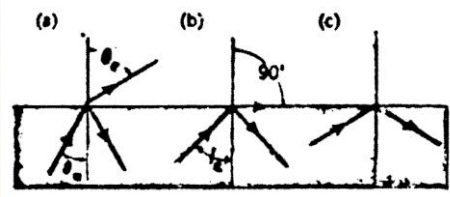
وإذا اخترق شعاع ضوئي وارد من الهواء طبقات متتالية من مادة شفافة كما في الشكل (10-3) فإنه يعاني انكساراً عند كل حد فاصل بين وسطين، وإذا عاد الشعاع إلى الهواء فإن اتجاهه لا يتغير، بيد أنه يعاني من انحراف جانبي عن اتجاه سيره الأصلي.



الشكل (10-3) سلوك شعاع ضوئي لدى مروره في عدة أوساط شفافة

10-5- الانعكاس الكلي total reflection

إذا ورد شعاع ضوئي من وسط كثيف ضوئياً أي ذي قرينة كبيرة كالماء مثلاً إلى وسط أقل كثافة أي ذي قرينة أقل كالهواء فإنه ينكسر مبتعداً عن الناظم، وعليه فإن زاوية الانكسار تكون أكبر من زاوية الورود انظر إلى الشكل (10-4a). وإذا ازدادت زاوية الورود، وبلغت زاوية الانكسار الزاوية 90° برز الشعاع المنكسر موازياً للسطح الفاصل بين الوسطين. تسمى زاوية الورود التي تبلغ من أجلها زاوية الانكسار القيمة 90° باسم الزاوية الحرجة θ_c (Critical angle).



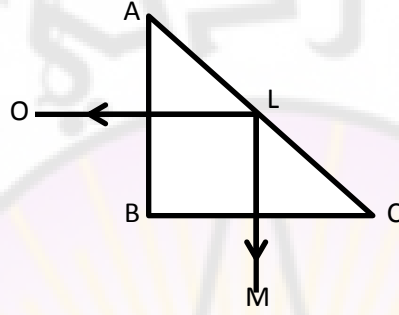
الشكل (10-4)

- a. الشعاع ينكسر مبتعداً عن الناظم ($\theta_A < \theta_c$)
- b. عند الزاوية الحرجة يبرز الشعاع موازياً للسطح ($\theta_A = \theta_c$)
- c. الضوء ينعكس انعكاساً كلياً ($\theta_A > \theta_c$)

أما ازدادت زاوية الورود على الزاوية الحرجة فإن الضوء لا يبرز إلى الوسط الأقل كثافة ضوئية بل كله ينعكس دون بروز أو انكسار. وفي هذه الحالة نقول إنه يحدث للضوء انعكاس كلي.

هذا يعني أنه يحدث الانعكاس الكلي عند السطح الفاصل بين وسطين لدى محاولة الضوء الخروج من الوسط الأعلى قرينة إلى الوسط الأقل قرينة، وعندما تكون زاوية الورود أكبر من الزاوية الحرجة.

إن الموشور ABC في الشكل (5-10) يسبب انعكاساً كلياً للشعاع OL وذلك لأن زاوية ورود الشعاع هي 45° وهي تزيد على الزاوية الحرجة المقابلة للزجاج.



الشكل (5-10). الانعكاس الكلي في موشور قائم الزاوية متساوي الساقين.

ثمة تطبيقات عديدة لظاهرة الانعكاس الكلي. فيمكن أن يُرسل الضوء عبر ليف زجاجي على الرغم من انحناء الليف. فلدى ارتطام الضوء بجدار الليف بزاوية ورود أكبر من الزاوية الحرجة يحدث انعكاس كلي للضوء فيتابع الضوء مسيره حتى يبلغ نهاية الليف حيث تكون زاوية الورود أقل من الزاوية الحرجة فيخرج الضوء منه. ويمكن استخدام الألياف الزجاجية هذه لإنارة مناطق العمليات في مواضع يصعب فيها إنارة مصباح بسبب الحرارة المنتشرة منه أو ضيق المكان. ويمكن للضوء أن يُرسل في نافورة ماء وفي الحقيقة فإن النوافير الملونة يعتمد عملها على الانعكاس الكلي فهي تُبقي على الضوء في خيط الماء حتى يرد الضوء بزاوية أقل من الزاوية الحرجة فيخرج الضوء منه.

مثال (1-10):

إذا علمت أن زاوية قرينة انكسار الماء هي 1.33 فما هي الزاوية الحرجة للضوء الوارد من الماء إلى الهواء؟

الحل:

لدينا في الحالة العامة ومن أجل ضوء يمر من الوسط A إلى الوسط B ما يلي:

$$n_A \sin \theta_A = n_B \sin \theta_B$$

وهنا يكون:

$$n \times \sin i_c = n \times \sin 90^\circ$$

$$\text{ماء} \quad \text{هواء}$$

$$1.33 \times \sin i_c = 1.00 \times 1$$

$$\sin i_c = 0.75$$

$$i_c = 49^\circ$$

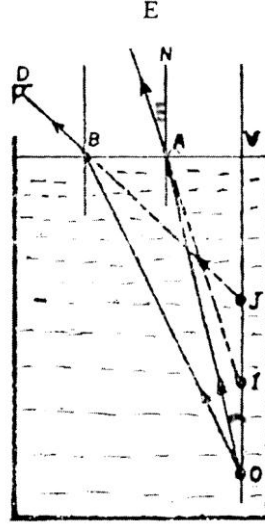
10-6- العمق الظاهري والعمق الحقيقي لجسم مُلقى في وسط

شفاف:

إذا أُلقي جسم في وسط شفاف كالماء بدا هذا الجسم أقرب إلى الناظر من وضعه الحقيقي، وليس هذا إلا نتيجة مباشرة لظاهرة الانكسار. لننظر في الشعاعين (OA) و (OB) الصادرين عن جسم غاطس في الماء كما في الشكل (10-6) إن كلا الشعاعين ينكسر مبتعداً عن الناظم عند السطح. وترى العين عند E الضوء وكأنه وارد من النقطة I في حين ترى العين عند D وكأن الضوء وارد من النقطة J. وحسب قانون سنل: $n \sin i = 1 \sin r$

فإن قرينة انكسار الوسط الكاسر (الماء) تعطى بالعلاقة:

$$n = \frac{\sin r}{\sin i} \Rightarrow n = \frac{\sin EAN}{\sin AOV} = \frac{\sin AIV}{\sin AOV} = \frac{AV/IA}{AV/OA} = \frac{OA}{IA} \quad (6 - 10)$$



الشكل (6-10) العمق الظاهري لجسم ملقى في الماء هو أقل من العمق الحقيقي بمقدار يتعلق بزاوية الورود

أما إذا تلقت العين الضوء القريب من الناظم على السطح فإننا نستطيع أن نكتب بدلاً من OA المقدار OV وبديلاً من IA المقدار IV ويكون عندها:

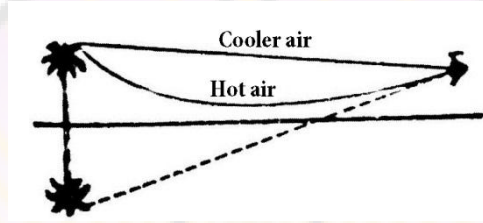
$$n = \frac{OV}{IV} = \frac{\text{العمق الحقيقي للجسم}}{\text{العمق الظاهري للجسم}} = \frac{p}{q} \quad (7-10)$$

وبما أن $n > 1$ فإن العمق الحقيقي للجسم < عمقه الظاهري. وكلما زادت زاوية ميل النظر إلى الجسم المغمور قل عمقه الظاهري.

10-7- الانكسار الجوي وحادثة السراب:

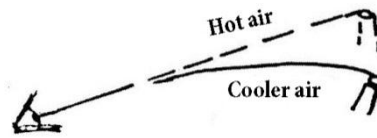
على الرغم من أن قرينة انكسار الهواء لا تختلف عن الواحد في الظروف العادية إلا بمقدار لا يزيد على 0.03 بالمئة فإن الانكسار الجوي لا يمكن إهماله في بعض الحالات. ولعل أكثر الظواهر إثارةً بهذا الخصوص حادثة السراب ففي يوم شديد الحرارة تتكون طبقة من الهواء مارة على تماس

مع الأرض. ولهذا الهواء كثافة أخفض وبالتالي قرينة انكساره أقل من قرينة انكسار الهواء فوقها. يرد الضوء من قمة شجرة عالية على هذه الطبقة من الهواء الساخن بزاوية ورود كبيرة فيحدث له انعكاس كلي كما هو واضح في الشكل (7-10). ويبدو الضوء في هذه الحالة وكأنه قادم من خيال الشجرة تماماً كما يحدث فيما لو حدث الانعكاس عن سطح البحيرة.



الشكل (7-10) نلاحظ حادثة السراب عندما يكون الهواء المجاور للأرض أكثر حرارة من الهواء الذي يعلوه.

أما إذا كان الهواء الملاصق أبرد بكثير من الهواء فوقه فإن الأشعة الضوئية تنكسر نحو الأسفل كما يوضح ذلك الشكل (8-10). فخيال سفينة يبدو أعلى من السفينة ذاتها وهو ضرب من ضروب السراب يدعى Looming. ويحدث هذا النوع من السراب إذا نظر راصد إلى أرض مغطاة بالثلج أو ماء شديد البرودة بالنسبة للهواء الذي يعلوه.



الشكل (8-10) تنكسر الأشعة الضوئية نحو الأسفل إذا كان الهواء المجاور للأرض أبرد بكثير من الهواء الذي يعلوه.

وإذا نظر مشاهد إلى موقد أو رصيف معرض لأشعة الشمس الحارة لاحظ تموجاً في الهواء الصاعد ويعود هذا إلى انكسار الضوء لدى مروره من المنطقة الباردة إلى الحارة فالباردة. ويعود تألق ضوء النجوم إلى ظاهرة مماثلة فالضوء هنا يخترق طبقات غير مستقرة من الهواء وبالتالي تتغير قرائن انكسارها باستمرار.

إن الشعاع الضوئي الذي يدخل الغلاف الجوي قادماً من الشمس أو من أي جرم سماوي يعاني من الانكسار ما لم يكن دخوله بزاوية ورود مساوية للصفر. ولهذا يبدو ارتفاع الشمس أعلى من قيمته الحقيقية وينبغي إدخال التصحيح على قياس ارتفاع الشمس الظاهري. ويصعب حساب هذا التصحيح بسبب اختلاف كثافة الغلاف الجوي. وعادة ما يبلغ التصحيح بحدود نصف درجة عندما تكون الشمس قريبة من الأفق. وهذا التصحيح يزيد على الزاوية التي تُرى فيها الشمس من الأرض بمقدار ضئيل. وعندما تكون الشمس في الأفق تبدو الشمس مرتفعة بمقدار يزيد على قطرها بقليل. وعليه فإن الشمس تكون في الواقع تحت الأفق عندما ننظر إليها عند الشروق وعند الغروب. وعندما تكون الشمس (أو القمر) قريباً من الأفق فإن الأشعة الواردة إلينا من جزئها السفلي تعاني انكساراً أكبر من الانكسار الذي تعانيه الأشعة الواردة من جزئها العلوي. وهذا يسبب انكماشاً في قطرها الشاقولي ولذا تبدو الشمس مفلطحة أو إهليلجية عندئذٍ.

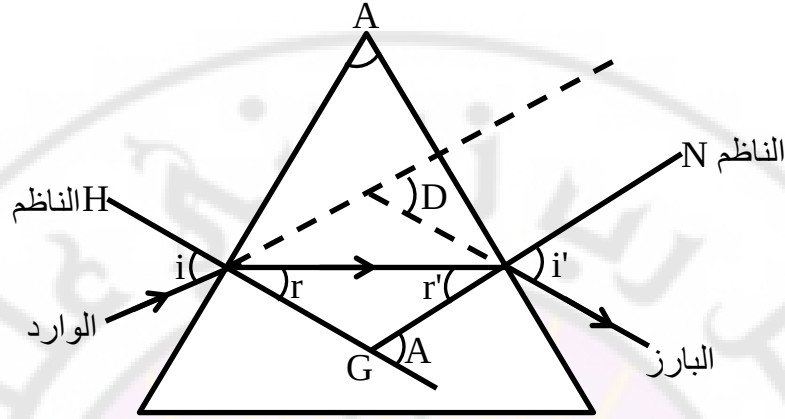
10-8- الانكسار في الموشور (Prism):

يُسمى موشوراً كل وسط كاسر على هيئة وتد محدود بسطحين مستويين. فإذا كانت مادة الموشور أكثر كثافة ضوئية من الوسط المحيط به فإن شعاعاً ضوئياً وارداً على أحد وجهيه ينكسر مقترباً من الناطم لدى دخوله الموشور. ولدى بروز الشعاع من الوجه الآخر للموشور ينكسر الشعاع مبتعداً عن الناطم لخروجه من وسط أكثر كثافة ضوئية (إن كلمة كثافة ضوئية تعني في علم الضوء قرينة الانكسار). تسمى الزاوية D في الشكل (9-10) التي ينحرف فيها الشعاع البارز عن ممد الشعاع الوارد باسم زاوية الانحراف $\text{angle of deviation}$.

وعندما تكون زاوية ورود الشعاع على أحد وجهي الموشور مساوية لزاوية بروزه من الوجه الآخر فإن زاوية الانحراف تكون في قيمتها الدنيا وتعرف عندها بزاوية الانحراف الأصغري.

يمكننا عن طريق قياس زاوية الانحراف الأصغري وقياس زاوية رأس الموشور معرفة قرينة انكسار المادة التي صنع منها الموشور.

لنفرض A زاوية رأس الموشور ولنرمز لـ D إلى زاوية الانحراف الأصغري و n إلى قرينة انكسار الموشور.



الشكل (10-9) الانكسار في الموشور.

بما أن الورود من الخلاء (قرينة انكساره الواحد) إلى الموشور (قرينة انكساره n) يمكننا من قانون سنل في الانكسار أن نكتب:

$$1 \sin i = n \sin r$$

$$\therefore n = \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} \quad (8 - 10)$$

نحسب كلاً من $\hat{i}$ و $\hat{r}$ ثم نعوض:

لما كان مجموع الزاويتين بين وجهي الموشور داخلاً والزاوية بين HG و NG داخلاً يساوي 180° فإنه يكون:

$$\hat{A} = \hat{r} + \hat{r}' \quad (9 - 10)$$

إن الانحراف عند الوجه الأول يساوي $(i-r)$ والانحراف عند الوجه الثاني يساوي $(i' - r')$ وعليه فالانحراف الكلي:

$$\hat{D} = \hat{i} - \hat{r} + \hat{i}' - \hat{r}' = \hat{i} + \hat{i}' - (\hat{r} + \hat{r}')$$

$$\therefore \hat{D} = \hat{i} + \hat{i}' - \hat{A} \quad (10 - 10)$$

ويكون الانحراف أصغرياً عندما تتساوى زاوية الورود مع زاوية البروز. في هذه الحالة يكون:

$$\hat{i} = \hat{i}' , \quad r = r' , \quad \hat{A} = 2\hat{r} , \quad \hat{D} = 2\hat{i} - \hat{A} \Rightarrow$$

$$\hat{r} = \frac{\hat{A} + \hat{D}}{2}$$

$$\hat{r} = \frac{A}{2}$$

نعوض في المعادلة (8-10) $\Longleftarrow$

$$\therefore n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin\left(\frac{A+D}{2}\right)}{\sin(A/2)}$$

مثال (1-2):

تبلغ زاوية الانحراف الأصغري في موشور زاوية رأسه 60° مقدار (48°) .
احسب قرينة انكسار مادة الموشور.

الحل:

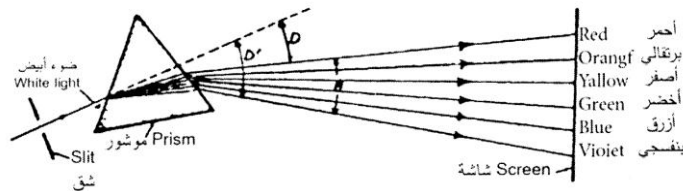
لدينا:

$$n = \frac{\sin\left(\frac{A+D}{2}\right)}{\sin(A/2)}$$

$$\therefore n = \frac{\sin 54^\circ}{\sin 30^\circ} = \frac{0.908}{0.500} = 1.62$$

10-9- تبديد الضوء في الموشور:

إذا وردت حزمة ضوئية ضيقة على موشور في غرفة مظلمة على النحو المبين في الشكل (10-10) فإن الضوء يبرز من الطرف الآخر على هيئة عصابات ملونة تدعى طيفاً.



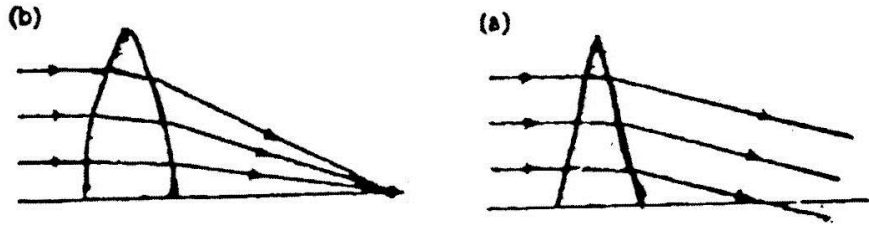
الشكل (10-10) تحليل الضوء الأبيض إلى مركباته في الموشور.

ينحرف الضوء البنفسجي ذو الطول الموجي الأقصر أكبر انحراف في حين ينحرف الضوء الأحمر ذو الطول الموجي الأكبر أقل انحراف. تسمى عملية تفريق الضوء الأبيض إلى الألوان المختلفة باسم التبديد dispersion. لما كانت الألوان المختلفة تنحرف بمقادير مختلفة في الموشور فإنه يتضح أن قرينة الانكسار وكذلك سرعة الضوء في الموشور ينبغي أن تكون مختلفة بالنسبة للألوان المختلفة. ففي الزجاج التاحي تزيد سرعة الضوء الأحمر بمقدار واحد بالمائة على سرعة الضوء البنفسجي فيه.

10-10- العدسات البسيطة:

تصنع العدسات من مادة شفافة وتستخدم لتجميع الضوء أو تفريقه وفي العدسات البسيطة يكون سطح العدسة عبارة عن مقاطع من سطوح كروية. لننظر في حزمة أشعة متوازية ترد على الموشور في الشكل (11a-10) إن الموشور يحرف الأشعة إلا أن الأشعة بعد بروزها من الموشور تبقى متوازية مع بعضها بعضاً. فإذا رغبتنا في تجميع هذه الأشعة في نقطة محددة وجب حرف الشعاع الأعلى في الحزمة انحرافاً أكثر من الشعاع الأدنى فيها. ويمكن تحقيق ذلك بشحن سطحي الموشور حتى يأخذ الشكل المبين بالشكل (10-11b) فإذا جعل سطحاً صفيحة زجاجية ثخينة على هيئة مقاطع من كرات صغيرة فإن انحراف الضوء بفعل المقطع العلوي سيكون أعظم انحرافاً. وبالطبع فإن هذا لا يضمن أن تبرز الأشعة المتوازية من العدسة لتتمر في النقطة ذاتها. إلا أنه إذا لم نختار مقاطع كروية كبيرة فإن الأشعة المتوازية تبرز من العدسة مارة من النقطة ذاتها تقريباً.

تسمى العدسة مقربة Converging إذا قامت بتجميع الحزمة المتوازية في نقطة واحدة. أما إذا كان تباعد بين الأشعة المتوازية بعد بروزها من العدسة فيقال عن العدسة إنها مبعّدة diverging.



الشكل (10-11)

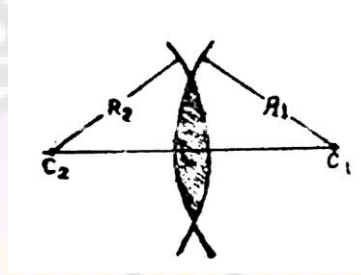
a- يحرف الموشور الأشعة المتوازية بحيث تبقى متوازية بعد بروزها منه.
b- إن العدسة ذات السطحين الكرويين تجمع الأشعة المتوازية في نقطة.
وإذا استخدم الزجاج أو المواد البلاستيكية لتصنيع العدسات فإن العدسة تكون مقربة Converging إذا كانت ثخينة في المنتصف ورقيقة في الأطراف أي محدبة، وتكون مبعّدة Diverging إذا كانت ثخينة في الأطراف ورقيقة في المنتصف أي مقعرة ويبين الشكل (10-12) ستة أنواع من العدسات الكروية والأسماء التي تعرف بها، ويجب أن نلاحظ أن العدسة المحدبة هي مقربة والمقعرة هي مبعّدة.



الشكل (10-12) أشكال العدسات الكروية وهي من اليسار إلى اليمين.

محدبة الوجهين، مستوية محدبة، مقعرة محدبة، محدبة مقعرة، مستوية مقعرة، مقعرة الوجهين.

لننظر في عدسة الشكل (10-13). إن السطح الأيسر هو جزء من سطح كروي مركزه النقطة C_1 في حين أن السطح الأيمن هو جزء من سطح كروي مركزه النقطة C_2 .



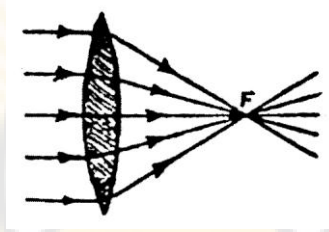
الشكل (10-13) عدسة محدبة الوجهين.

نسمي المحور الأصلي للعدسة الخط الواصل بين مركزي تقعر سطحي العدسة. وإذا كان أحد سطحي العدسة مستوياً فنعرّف المحور الأساسي لها بأنه الخط العمودي النازل من مركز تقعر أحد السطحين على السطحين المستوي للعدسة.

إن الأشعة المتوازية التي ترد على عدسة مقربة موازية لمحورها الأصلي تتقارب من نقطة تدعى المحرق الأصلي كما هو واضح في الشكل (10-14). وإذا ما وردت الحزمة الموازية للمحور الأصلي على أي من وجهي العدسة فإنها تنحرف بالمقدار ذاته وتمر بعد بروزها من العدسة من المحرق الأصلي في الطرف المقابل. ويكون المحرق الأصلي في العدسات الرقيقة متناظراً بالنسبة إلى جسم العدسة. ونعني بالعدسة الرقيقة العدسة التي يكون ثخنها مهملًا تجاه المحرق الرئيسي وكذلك تجاه أبعاد الجسم وخياله.

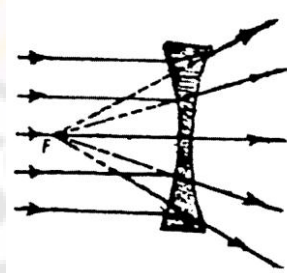
إذا وردت حزمة متوازية على عدسة فإن صدر الموجة يكون مستوياً عمودياً على الحزمة. إن جزء صدر الموجة المار من حواف العدسة يخترق العدسة قبل الجزء المركزي حيث أن سماكة الزجاج التي يخترقها تكون أقل وسرعته فيه أقل من سرعته في الهواء. ويمكن البرهان بفضل مبدأ هوينغز أن صدر الموجة عند بروزه من العدسة سيكون كروياً ومتقارباً في المحرق الأصلي.

أما في حالة عدسة مبعدة فإن الحزمة الموازية للمحور الأصلي تنحرف بعد بروزها من العدسة على النحو المبين في الشكل (10-15).



الشكل (10-14)

نحرف العدسة المقربة الأشعة الموازية لمحورها الأصلي بحيث تجمعها وتتمر من محرقها الأصلي.



الشكل (10-15)

تحرف العدسة المبعدة الأشعة الموازية لمحورها الأصلي بحيث تفرقها وتبدو وكأنها صادرة من محرقها الوهمي

فالأشعة البارزة لا تتقاطع أبداً بعد بروزها وتبدو وكأنها صادرة من

محرق أصلي وهمي F .

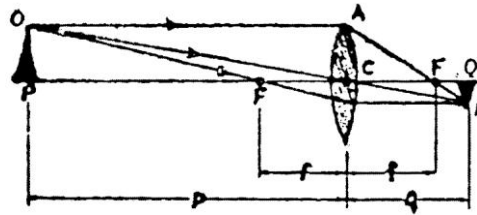
10-11- الأشعة الرئيسية في العدسات:

يبين الشكل (10-16) جسماً (OP) يبعد مسافة P عن عدسة مقربة.

إن كل شعاع صادر من النقطة O من الجسم يبرز من العدسة ماراً من خيالها (I) . ولقد بينا في الشكل (10-16) ثلاثة إشعاعات فقط. ولذا فإن النقطة (I) تسمى خيال النقطة O ، وخیال الجسم OP هو IQ وهو في هذه الحالة خيال حقيقي ومقلوب.

يظهر من الرسم أن هناك ثلاثة إشعاعات رئيسية في العدسات تماثل الأشعة الثلاثة في حالة المرايا وهذه الأشعة هي:

(1) الشعاع الموازي للمحور الأصلي للعدسة وهو ينكسر بعد بروزه من العدسة ماراً من المحرق الأصلي في العدسة المقربة. أو ينكسر وكأنه بارز من المحرق الأصلي في حالة العدسة المبعدة.



الشكل (10-16) الخيال الذي تشكله عدسة مقربة لجسم يوضع أمامها.

(2) الشعاع المار من المحرق الأصلي لعدسة يبرز موازياً لمحورها الأصلي.

(3) الشعاع المار من المركز البصري لعدسة يمر منها دون أن يعاني أي انحراف.

ويمكننا أن نتخذ كمرکز بصري للعدسة الرقيقة المركزية في العدسة.
إن هذه الأشعة الثلاثة واضحة في الشكل (16-10) وهي على الترتيب الأشعة
OAFI، OFI ثم OCI.

10-12- ضم العدسات:

إذا مر الضوء من عدسة أولى ثم إلى عدسة ثانية فإنه بإمكاننا حساب
موضع الخيال النهائي في جمل العدستين بتطبيق قانون العدسات مرتين. فالجسم
بالنسبة للعدسة الثانية هو الخيال الذي شكلته العدسة الأولى. وإذا اعترضت
العدسة الثانية سبيل الأشعة قبل تقاطعها فإن الجسم بالنسبة للعدسة الثانية يؤخذ
كما لو لم تكن العدسة الثانية هناك. فالبعد الجسمي في هذه الحالة للعدسة الثانية
سالب وذلك لأن الضوء ينحرف بفعل هذه العدسة قبل تشكل الجسم بالنسبة لها.
وإذا كان هناك عدسة ثالثة فإن الخيال الذي تشكله العدسة الثانية هو بمثابة
الجسم للعدسة الثالثة. والخيال النهائي في جملة بصرية معقدة كذلك المستخدمة
في كاشف المحيط (Periscope) في الغواصات يمكن إيجاده بتطبيق متتال
لعلاقات المرايا والعدسات. وفي كل حالة يكون الجسم بالنسبة لأي عنصر
بصري هو الخيال الذي شكله العنصر السابق له. وبالطبع ينبغي الانتباه لإعطاء
الإشارات الصحيحة للأبعاد المختلفة.

إن مقلوب البعد المحرقي مقدراً بالأمتار يسمى الاستطاعة الديوبترية
للعدسة (dioptric power) وتقدر بالديوبتر. فبالنسبة لعدسة بعدها المحرقي
50cm تكون استطاعتها الديوبترية $p = 1/0.5 = 2$ dioptre. وتتراوح

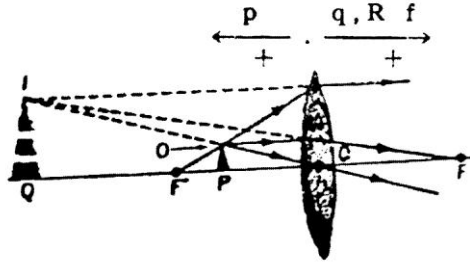
استطاعة العدسات المستخدمة في تصنيع النظارات الطبية بين 4 ديوبتر و 0.2 ديوبتر.

ولعل أهم ميزة لاستخدام مفهوم الاستطاعة الديوبترية يكمن في أنه لدى جمع عدستين رقيقتين إلى بعضهما تكون الاستطاعة الديوبترية لمجموعهما تساوي مجموع الاستطاعة الديوبترية لكل منهما ذلك أنه إذا كان f البعد المحرقي للعدسة المكافئة لمجموع العدستين الرقيقتين f_1 و f_2 كان لدينا:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (11 - 10)$$

10-13- عدسة التصوير عن بعد Telephoto lens:

ثمة تطبيق مفيد لضم عدستين يكمن في عدسة التصوير عن بعد. لتشكيل خيال مكبر لجسم بعيد باستخدام عدسة وحيدة ينبغي أن يكون البعد المحرقي لها كبيراً. وهذا يجعل آلة التصوير ذات طول غير مناسب حيث أن طول آلة التصوير ينبغي أن يساوي البعد المحرقي للعدسة تقريباً. ويمكن تجنب ذلك باستخدام عدسة التصوير عن بعد التي تتألف من زوج عدسات مقربة A ومبعدة B تفصل بينهما مسافة d . إن العدسة المقربة A تشكل للجسم البعيد خيلاً يبعد قليلاً عن بعدها المحرقي F_1 إلا أن العدسة الثانية B تجعل الخيال يتشكل عند المحرق F' . إن الخيال المتشكل عند F'' أكبر من الخيال المتشكل عند F_1 وهكذا يزداد تكبير جملة العدستين دون زيادة محسوسة في طول آلة التصوير.



الشكل (10-17) عدسة التصوير عن بعد.

مثال (10-3):

تستخدم عدسة التصوير عن بعد المبينة في الشكل (10-19) لالتقاط صورة في لعبة كرة القدم. إن البعد المحرقي للعدسة A هو 12cm وللعدسة B هو 6cm وتفصل بينهما مسافة 8cm. فإذا كان المشاهد يبعد عن آلة التصوير مسافة 100m فأوجد بعد الخيال النهائي في جملة العدستين وكذلك تكبيره. ما هو البعد المحرقي اللازم لعدسة وحيدة كي تقوم بالعمل ذاته ولتشكيل خيال بالأبعاد ذاتها. ما هو طول آلة التصوير عندئذ؟

الحل:

لدينا بالنسبة للعدسة A:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{100} + \frac{1}{q} = \frac{1}{0.12} \Rightarrow q = 0.1202m = 12.02cm$$

ويكون طول الخيال مساوياً: $\frac{0.12}{100}$ من طول الجسم.

ولدينا أيضاً:

$$\frac{1}{-4.02} + \frac{1}{q} = \frac{1}{-6} \Rightarrow q = 12.2cm$$

ويكون طول الخيال الثاني مساوياً $\frac{12.2}{4.02}$ من طول الخيال الثاني.

$$\text{أي: } \text{طول الجسم الأصلي} \times \frac{0.12}{100} \times \frac{12.2}{4.02}$$

ويكون التكبير مساوياً: 0.00364

ويكون بعد الفيلم عن العدسة A مساوياً $20.2\text{cm} = 12.2 + 8$ وإذا

استخدمت آلة تصوير بعدسة وحيدة لتشكيل الخيال بالأبعاد ذاتها كان لدينا:

$$p = 100\text{cm}, \quad q = 0.00364 \quad p = 0.364\text{m}$$

$$\frac{1}{100} + \frac{1}{0.364} = \frac{1}{f} \Rightarrow f = 0.362\text{m}$$

إن الطول الأدنى لآلة التصوير في هذه الحالة سيساوي المسافة من

العدسة إلى الفيلم وهي 36.4cm . وسيكون طول آلة التصوير في هذه الحالة

مساوياً ضعف طول آلة التصوير التي تستخدم عدسة تصوير عند بعد تقريباً.

الفصل الحادي عشر

الليزر وتطبيقاته Laser and Application

11-1- تمهيد:

تشكل كلمة Laser من الأحرف الأولى للعبارة الإنكليزية التالية:

Light amplification by the stimulated emission of radiation

وهي تعني حرفياً تضخيم الضوء بطريقة الإصدار المحثوث للإشعاع. ولقد احتفظت معظم اللغات بالأصل الإنكليزي Laser مع تصرف قليل باللفظ. فقد عُرِبَت هذه الكلمة بـ ليزر.

والليزر جهاز يولد حزمة ضوئية. وضوء الليزر أشد بكثير من الضوء الذي تصدره المصادر الأخرى، ويتمتع بخاصة الترابط (Coherence) وهي خاصة لا تتمتع بها الحزم الضوئية العادية. كما أن انتشاره الزاوي Angular spread أصغر بكثير من الانتشار الزاوي للحزم الضوئية العادية.

ولكي ندرس أسس عمل الليزر لا بد أن ننظر في آليتي امتصاص الضوء وإصداره. فالضوء ضرب من ضروب الطاقة يأخذ شكل أمواج كهرومغناطيسية (electromagnetic waves) وهو ينطلق إثر تحول طاقة من شكل ما إلى شعاع كهرومغناطيسي.

إن الميزتين الأساسيتين للموجة الضوئية (light waves) هما طول الموجة (wave length) والتواتر (frequency). فالأمواج الضوئية قصيرة جداً، ويتراوح طولها بين 350 nm ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$) للضوء البنفسجي

و 700 nm للضوء الأحمر. أما تواتر الموجة الضوئية فعال جداً ويتراوح بين $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ للضوء الأحمر و $8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ للضوء البنفسجي.

هذا يعني أن أهم مميزات هذه الموجة الكهرومغناطيسية أنها تنتشر في الخلاء دون تخامد، وإن سرعة انتشارها هي سرعة الضوء C والمسافة الفاصلة بين ذروتين متتاليتين تسمى طول الموجة λ . توجد علاقة تربط بين التواتر وطول الموجة، في الخلاء

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1 - 11)$$

بحيث λ بالمتر، C بالمتر/ثا، f بالهرتز.

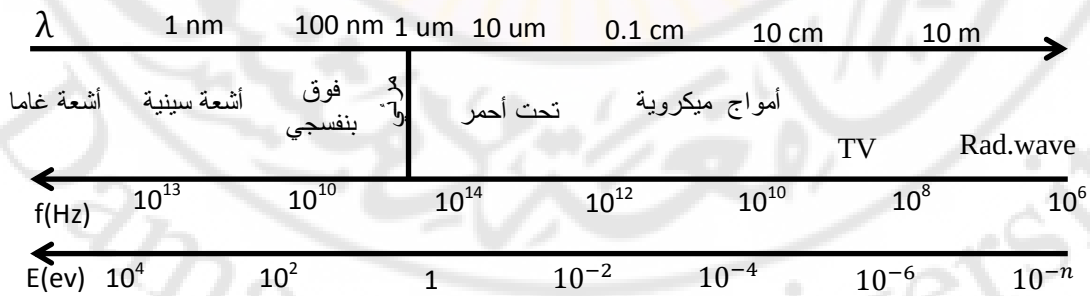
إذا فحصنا الضوء الصادر عن أنبوب انقراغ (discharge tube) حاوٍ على بخار الزئبق، بجهاز تحليل طيفي فإننا نشاهد طيفاً خطياً، كل خط فيه هو ضوء ذو تواتر وحيد. وعليه فإن الضوء الصادر عن مجموعة ذرات (atoms) متماثلة يتألف من تواترات عديدة متميزة بعضها من بعض. ولكي نفسر ذلك لا بد من النظر في الظروف التي يجب تحققها كي يصدر الضوء.

يتولد الضوء أصلاً في الجمل الذرية، أو الذرات المنفردة. للإلكترون في كل ذرة مدارات (orbits) ممكنة عديدة. وترتبط طاقة الإلكترون بالمدار الذي يشغله. وقد ينتقل الإلكترون من مدار إلى آخر في الذرة نفسها، وهو إذا فعل ذلك تغيرت طاقته. ولكي نجعل الإلكترون ينتقل من مدار إلى آخر تكون طاقته فيه أعلى، لا بد من تقديم طاقه له من خارج الذرة. أما إذا تحرك الإلكترون من مدار إلى آخر طاقته أخفض، فإنه يجب انتزاع الطاقة الفائضة. والطريقة المألوفة في انتزاع هذه الطاقة الفائضة هي انطلاق دفعة (burst) من

الإشعاع الكهرومغناطيسي من الذرة. ان أمد هذه الدفعة قصير للغاية فهو يقارب 5×10^{-8} ثانية وتحتوي على 10^6 موجة، وتؤلف هذه الأمواج العديدة قطاراً موجياً طوله 50 سنتيمتراً تقريباً يعرف باسم فوتون (photon).

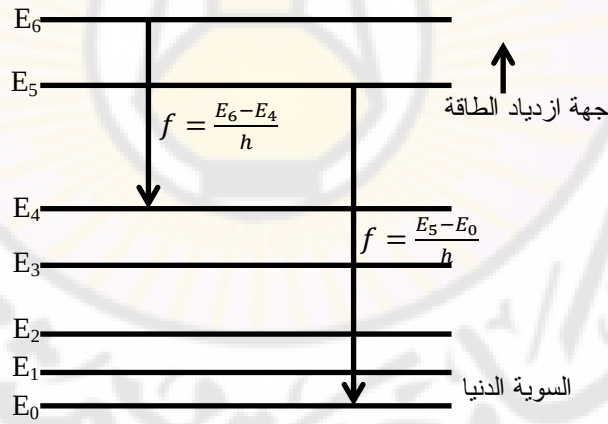
إن تواتر الضوء الصادر تابع لمقدار الطاقة التي تحولت إلى إشعاع. ويعطي القانون $E = h \cdot f$ تواتر الضوء ورمزه f بدلالة ثابت بلانك h والطاقة E التي تحولت إلى إشعاع. ويتضح من هذه العلاقة ان اصدار موجة بتواتر عال، كالضوء الأزرق مثلاً، يحتاج إلى طاقة أعلى من الطاقة اللازمة لإصدار موجة بتواتر أخفض كالضوء الأحمر.

تعرف الطاقات الممكنة للإلكترون في الذرة بسويات الطاقة (energy Levels) فالأمواج الضوئية قصيرة جداً ويتراوح طولها الموجي λ ما بين 350 nm للضوء البنفسجي و 700 nm للضوء الأحمر أما تواتر الموجة الضوئية f فهو فعال جداً ويتراوح ما بين $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ للضوء الأحمر و $8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ للضوء البنفسجي. ولننظر إلى الشكل (11-1) حيث تظهر نظرة إجمالية للإشعاعات الكهرومغناطيسية.



الشكل (11-1) نظرة إجمالية للإشعاعات الكهرومغناطيسية

إن مستويات الطاقة للذرة عديدة إلا أنها مستويات محددة وتختلف من ذرة لأخرى. ومن المفيد أن نلجأ إلى استخدام الشكل (2-11) الذي يمثل مخطط مستويات الطاقة إذا أردنا شرح انتقالات الإلكترون. فكل خط أفقي في هذا الشكل يمثل سوية طاقة ممكنة في الذرة. وتزداد الطاقة في هذا الشكل كلما اتجهنا نحو الأعلى. وتعرف أخفض سوية للطاقة باسم السوية الدنيا (ground level)، وهي سوية يحتلها الإلكترون في الظروف العادية. وقد تكفي الطاقة الحرارية في بعض الأحيان لرفع الإلكترونات إلى مستويات تعلو بقليل عن السوية الدنيا، إلا أنه غالباً ما نحتاج إلى طاقات أعلى من هذه لرفع الإلكترونات إلى مستويات أعلى. وإحدى الطرائق التي يمكن استخدامها لتأمين الطاقة اللازمة هي طريقة امتصاص الضوء (absorption of light).

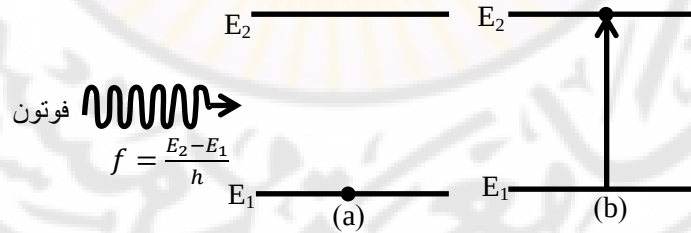


الشكل (2-11) مخطط مستويات الطاقة

2-11 - امتصاص الضوء:

يصدر الضوء على هيئة فوتونات كاملة، وهو إذا امتص فيمتص على هيئة فوتونات كاملة كذلك، وإلا فلن يحدث له امتصاص أبداً. ولكي نقفل

الالكترونات من سوية طاقة ما في الذرة الى خارجها تماماً، لا بد من أن يمتص فوتون تساوي طاقته على الأقل وهو خارج الذرة عن طاقته وهو داخلها. أما إذا كانت طاقة الفوتون أقل من هذه القيمة، فإن الالكترون لا يعاني أي اضطراب ولا يحدث امتصاص للفوتون. وإذا زادت طاقة الفوتون على الفرق بين الطائقتين حدث امتصاص للفوتون، وينطلق الالكترون من الذرة حاملاً معه فائض طاقة الفوتون على هيئة طاقة حركية. فإذا كان فضل الطاقة E فإن تواتر الاشعاع الذي يستطيع اقتلاع الالكترون من الذرة يجب أن يساوي E/h أو أن يزيد عليه. أما إذا كنا نرغب في رفع الالكترون من سوية طاقة محددة E_1 ضمن الذرة الى سوية أخرى محددة E_2 فإنه يجب أن يحمل الفوتون كمية الطاقة $E_2 - E_1$ تماماً ويكون تواتر الاشعاع اللازم $f = (E_2 - E_1)/h$ ، وهنا أيضاً يمتص الفوتون امتصاصاً كاملاً كما يتضح من الشكل (3-11). ولن يؤثر فوتون تواتره أدنى من هذا الحد أو أعلى منه في الالكترون أبداً، وبالتالي فلن يحدث له أي امتصاص.

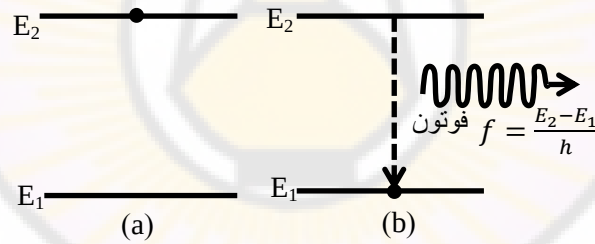


الشكل (3-11) امتصاص الفوتون.

- (a) ورود فوتون على ذرة يحتل فيها الالكترون سوية الطاقة E_1
 (b) الفوتون وقد ارتفع إلى سوية الأعلى E_2 إثر امتصاص الفوتون امتصاصاً تاماً

11-3- الإصدار التلقائي للإشعاع:

إذا شغل الكترون سوية تعلو سوية الطاقة الدنيا، فإننا نقول عن الذرة أنها في حالة مثارة (excited state) وتكون الذرة عندها في وضع غير مستقر (unstable). فلا يلبث الالكترون، بعد فترة وجيزة من بقاءه في السوية الأعلى، أن يعود تلقائياً إلى السوية الدنيا من جديد فاقداً جزءاً من طاقته. وتصدر هذه الطاقة من الذرة على هيئة فوتون يعتمد تواتره على فرق الطاقة بين السويتين، (ولسوف يساوي هذا التواتر تماماً تواتر الفوتون الذي ان حدث له امتصاص أدى إلى نقل الالكترون بين السويتين)، انظر الشكل (4-11) ان هذه الآلية وهي آلية الاصدار التلقائي (spontaneous emission) هي المسؤولة عن اصدار الضوء في المنابع الضوئية العادية.



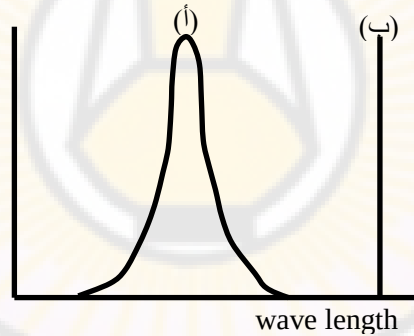
الشكل (4-11) الإصدار التلقائي للفوتون

(a) الالكترون وقد احتل سوية طاقة عالية E_2

(b) صدور الفوتون عندما يعود الالكترون تلقائياً إلى سوية الطاقة الأخفض E_1

إن احتمالات انتقال الالكترون في الذرة عديدة، وكل انتقال يقابله فرق محدد في الطاقة وبالتالي إشعاع بتواتر محدد ولذا فإن الضوء الذي يصدر عن مجموعة ذرات متماثلة سيتألف من عدد من التواترات المتميزة بعضها عن بعض، أي أنها تؤلف خطوطاً طيفية. إن الفحص الدقيق لخط طيفي ناشئ عن

كل الانتقالات المتماثلة التي تجري في الالكترونات ذرات عديدة يشير إلى امتداد ضئيل في التواتر وبالتالي في طول الموجة وهذا ما يوضحه الشكل (5-11). فكل خط طيفي في الواقع هو طيف مستمر امتداده ضئيل. وهناك عدة عوامل تساعد على اتساع امتداد الخطوط الطيفية. فالتفاعل المتبادل بين الذرات المتجاورة يعدل من سويات الطاقة نفسها، ثم ان حركة الذرات التي يصدر عنها الضوء تؤدي إلى حصول تغير في التواتر بحسب (أثر دوبلر) (Dopple Effect). وليس هذان العاملان سوى اثنين من العوامل المؤثرة في عرض الخط الطيفي. ويقوم هذا الامتداد في التواتر وفي طول الموجة بدور مهم في عمل الليزر، إن امتداد الخط الطيفي لا يتعدى في الحالات العادية 10^{-11} متراً.



الشكل (5-11) عرض الخطوط الطيفية

(a) توضيح الامتداد في طول موجة الخط الطيفي

(b) خط يمثل الضوء المثالي الوحيد اللون monochromatic

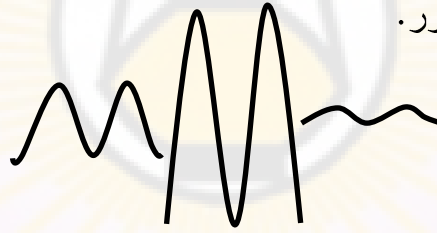
11-4- عدم الترابط في الضوء العادي:

هناك مظهران أساسيان من مظاهر عدم الترابط (incoherence) وهما عدم الترابط الزمني ((time incoherence)) وعدم الترابط المكاني (space incoherence) ونعالج كل منهما على حده فيما يأتي:

1- عدم الترابط الزمني:

إن الحزمة الضوئية في الضوء العادي تنتج أصلاً من عدة آلاف من الذرات وتتألف من عدد كبير من الفوتونات، أو القطارات الموجية، تتراكب بعضها فوق بعض. ولا توجد بين هذه الأمواج أو القطارات الموجية المختلفة أية علاقة تنسق فيما بينها، ولذا فهي تتداخل وتعطي قطاراً موجياً محصلاً تتغير سعته (amplitude) وطوره (phase) تغيراً سريعاً وعشوائياً.

يقال عن ضوء يتصف بهذه الصفة بأنه غير مترابط زمنياً. وإذا كانت الحزمة لا تعاني من هذه التغيرات العشوائية في السعة والطور قلنا عنها بأنها مترابطة زمنياً ويبين الشكل (6-11) بصورة مبسطة الفارق الأساسي بين الضوء غير المترابط زمنياً الذي تصدره المصادر الضوئية العادية وبين الضوء المترابط زمنياً الذي يعطيه الليزر.



(a) غير مترابط زمنياً



(b) مترابط زمنياً

الشكل (6-11)

يظهر في الجزء (a) موجة غير مترابطة زمنياً، وهي موجة تصدر عن المنبع الضوئي العادي حيث تحدث تغيرات في السعة والطور أما في الجزء (b) فتظهر موجة مترابطة زمنياً صادرة عن الليزر

2- عدم الترابط المكاني:

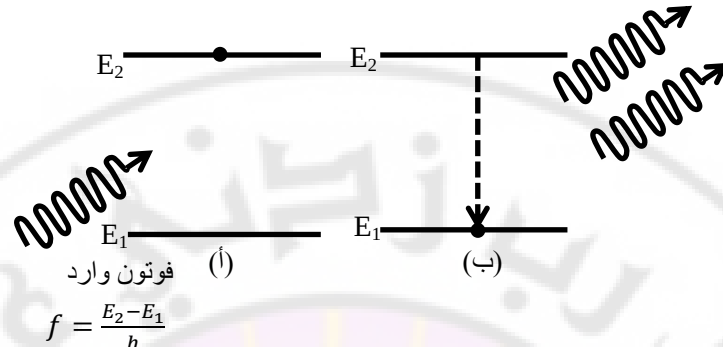
إن صفة عدم الترابط الزماني صفة مميزة لشعاع ضوئي وحيد في حين أن عدم الترابط المكاني صفة تبين العلاقة بين أشعة ضوئية مختلفة. فالشعاعان الضوئيان الصادران عن جزأين مختلفين من منبع ضوئي يصدران عن مجموعتين مختلفتين من الذرات. وسوف يكون كل من هذين الشعاعين غير مترابط زمانياً ويعاني كل منهما من تغير سريع وعشوائي في السعة والطور. وبالتالي فإن فرق الطور بينهما سيطراً عليه تغير سريع وعشوائي أيضاً. نقول عن شعاعين لهما هذا السلوك أنهما شعاعان غير مترابطين مكانياً. ونقول عن شعاعين أنهما مترابطان مكانياً إذا بقي فرق الطور بينهما ثابتاً. إن هذا ممكن حتى لو كان كل من الشعاعين غير مترابط زمانياً، ما دام أي تغير في الطور في أحد الشعاعين يرافقه، وبصورة آنية، تغير مساو في الطور في الشعاع الآخر. إن تحقيق هذا الأمر في المنابع الضوئية العادية غير ممكن إلا إذا صدر كلا الشعاعين عن الجزء نفسه من المنبع.

11-5- الإصدار المحثوث للإشعاع:

إن الإلكترون الذي يُرفع إلى سوية طاقة أعلى لا يلبث أن يعود بعد فترة وجيزة تلقائياً إلى السوية الأدنى مصدراً فوتوناً بتواتر محدد. وقد يحدث الإلكترون على العودة من سوية الطاقة العليا إلى السوية الأدنى ورود فوتون خارجي بالتواتر نفسه f على الذرة، ويحدث ذلك لحظة مرور الفوتون الخارجي بالذرة. إن الفوتون الخارجي الوارد لا يُمتص في هذه الحالة بل يستمر في طريقه لا يلوي على شيء. وإذا عاد الإلكترون إلى السوية الأدنى خسر طاقة،

وتصدر هذه الطاقة من الذرة على هيئة فوتون تواتره f ، مساو لتواتر الفوتون الخارجي. أضف إلى ذلك (أن الفوتون ينطلق باتجاه الفوتون وبحيث يكون على اتفاق في الطور معه) (inphase).

تعرف هذه الحادثة بحادثة الإصدار المحثوث للإشعاع (stimulated emission of radiation)، يعتمد الليزر في عمله اعتماداً كلياً على هذه الحادثة، انظر الشكل (7-11). إن حث الإلكترون للهبوط من سوية طاقة E_2 إلى سوية أدنى E_1 يتطلب ورود فوتون له التواتر الصحيح تماماً أي $(E_2 - E_1)/h$. وأي فوتون لا يحمل هذا التوتر لا يستطيع بحالة من الأحوال أن يحث الإلكترون للعودة من السوية E_2 إلى السوية E_1 . ولقد تتبأ إينشتاين بهذه الظاهرة، وهي ظاهرة تحدث جنيماً إلى جنب مع حادثة الإصدار التلقائي التي تجري في المصادر الضوئية العادية. فالضوء الصادر عن مصباح الصوديوم مثلاً هو ضوء بعضه ناشئ عن الإصدار التلقائي. وبعضه ناشئ عن الإصدار المحثوث، وقد يكون الفوتون الذي حث الإلكترون على العودة إلى السوية الأدنى للطاقة فوتوناً ناشئاً عن إصدار تلقائي. أما في الليزر فإننا نلجأ إلى ضبط الأمور حتى يكون الإصدار المحثوث غالباً على الإصدار التلقائي.



الشكل (11-7) الإصدار المحثوث للفوتون

يُظهر الجزء (a) فوتون له تواتر مساوٍ لتواتر الانتقال بين السويتين E_1 و E_2 . يقترب من ذرة في حال مثارة.

يظهر في الجزء (b) الإلكترون وقد عاد إلى سوية الطاقة الأدنى بعد أن حثه على ذلك مرور الفوتون الخارجي ويكون متفقاً معه في الطور

11-6- النظرية الأولية في تضخيم الضوء:

إذا مرت حزمة ضوئية وحيدة اللون عبر وسط شفاف ضعفت شدتها ويعود سبب ضعف الشدة إلى نقص عدد الفوتونات في الحزمة. وفي الظروف الاعتيادية لا يمكن لشدة الحزمة أن تزيد أثر اجتيازها للوسط. إلا أنه من الممكن خلق ظروف غير اعتيادية تؤدي إلى زيادة شدة الضوء وحيد اللون لدى اجتيازها للوسط. وتعرف هذه الظاهرة باسم الامتصاص السلبي (negative absorption) وعندها تزداد شدة الضوء لدى مروره في الوسط.

ولكي ندرك الشروط التي يجب توافرها كي يحصل تضخيم للضوء، ننظر في وسط حاوٍ على ذرات لها سويتا طاقة فقط هما E_1 و E_2 بحيث يكون $E_2 > E_1$.

إن تواتر الانتقال بين السويتين هو $f = (E_2 - E_1)/h$.

لنفرض أن الالكترونات تحتل في بعض الذرات السوية الأدنى E_1 وأن بعضها يحتل السوية العليا E_2 . ولنفرض أن عدد الذرات التي هي في الحالة E_1 هو N_1 وإن عددها في الحالة E_2 هو N_2 . فإذا مر ضوء وحيد اللون مساو تواتر الانتقال بين السويتين عبر الوسط، فإن ثلاثة احتمالات يمكن أن تأخذ مجراها وهذه الاحتمالات هي:

- a. قد تمتص بعض الفوتونات من الحزمة الواردة فترتفع الالكترونات بسبب ذلك من السوية الدنيا E_1 إلى السوية E_2 .
 - b. قد تحت بعض الفوتونات الواردة الالكترونات للهبوط من السوية E_2 إلى السوية E_1 ، ويصدر بسبب ذلك فوتون آخر له التواتر نفسه، دون أن يتأثر الفوتون الوارد أي تأثر. ولما كانت جهة انطلاق الفوتون المحثوث هي بجهة الفوتون الوارد فإن هذه الحادثة تؤدي إلى زيادة شدة الحزمة.
 - c. قد تهبط بعض الالكترونات تلقائياً من السوية E_2 إلى السوية E_1 مصدر فوتونياً. وتصدر هذه الفوتونات بصورة عشوائية في جميع الاتجاهات، ولما كان عدد الفوتونات الصادرة بهذه الآلية باتجاه الضوء الوارد ضئيلاً فإن مساهمتها في زيادة شدة الحزمة الضوئية تكاد لا تذكر ويمكن إهمالها.
- يبدو جلياً مما سبق أنه إذا أردنا أن تزداد شدة الحزمة لدى مرورها في الوسط فإن الإصدار المحثوث للفوتونات يجب أن يطغى على امتصاص الفوتونات.

إن عدد الانتقالات من E_1 إلى E_2 متناسب مع N_1 أي مع عدد الإلكترونات في السوية المنخفضة E_1 . أما عدد الانتقالات من E_2 إلى E_1 فمتناسب مع N_2 أي مع عدد الإلكترونات في السوية العليا E_2 . وقد بين انشتاين أن ثابتي التناسب لهذين التحويلين متساويان. وعليه فلكي يزيد الإصدار المحثوث على الامتصاص يجب أن يكون N_2 أكبر من N_1 أي أنه يجب أن يكون عدد الإلكترونات في السوية العليا أكبر من عددها في السوية الدنيا. ونشير إلى أنه في ظروف التوازن الحراري (thermal equilibrium) العادية يكون عدد الإلكترونات في السوية الدنيا أكبر من عددها في السوية العليا ونحن بحاجة إلى عكس هذا الواقع إذا أردنا أن يتحقق تضخيم الضوء. تسمى هذه الظروف المعكوسة التوزيع "السكاني" المعكوس (inverted population).

11-7- آلية الضخ الضوئية:

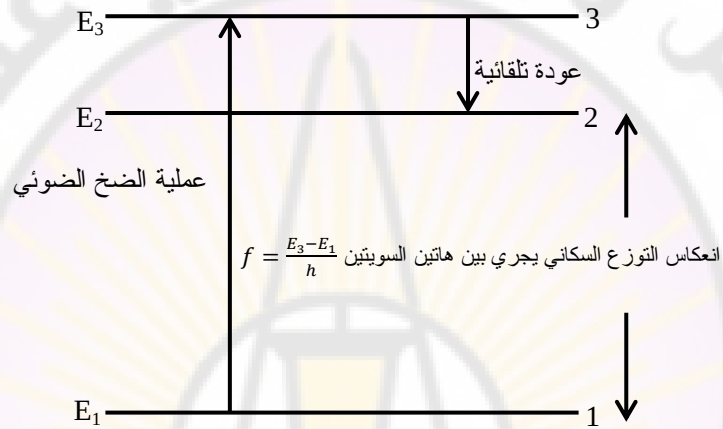
ننظر في طريقة تحقيق التوزيع السكاني المعكوس في الليزر. إن الطريقة المستخدمة في الليزر الياقوتي هي طريقة الضخ الضوئي (optical pumping) فلكي يتحقق التوزيع السكاني المعكوس يجب زيادة عدد الإلكترونات في السوية العليا. وإذا انتزعت هذه الإلكترونات من السوية الدنيا أضحت المهمة أكثر سهولة. وأبسط طريقة لذلك هي أن نسلط على المادة إشعاعاً ضوئياً وحيد اللون بحيث يساوي تواتره تواتر الانتقالات بين السويتين. نسمي هذا الضوء الضوء الضاخ (pumping radiation) فتقوم الإلكترونات بامتصاص الفوتونات وترتفع أثر ذلك من السوية الدنيا إلى السوية الأعلى. ولكي يتحقق شرط التوزيع السكاني المعكوس يجب أن يزيد عدد الإلكترونات التي ترفع من

السوية الدنيا إلى السوية العليا على نصف عددها الأصلي. إلا أنه كلما زاد عدد الالكترونات في السوية العليا فإن الاشعاع نفسه الذي يقوم بدور زيادة هذا العدد يميل إلى نقل عدد من هذه الالكترونات إلى السوية الأدنى بفعل حادثة الإصدار المحثوث. وكلما زاد عدد الالكترونات في السوية العليا زاد معدل عودة بعضها إلى السوية الأدنى بفعل الإصدار المحثوث لدى مرور الضوء الضاخ ولذا فإنه يستحيل تحقيق التوزيع السكاني المعكوس بين سويتين.

11-8- الجمل ذات السويات الثلاث:

إن الجمل ذات السويتين لا تصلح للتضخيم الضوئي وذلك لأن الاشعاع الذي يقوم بعملية الضخ يحث الالكترونات على العودة إلى السوية الدنيا. أما في الجمل ذات السويات الثلاث فإننا نستخدم الاشعاع لضخ الالكترونات إلى سوية أعلى من السوية التي نرغب أن تكون فيها. ويتم تجمع الالكترونات بعدئذ بفعل الهبوط التلقائي لهذه الالكترونات إلى السوية المطلوبة والتي تقع دون السوية الأولى التي تم ضخ الالكترونات إليها. لنفترض أننا بصدد تحقيق توزيع سكاني معكوس بين السويتين (1) و (2) في الشكل (8-11) فبتسليط اشعاع ضوئي بتواتر محدد هو $(E_3 - E_1)/h$ ترتفع الالكترونات من السوية (1) إلى (3). ولا تلبث هذه الالكترونات أن تعود تلقائياً إلى السوية (2) حيث تتراكم حتى يزيد عدد الالكترونات في هذه السوية على عددها في السوية (1). ومن الواضح أنه ينبغي اختيار السويات الثلاثة بدقة فائقة. فمثلاً يجب أن يكون معدل العودة التلقائية إلى اختيار السويات الثلاثة بدقة فائقة. فمثلاً يجب أن يكون معدل العودة التلقائية إلى السوية (1) من السوية (3) أصغر بكثير من معدل الهبوط إلى

السوية (2). وإلا فإن عدد الالكترونات الذي يتراكم في السوية (2) سيتناقص بمعدل لا يسمح بخلق ظروف تؤدي إلى زيادة كبيرة فيه. إن ميزة الجملة ذات السويات الثلاثة على الجملة ذات السويتين تكمن في أن تواتر الانتقال بين السويتين (1) و (3) يختلف عن تواتر الانتقال بين السويتين (2) و (1).



الشكل (8-11) سويات الطاقة في ليزر ذي سويات ثلاث. إن الإشعاع ذا التوتر $(E_3 - E_1/h)$ يرفع الالكترونات من السوية (1) إلى السوية (3) ثم لا تلبث أن تهوي هذه الالكترونات تلقائياً من السوية (3) إلى السوية (2) حيث تتراكم هناك فيتحقق بذلك التوزيع السكاني المعكوس بين السويتين (1) و (2).

وعليه فإن تواتر الاشعاع الذي يقوم بعملية الضخ لا يمكنه أن يحث الالكترونات على الانتقال من السوية (2) سيتناقص بمعدل لا يسمح بخلق ظروف تؤدي إلى زيادة كبيرة فيه. إن ميزة الجملة ذات السويات الثلاثة على الجملة ذات السويتين تكمن في أن تواتر الانتقال بين السويتين (1) و (3) يختلف عن الضخ لا يمكنه أن يحث الالكترونات على الانتقال من السوية (2).

11-9- الليزر الياقوتي:

إن أول ليزر أُنتج كان الليزر الياقوتي (Ruby laser) وقد استخدمت فيه بلورة الياقوت. والياقوت هو أكسيد الألمنيوم وهو يحوي على كمية ضئيلة من الكروم (chromium). وتقوم ذرات هذا المعدن الأخير بدور أساسي في عمل الليزر. فإحدى المميزات الأساسية التي يتصف بها مخطط سويات الطاقة لذرة الكروم هي وجود نطاق واسع A من سويات الطاقة، أنظر الشكل (9-11). وبناء عليه فإن باستطاعة عدد كبير من التواترات رفع الإلكترونات من السوية الدنيا إلى نطاق الطاقة هذا. ويقابل نطاق التواترات هذه الجزء الأخضر المصفر من الطبق، إن عمر الإلكترونات في النطاق العلوي قصير للغاية فهي لا تلبث أن تهوي إلى سوية الطاقة الأخفض B. وبعد مكوثها هناك فترة وجيزة تعود الإلكترونات تلقائياً إلى السوية الدنيا مصدرة ضوءاً وحيد اللون. ويساوي طول موجة هذا الضوء 694.3 nm ويقع في منطقة الضوء الأحمر من الطيف الضوئي. وهذا هو سبب تآلق بلورة الياقوت باللون الأحمر.

وإذا وردت حزمة ضوئية شديدة على بلورة الياقوت ارتفع عدد كاف من الإلكترونات من السوية الدنيا للطاقة إلى نطاق الطاقة العلوية ومن ثم تنتقل هذه الإلكترونات إلى سوية الطاقة المحددة B فيتحقق بذلك التوزيع السكاني المعكوس بين هذه السوية وسوية الطاقة الدنيا. فإذا مرت حزمة ضئيلة طول موجتها 694.3 nm عبر بلورة الياقوت، وهي في هذه الحالة زادت شدتها ونحصل على تضخيم ضوئي.



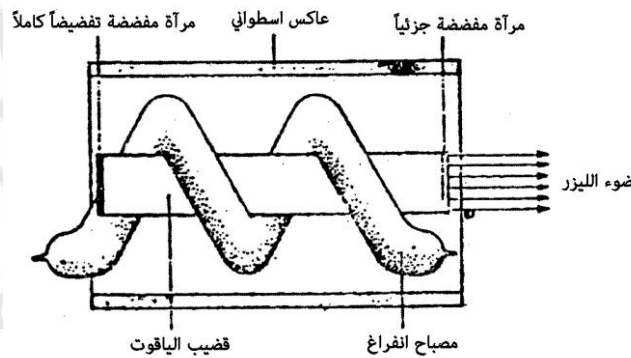
الشكل (9-11) سوياات الطاقة في الليزر اليافوتي. ويظهر في الشكل بعض سوياات الطاقة في ذرة الكروم. ويقوم ضوء يقع في منطقة الأخضر المصفر بضخ الالكترونات من السوية الدنيا للطاقة إلى نطاق السويات A. ثم يلي ذلك عودة سريعة لهذه الالكترونات إلى السوية B. وإذا عادت الالكترونات بعد ذلك من السوية B إلى السوية الدنيا صدر إشعاع بتواتر قدره (694.3 nm).

إلا أنه لا يلزمنا بالفعل أن نمرر حزمة خارجية ضوئية عبر البلورة. فحادثة الإصدار التلقائي تجعل بعض الالكترونات تعود إلى السوية الدنيا مصدره فوتونات ويمكن لهذه الفوتونات الصادرة تلقائياً أن تحث الالكترونات الأخرى على إصدار الفوتونات وستتمو بفعل ذلك شدة الحزمة الضوئية. ولا تلبث الحزمة أن تغادر البلورة ولنسوف يقف بعدها نمو شدة الحزمة. أما إذا صقل طرفا البلورة وفضضا، فإن الحزمة الضوئية ستعاني من انعكاسات متتالية ضمن البلورة، وإذا كان تضخيم الحزمة في كل مرة يزيد على الخسارة بسبب السطوح العاكسة فإن شدة الحزمة ستزداد أكثر فأكثر وستولد حادثة الإصدار المحثوث تفاعلاً متسلسلاً (chain Reaction) وتعود بسببه الالكترونات بسرعة من السوية العليا B إلى السوية الدنيا للطاقة، وسيصدر عندئذ نبضة

(pulse) ضوئية شديدة. ولما كان الفوتون الصادر بطريقة الحث على اتفاق في الطور مع الفوتون الذي حثه على الصدور، فإن سبيل الفوتونات الناتجة في التفاعل المتسلسل ستكون جميعها متفقة في الطور وستكون نبضة الضوء الناتجة مترابطة زمانياً.

إن طاقة هذه النبضة لا يمكن أن تزيد عن الطاقة التي كانت ستصدر عن المادة تلقائياً على هيئة ضوء متفلور عادي. إلا أن الطاقة مركزة في نبضة وحيدة تدوم فترة قصيرة جداً، بدلاً من أن تصدر بصورة عشوائية خلال فترة زمنية أطول بكثير. وعليه فإن شدة الحزمة أعلى بكثير.

يظهر في الشكل (10-11) تركيب أحد أنواع الليزر الياقوتي. وتأخذ بلورة الياقوت في هذا النوع شكل أسطوانة طولها بضعة سنتيمترات، وتصلق نهايتا البلورة بحيث تكونان متوازيين ومستويين ثم تقضضان. وتقضض إحدى النهايتين تقضيضاً كاملاً في حين تقضض النهاية الأخرى تقضيضاً جزئياً على كامل سطحها بحيث تعكس بعض الضوء وينفذ بعضه الآخر. ويحيط بقضيب الياقوت مصباح انفرغ ذو استطاعة عالية.



الشكل (10-11) العناصر الأساسية في الليزر الياقوتي

فإذا أشعل المصباح سببت إضاءته الشديدة توزعاً سكانياً معكوساً في ذرات قضيب الياقوت وتؤدي الآليات التي شرحناها أعلاه إلى توليد نبضة شديدة من الضوء المترابط.

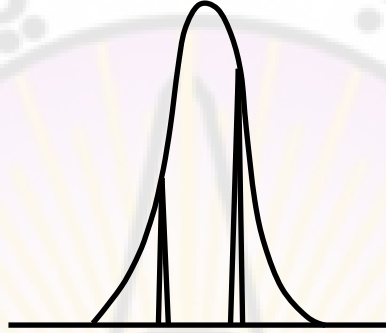
إن الانعكاس المتتالي للضوء المترابط بين نهايتي قضيب الياقوت يجعل عدداً كبيراً من القطارات يتراكب بعضها فوق بعض. وقد يحدث من جراء ذلك تداخل هدام (destructive interference) بينها ما لم تكن المسافة بين نهايتي قضيب الياقوت مساوية عدداً صحيحاً من نصف طول الموجة. فإذا تحقق ذلك حدثت موجة مستقرة (stationary wave) شديدة جداً في قضيب الياقوت، انظر الشكل (11-11). إن الوضع مشابه تماماً لتوليد أمواج مستقرة في وتر مقياس الصوت (sonometer) أو في أنبوب الارغن (organ pipe). وإذا رغبت في أن يكون الضوء الصادر عن بلورة الياقوت وحيد اللون تماماً وجب أن يضبط طول قضيب الياقوت بدقة ليتحقق المطلوب.



الشكل (11-11) الموجة المستقرة في بلورة الياقوت. إن طول الموجة المختار هو ذلك الذي يكون من أجله طول بلورة الياقوت مساوياً عدداً صحيحاً من نصف طول الموجة، إن شدة هذا الخط تزداد بفعل الإصدار المحثوث حتى تتشكل موجة مستقرة شديدة.

وفي الواقع فإن الضوء الصادر هو وحيد اللون اسماً إذ أنه يوجد امتداد ضئيل في طول موجته ويظهر هذا الامتداد في الشكل (11-12). وينتقي من بين الأطوال الموجية طول الموجة الذي يكون من أجله طول القضيب مساوياً عدداً فردياً من نصف طول الموجة. وتنمو شدة هذا الضوء بفعل الإصدار

المحثوث ولذا فإن الخط الطيفي لضوء الليزر أضيق بكثير من الخط الطيفي الصادر عن الضوء العادي الذي يحدث تلقائياً. وقد يوجد أكثر من خط وحيد حاد بين حدي المنطقة التي يغطيها الخط إذا كان صدوره تلقائياً، انظر الشكل (11-12).



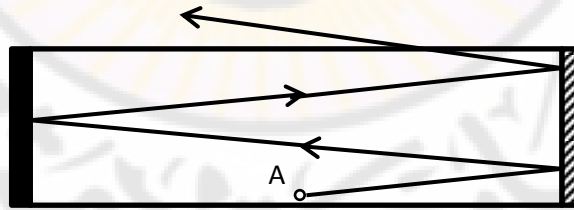
الشكل (11-12) يبين الشكل طولين موجيين تم انتقاؤهما من طيف خطي في ضوء عادي وقد جرى تضخيمهما بفعل الإصدار المحثوث. إن عرض الخط الصادر عن ضوء الليزر أضيق بكثير من عرض الخط الطيفي في الضوء العادي.

إن خرج (output) الليزر يصدر عن الطرف المفضض جزئياً من قضيب الياقوت. وإذا كانت شدة مصباح الانفراغ غير كافية لتحقيق التوزيع السكاني المعكوس فإن تضخيم الضوء في الياقوت لا يحدث، إلا أن العودة التلقائية للإلكترونات إلى السوية الدنيا تأخذ مجراها ويصدر عن الياقوت ضوء ضعيف نسبياً ويكون الضوء ضوءاً عادياً غير مترابط ويصدر في جميع الاتجاهات.

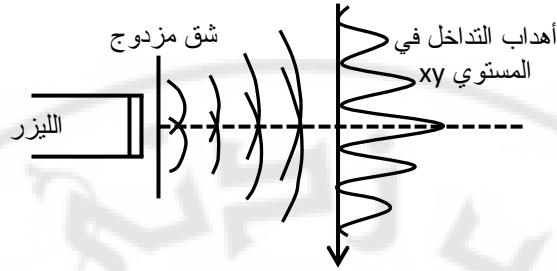
إن الانتشار الزاوي (angular spread) لنبضة الليزر المترابطة انتشار ضئيل للغاية. فالفوتونات التي تتحرك باتجاه مواز لمحور قضيب الياقوت هي التي تنعكس مرات ومرات بين طرفيه وهي التي تؤدي إلى زيادة شدة

الحزمة. أما الفوتونات التي تميل ولو قليلاً على محور القضيب فتعاني من انعكاسات تطردها خارج البلورة مع تضخيم ضئيل، انظر الشكل (11-13). ولذا فإن الحزمة الصادرة عن الليزر حزمة متوازية تماماً. فإذا ما جمعت هذه الحزمة بعدسة حصلنا على خيال لحزمة لا يحد من صره الا ظواهر الانعراج (diffraction effects). ومن الممكن تركيز طاقة الليزر بهذه الطريقة إلى حد يفوق أي تركيز يمكن الحصول عليه بالطرائق الأخرى.

إن بإمكاننا توضيح الترابط المكاني للضوء الصادر من نهاية قضيب الياقوت بإجراء تجربة شقي يانغ (youns slits) في التداخل باستخدام منبع ليزري. إن رؤية أهداب التداخل (interference fringes) باستخدام منبع ضوئي عادي غير ممكن الا إذا كان المنبع الضوئي صغيراً. أما في حالة منبع ليزري فإن رؤية الأهداب ممكنة حتى ولو أُلصق الشقان بقضيب الياقوت، الأمر الذي يوضح الترابط المكاني بين الاشعاع الصادر من مكانين مختلفين في المنبع. انظر الشكل (11-14).



الشكل (11-13) إن فوتناً صادراً عند A باتجاه مائل قليلاً على محور القضيب لا يلبث أن يخرج من البلورة بعد بضعة انعكاسات دون أن يعاني تضخيماً يذكر.

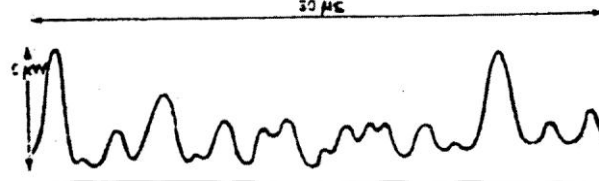


الشكل (11-14) تجربة شقي يانغ. إن رؤية الأهداب ممكنة حتى ولو ألصق الشقان بنهاية قضيب الياقوت، المر الذي يوضح الترابط المكاني بين الضوء الصادر من أجزاء مختلفة من نهاية قضيب ياقوت.

11-10- توليد النبضة العملاقة عن طريق التحكم بجودة الوسط

الرنان:

قد تدوم النبضة الصادرة عن الليزر الياقوتي لزمان يقارب بضع مئات من الميكرو ثانية. وإذا ما تفحصنا خرج الليزر بخلية كهروضوئية (photo cell) موصولة براسم اهتزاز مهبطي (oscillograph). فإننا نجد أن شدة الضوء الصادر غير منتظمة كما يتضح من الشكل (11-15). وفي الواقع فإن النبضة تتألف من عدد كبير من النبضات الصغيرة أو النتوءات (spikes) ولكي ندرك سبب ذلك يجب أن ننظر في الآلية التي أدت إلى تحقيق التوزيع السكاني المعكوس في الياقوت. فوميض الضوء الذي يثير الذرات يدوم فترة قصيرة لا تتعدى جزءاً من ألف في الثانية، وقد تكون شدته كافية لخلق التوزيع السكاني المعكوس في اللحظات الأولى لصدور الوميض. فإذا حدث هذا التوزيع المعكوس شرع الليزر بالعمل.



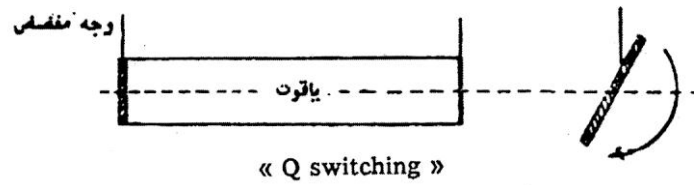
الشكل (11-15) النبضات الخارجة من الليزر الياقوتي. إذا تفحصنا الضوء الصادر عن الليزر الياقوتي بخلية كهروضوئية ورأسم اهتزاز مهبطي، فإننا نجد أن الشدة غير منتظمة وهي تتألف من عدد من النبضات الصغيرة.

ونتيجة لذلك تبدأ الالكترونات في السوية العليا بالنزوح عنها بفعل الإصدار المحدث بسرعة تفوق سرعة رفع الالكترونات إلى هذه السوية بفعل وميض الضوء. وهكذا فإن التوزيع السكاني المعكوس يصيبه الخلل، ويتوقف بالتالي عمل الليزر. إلا أن وميض المصباح لا زال فعالاً ويحقق من جديد التوزيع السكاني المعكوس وتستمر الآلية هذه مرات ومرات. وينتج بسبب ذلك عدد من النبضات القصيرة حتى تضعف شدة وميض المصباح بحيث تعجز عن تحقيق التوزيع السكاني المعكوس.

فإذا تمكنا بطريقة ما من منع نزوح الالكترونات من السوية العليا حتى ينطفئ وميض المصباح تماماً، فإن توزيعاً سكانياً معكوساً بدرجة عالية سيتحقق. وإذا سمحنا لفعل الليزر بالبداية عند ذلك فإن كامل الطاقة الجاهزة ستتركز في نبضة وحيدة عملاقة تدوم وقتاً قصيراً للغاية.

إن عمل الليزر الياقوتي مرهون بحدوث الانعكاس المتتالي للحزمة بين نهايتي القضيب. ولا يعمل الليزر الياقوتي إذا كانت النهايتان غير عاكستين بصورة ملائمة، وذلك لأن الربح الذي يتحقق في شدة الحزمة من جراء مرورها في البلورة لا يكفي لتعويض الخسارة التي تتم عند النهايتين. ولذا فإنه إذا رفعت

الطبقة المففضة من إحدى النهايتين في قضيب الياقوت، فإن الليزر سوف يتوقف عن العمل وعندها لا يحدث تدمير للتوزع السكاني المعكوس قبل نزوح هذا التوزع. وإذا أمكن وضع الطبقة العاكسة بعد تحقيق التوزع السكاني المعكوس بدرجة كبيرة فإن الليزر سيشرع بالعمل وستنطلق عندها الطاقة المختزنة بكاملها في قضيب الياقوت على هيئة نبضة عملاقة مترابطة. إن هناك طرائق متعددة لتحقيق هذه المتطلبات وهي طرائق تعرف باسم (Q-switching) وتظهر في الشكل (11-16) إحدى هذه الطرائق أن يكون إحدى نهايتي قضيب الليزر مطلية بالفضة طلاء كاملاً، أما النهاية الأخرى فهي غير مففضة ابداً. وتوضع أمام النهاية غير المففضة مرآة تدور بسرعة عالية حول محور عمودي على مستوى الشكل.

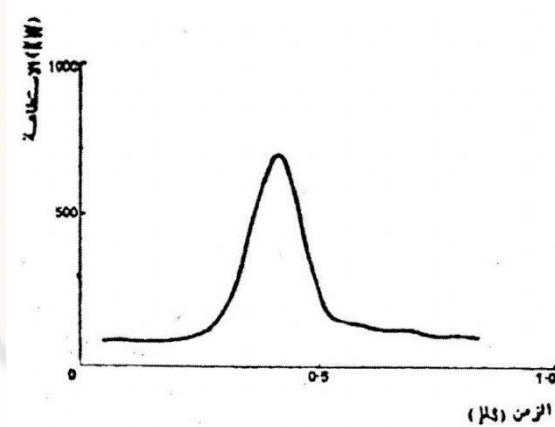


الشكل (11-16) توليد نبضة عملاقة بطريقة التحكم بجودة الوسط (الرنان).

عندما تصبح المرآة موازية لسطح نهاية قضيب الياقوت تعمل عمل المرآة المففضة العادية عند هذه النهاية، فهي تعيد الحزمة الضوئية مرات ومرات عبر البلورة وهكذا فإن عمل الليزر مشروط بوجود المرآة في هذا الوضع. أما إذا كانت المرآة غير موازية لسطح نهاية القضيب فإن الضوء لا يقوم بعدد كاف من الانعكاسات في البلورة، بل أنه لا يعاني انعكاساً يعيده إلى البلورة ويتوقف عندئذ عمل الليزر.

إن عملية إطلاق وميض الضوء متزامنة (synchronized) مع دوران المرآة حيث يتم اصدار الوميض قبل أن تصبح المرآة موازية لسطح نهاية القضيب بقليل. وفي الوقت الذي تصبح فيه المرآة موازية لهذا السطح يكون التوزيع السكاني المعكوس قد زاد إلى حد كبير، وعندها يبدأ عمل الليزر وتصدر نبضة ليزرية عملاقة وحيدة.

وقد أعطت التجارب الأولى نبضات عملاقة بلغت استطاعتها (power) العظمى (600 kw) واستمرت (0.2) ميكرو ثانية، انظر الشكل (11-17). وتجدر مقارنة هذه الاستطاعة مع الاستطاعة العظمى التي تقارب (6 kw) والتي تستمر



الشكل (11-17) نبضة عملاقة صادرة عن الليزر الياقوتي بطريقة (Q-switching)

بضع مئات من الميكرو ثانية، وهي استطاعة تصدر عن الليزر الياقوتي عندما يعمل بالطريقة المعتادة. وبالطبع فإن هذه الاستطاعات العالية نتيجة لقصر زمن النبضات. أما الطاقة (energy) الاجمالية التي تحملها النبضة ليست عالية. فهي تقارب جولاً واحداً مثلاً في النبضة العملاقة التي ذكرناها أعلاه. إن الطاقة الاجمالية الصادرة عن الليزر لا يمكن أن تزيد عن طاقة مصباح

الوميض، بل إنها في الواقع أقل بكثير وذلك لتحول جزء كبير من الطاقة مباشرة إلى حرارة. وقد زادت التجارب بعدئذ من الاستطاعة العظمى التي تحملها النبضات العملاقة. فقد ذكر أنها بلغت (10 Mw) في بعض التجارب ولا شك أنها قد زادت منذ ذلك الحين.

إن الليزر الياقوتي لا يعمل إلا بشكل متقطع، وذلك لأن عملية الضخ الضوئية لا يمكن أن تحدث إلا بصورة ومضات ولأن الحرارة المنتشرة في قضيب الياقوت لا بد أن يتاح لها الوقت الكافي كي تتبدد.

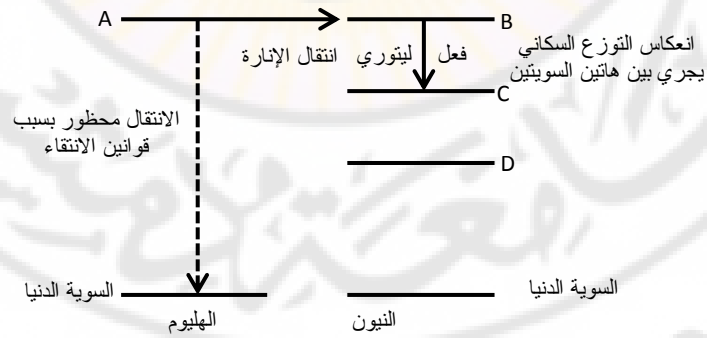
11-11- الليزرات الغازية:

إن الفعل الليزري ممكن في الغاز أو في مزيج غازي. ويتميز التوزع السكاني المعكوس في الغاز بمزايا لا يتصف بها الجسم الصلب فطريقة الضخ الضوئية في الياقوت تعتمد على وجود سويات طاقة ذات نطاق عريض، بحيث يتيح وجود هذا النطاق فرصة لامتصاص أضواء بأطوال موجية متباينة. أما في الغازات فلا وجود لنطاق امتصاص كهذا. فالغاز لا يمتص إلا أطوال موجية متميزة بعضها على بعض.

ومن الممكن ضخ الغاز ضوئياً باستخدام ضوء وحيد اللون. إلا أن هناك طريقة أبسط لتحقيق ذلك. فمن الممكن رفع ذرة الغاز إلى سوية مثارة بإحداث انفراغ (discharge) كهربائي فيه. إلا أن الانفراغ الكهربائي حادثة لا تختار سوية دون أخرى، وترتفع الذرات بفعل الانفراغ إلى كل سويات الطاقة المثارة الممكنة. ويحدث توزع تحريكي (dynamic equilibrium) بعد فترة ويصبح عدد الذرات في كل سوية من سويات الطاقة ثابتاً. وسيغادر بعض الذرات

السويات المثارة في حين يدخل بعضها الآخر هذه السويات، إلا أن العمليتين متكافئتان ولذا يبقى عدد الذرات في السويات ثابتاً. من الممكن أن تؤدي هذه الآلية إلى أن يكون عدد الذرات في السويات العليا أكبر من عددها في السويات الأدنى التي قد يحدث انتقال إليها، وهكذا يتحقق التوزع السكاني المعكوس. إلا أن الباحثين الأوائل لم يتمكنوا من تحقيق الليزر بهذه الطريقة.

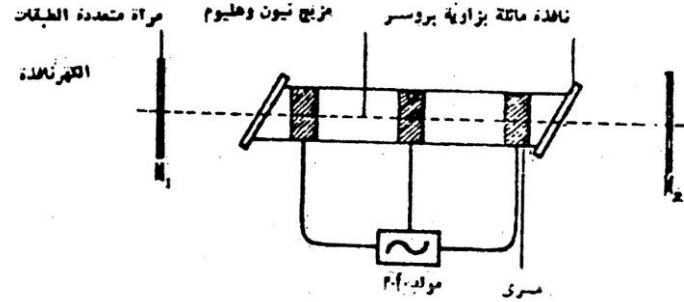
إن أول ليزر غازي برز إلى حيز الوجود كان ليزر استخدم فيه مزيج الهليوم والنيون. ويقوم النيون في هذا المزيج بدور المادة الليزرية. ويظهر في الشكل (11-18) مخطط مبسط لسويات الطاقة في الهليوم والنيون. إن السوية الأولى التي تلي السوية الدنيا في الهليوم هي السوية A. وفي هذه السوية تتراكم الذرات وذلك بسبب تعذر العودة في هذه السوية إلى السوية الدنيا، وهو ما تفرضه قوانين الانتقاء (selection rules) في الميكانيك الكوانتي. إن تحقيق التوزع السكاني المعكوس بين هاتين السويتين إذاً ممكن إلا أنه لما كان الانتقال من السوية العليا إلى السوية الدنيا محظوراً، فإن ذلك يحول دون عمل الليزر.



الشكل (11-18) سويات الطاقة في الهليوم والنيون.

يبدو من مخططات الطاقة الخاص بالنيون أن طاقة السوية B مساوية تقريباً طاقة السوية A في الهليوم. ويمكن أن تنتقل من ذرة هيليوم مثارة إلى السوية A لدى اصطدامها بذرة نيون، فيحدث من جراء هذا الاصطدام رفع ذرة نيون من السوية الدنيا. وتعود ذرة الهليوم أثر هذا الاصطدام إلى السوية الدنيا. وترتفع ذرة النيون إلى السوية المثارة B. ثم إن آلية الانفراغ الكهربائي توزع ذرات النيون بين سويات الطاقة المثارة المختلفة. وهكذا فإن انتقال الطاقة من ذرات الهليوم المثارة يزيد من عدد ذرات النيون في السوية B حتى يصبح هذا العدد كبيراً بدرجة ملحوظة وعندها يتحقق التوزيع السكاني المعكوس بين السويتين C و B. فإذا تحقق هذا التوزيع السكاني المعكوس، شرع الليزر بالعمل وهو يستمر بعدئذ، وذلك لأن الانفراغ الكهربائي لا يزال قائماً في الغاز. فالإلكترونات التي تنزع من السوية العليا B بفعل حادثة الإصدار المحثوث لا تلبث أن تعوض بفعل انتقال طاقة ذرات الهليوم. ولكي يستمر عمل الليزر يجب أن لا تتجمع الإلكترونات التي هبطت من السوية B إلى السوية C وإلا فإن التوزيع السكاني المعكوس سيختل. وفي الواقع فإن هناك سوية أخفض من السوية C تهوي إليها الإلكترونات بسرعة.

يبين الشكل (11-19) مخططاً مبسطاً لليزر غازي. وفيه تنتقل الحزمة الضوئية جيئة وذهاباً بين المرآتين M_1 و M_2 مارة بالغاز. وكانت المرآتان في الليزر الغازية الأولى توضع ضمن أنبوب الانفراغ. أما في الليزر الغازية الحديثة فإم المرآتين توضعان خارج أنبوب الانفراغ كما هو مبين في الشكل.



الشكل (11-19) مخطط مبسط لليزر الغازي.

إن الضوء المنعكس بتغير زاوية الورود عندما تتغير بين (الصفر) و(90) درجة.

ويشير المنحنيان A و B إلى اتجاه متجهة الحقل الكهربائي، ففي A تكون متجهة الحقل الكهربائي موازية لمستوى الورود، أما في B فهي عمودية على مستوى الورود. ويظهر من المنحني A أنه إذا كانت متجهة الحقل الكهربائي موازية لمستوى الورود فإن نسبة الضوء المنعكس تكون صفراً عند زاوية ورود محددة. وعند هذه الزاوية يمر الضوء عبر الوسط الشفاف دون أن يحصل فيه أية خسارة. وتعرف هذه الزاوية بزاوية بروستر (Brewster angle) وهي الزاوية التي تمال بها نهايتا أنبوب الانفراغ عادة. فإذا ورد على هذه النافذة ضوء بحيث تكون متجهة حقله الكهربائي واقعة في مستوى الورود، فإن هذا الضوء ينفذ عبر النافذة دون أية خسارة. أما بالنسبة للحزمة الضوئية التي تكون من أجلها متجهة الحقل الكهربائي عمودية على مستوى الورود فإنها تعاني بعض الخسارة في الشدة بفعل الانعكاس الجزئي (partial reflection)، وهذه خسارة كافية لكي تحول دون عمل الليزر بالنسبة لهذا الضوء. ولذا فإن الضوء الناتج من ليزر غازي هو ضوء مستقطب خطياً.

11-12- بعض التطبيقات العملية لأشعة الليزر:

إن لضوء الليزر ثلاث صفات أساسية تميزه عن غيره من المنابع

الضوئية العادية وهذه الصفات هي:

1- الترابط الزماني والمكاني.

2- الانتشار الزاوي الضئيل.

3- الشدة العالية جداً.

يستفاد من هذه الخصائص في تطبيقات عديدة نذكر منها ما يلي:

1- القراءة والكتابة: وهي تشمل:

أ- قراءة الأقراص الليزرية.

ب- صنع أسطوانات الحاكي عالية النقاوة.

ت- قراءة الرموز العنصرية على المشتريات في الأسواق التجارية.

ث- قراءة المعطيات الحاسوبية على الأقراص الليزرية.

ج- الطابعات الليزرية للحواسب.

2- القياسات والاختبارات: وهي تشمل:

أ- إسقاط خطوط مستقيمة لأغراض الإنشاءات وخطوط الري.

ب- قياس المدى للأجسام البعيدة.

ت- قياس المسافات الصغيرة بدقة عالية.

ث- إنارة الخلايا لإجراء قياسات بيولوجية.

ج- دراسة البنى الذرية والجزيئية.

ح- قياس تركيز الملوثات والمواد الكيميائية.

خ- كشف التشققات في عجلات الطائرات.

3- تطبيقات في الطب: وهي تشمل:

أ- الجراحة الليزرية.

ب- لحام الشبكية.

ت- معالجة نزيف شبكية العين.

ث- تفتيت الحصى في الكلى.

ج- البحوث التناسلية.

ح- العمليات التجميلية.

4- تطبيقات في الصناعة: وهي تشمل:

أ- قص الثياب (التفصيل).

ب- قص المعادن.

ت- تقب المعادن القاسية.

ث- لحام المواد البلاستيكية.

ج- لحام المعادن.

ح- الحفر على الخشب.

خ- طباعة الرموز العvisية على المنتجات.

5- التطبيقات العسكرية: وهي تشمل:

أ- مضاد الحساسات.

ب- مضاد الأقمار الصناعية.

ت- مضاد القذائف البالسكية.

ث- محاكاة المعارك "دبابات - أشخاص".

ج- إنارة الأهداف المعادية.

6- تطبيقات أخرى: وهي تشمل:

أ- صناعة الهولوجرامات (أي الصور المجسمة).

ب- العروض الليزرية.

ت- لوحات الإعلانات.

ث- المؤشرات الليزرية.

ج- التحكم بالتفاعلات الكيميائية.

ح- فصل النظائر.

خ- توليد تفاعل الاندماج بين التريتيوم والدوتيريوم.

د- الأبحاث الأساسية.

ذ- حراسة المباني وكشف التسلل.

ر- نقل المكالمات الهاتفية.

ز- كشف الحرائق.

نلقي الآن المزيد من الضوء على بعض هذه التطبيقات:

يضيق المجال هنا لشرح التطبيقات العديدة لليزر فقد استخدم الليزر في

طب العيون لمعالجة نزيف الشبكية كما استخدم لإعادة الشبكية إلى وضعها

الطبيعي على قعر العين إذا حصل أي انفصال لها بالإضافة إلى استخدام الليزر

كمشرط في العمليات الجراحية.

واستخدم الليزر في المجال العسكري لتوجيه القذائف إلى أهدافها عن طريق إنارة الهدف بحزمة ليزرية متقطعة غير مرئية فتتحسس بالأشعة المنتشرة عن الهدف المنار قذيفة تحمل دارة تحسس بالأشعة الليزرية فتوجه القذيفة نحو موضع انتشار الحزمة الليزرية فتدمر هدفها.

كما تعقد آمال كبيرة على استخدام الليزر في فصل النظائر وتوليد الاندماج النووي nuclear fusion نظراً لما تحمله حزمة الليزر من طاقة هائلة يمكن توجيهها نحو وقودي الاندماج النووي وهما الدوتيريوم والتريتيوم. واستخدم الليزر في معالجة الأورام السرطانية وبخاصة في المناطق الدموية من جسم الانسان كالكبد.

فالليزر هنا يبخر الخلايا السرطانية ولا يسيل الدم من موضع عمل الليزر لأنه يختر الدم على الفور بفضل حرارة الليزر اللاذعة. لقد أمكن إنتاج صور مجسمة أو هولوغرامات لأجسام معينة وأفادت هذه الهولوغرامات في كشف أي تشوه يتعرض له الجسم عن طريق ملاحظته من خلال الهولوغرامات ذاته.

واستخدم الليزر في الاتصالات المسموعة والمرئية بل أمكن نقل المكالمات الهاتفية عبر ألياف زجاجية بدلاً من الأسلاك النحاسية وفي هذا وفر في التكلفة وفي جودة النقل والحيز الذي نحتاج اليه. كذلك تم استخدامه في حراسة المباني وكشف التسلسل والحريق.



تمارين محلولة

1- يصدر عن ليزر اللياقوت ضوء أحمر طول موجته $6943 \text{ \AA}$ ويبلغ قطر حزمة الليزر الصادرة عنه 1 cm فإذا علمت أن التباعد الزاوي θ لحزمة ليزر طول موجتها λ وقطر حزمته d يعطى بالعلاقة:

$$\theta = \frac{2.44 \lambda}{d}$$

فأوجد قطر حزمة الليزر على بعد 1000 km من المنبع.

Ref. Modern College Ohsics p 523 No. 4

لدينا:

$$\theta = \frac{2.44}{d} \lambda$$

$$\lambda = 6943 \text{ \AA} = 6943 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$d = 1 \text{ cm}$$

$$\therefore \theta = \frac{2.44 \times 6943 \times 10^{-8} \text{ cm}}{1 \text{ cm}} = 1.69 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

وبافتراض D قطر الحزمة على البعد L يكون:

$$D = L \theta$$

ولدينا $L = 10^3 \text{ km} = 10^6 \text{ m}$ إذن يكون:

$$D = 1.69 \times 10^{-4} \times 10^6 \text{ m} = 1.69 \times 10^2 \text{ m} = 169 \text{ m}$$

2- يصدر عن ليزر اللياقوت ضوء أحمر طول موجته $6943 \text{ \AA}$ ويبلغ

قطر الحزمة الصادرة عنه $1/8 \text{ in}$. أوجد قطر حزمة الليزر على بعد 100

ميل إذا علمت أن:

$1 \text{ mi} = 6.336 \times 10^4 \text{ in}$ وأن التباعد الزاوي لحزمة ليزر صادرة عن

قضيب قطره d بطول موجة λ يعطى بالعلاقة:

$$\theta = \frac{2.44 \lambda}{d}$$

$$\text{وأن } 1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$$

Ref. Modern College physics p 523 No.4

لدينا:

$$\theta = \frac{2.44 \lambda}{d}$$

$$\lambda = 6943 \text{ Å} = 6943 \times 10^{-8} \text{ cm} = \frac{6943}{2.54} \times 10^{-8} \text{ in} = 2734 \times 10^{-8} \text{ in}$$

$$d = \frac{1}{8} \text{ in}$$

$$\therefore \theta = \frac{2.44 \times 2734 \times 10^{-8} \text{ in}}{\frac{1}{8} \text{ in}} = 5.34 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

وبافتراض D قطر الحزمة على البعد L يكون:

$$D = L \theta$$

فعلى بعد 100 ميل يكون:

$$D = 100 \times 6.336 \times 10^4 \times 5.34 \times 10^{-4} \text{ in}$$

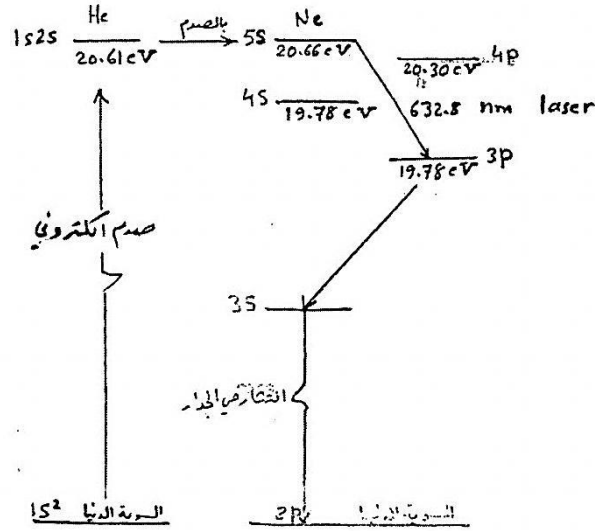
$$D = 3383 \text{ in}$$

3- احسب من الشكل المبين أدناه الفرق بين سويتي الطاقة 3P, 5S في النيون.

عبر عن هذا الفرق بوحدة الالكترون فولط (eV) وبالجول. احسب طول

موجة الفوتون الصادر عن الانتقال من 5S إلى 3P وقارن نتيجتك مع

القيمة المقاسة لضوء ليزر الهليوم نيون.



تعطى الثوابت الفيزيائية التالية:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}, h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}, c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

لدينا:

$$E_2 - E_1 = 20.66 - 19.78 = 1.96 \text{ eV}$$

ولما كان $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$ فإنه يكون:

$$E_2 - E_1 = 1.96 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.14 \times 10^{-19} \text{ joule}$$

ويعطى تواتر الفوتون الصادر (ν) نتيجة انتقال الذرة من السوية E_2 إلى السوية

E_1 بالعلاقة:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} = \frac{c}{\lambda}$$

حيث h ثابت بلانك و λ طول الموجة و c سرعة الضوء. ومنه نجد:

$$\lambda = \frac{h c}{E_2 - E_1}$$

وباستخدام الجملة الدولية حيث:

$$E_2 - E_1 = 3.14 \times 10^{-19} \text{ joule}, c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}, h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ j.sec}$$

نجد:

$$\lambda = \frac{(6.625 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)}{3.14 \times 10^{-19}} = 6333.14 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\lambda = 633 \text{ nm}$$

ويعطي القياس $\lambda = 633 \text{ nm}$ والتطابق تام بين النتيجةين.

الفصل الثاني عشر

نبذة عن النشاط الإشعاعي والفيزياء النووية

Introduction To Radioactivity and Nuclear Physics

1-12 - تمهيد:

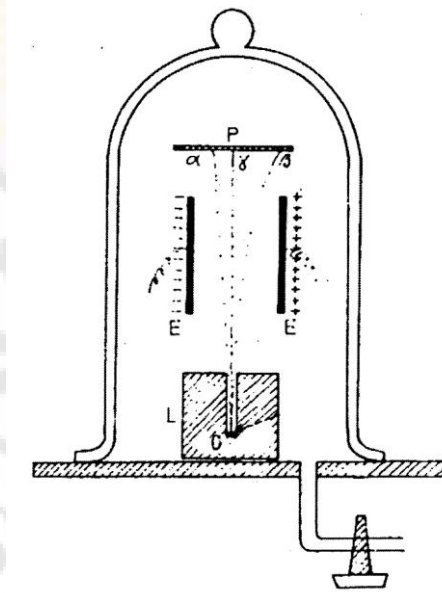
تُعدّ اكتشاف روتجن للأشعة السينية عام 1985 أول طريق المعرفة بنواة الذرة ومكوناتها. فقد دفع هذا الاكتشاف علماء كثيرين للبحث عن أنواع أخرى من الأشعة ذات النفاذية. وقد نجح العالم هنري بيكريل في اكتشاف نوع من الأشعة النفاذية يشبه الأشعة السينية وينبعث من أملاح اليورانيوم مما شجع العالمان بير كوري وزوجته مداد كوري من إجراء دراسة منظمة على العناصر المختلفة وكذلك المركبات والمخاليط التي من بينها مادة البتسبلد Pitchblende التي أمكنها فصل عنصري البولونيوم والراديوم منها.

يحدث النشاط الإشعاعي نتيجة تحولات داخل النواة تسبب انبعاث بعض الجسيمات أو الإشعاعات. وقد وجد أن هذا الانبعاث لا يتأثر بأي تفاعلات كيميائية تحدث للمادة المشعة كما أنه يتم في الهواء السائل وعند درجات الحرارة المنخفضة بنفس الدرجة التي يتم بها في أعلى درجات الحرارة. ويجدر بالذكر هنا أن التفاعلات داخل النواة تختلف عن التفاعلات الكيميائية التي تعتمد على الكترونات المدارات الخارجية في الذرة إذ أن التفاعلات الكيميائية شديدة الحساسية لتغير درجة الحرارة وهذا يشير إلى أن ظاهرة النشاط الإشعاعي لا بد وأن تتم في نواة الذرة وليس في مدارات الكتروناتها.

12-2- الأشعة النووية Nuclear rays

تنبعث عادة من المواد المشعة طبيعياً ثلاثة أنواع من الأشعة تعرف بأشعة ألفا وبيتا وجاما (γ, β, α) وللتحقق من وجود هذه الأنواع الثلاثة تجري التجربة الآتية:

نضع قطعة صغيرة عند O من مادة مشعة كالراديوم مثلاً في قاع ثقب عميق في كتلة من الرصاص L كما هو في الشكل (12-1) وبوضع أمام الثقب وعلى بعد منه لوح تصوير حساس P كما يثبت لوحين معدنيين EE في وضع رأسي الغرض منهما هو التأثير على الإشعاعات المنبعثة من الراديوم بمجال كهربائي يكون اتجاهه عمودياً على اتجاه الأشعة. والجهاز بجميع أجزائه موضوع تحت ناقوس تفريغ يتصل بمضخة هواء ذلك ليتم إجراء التجربة في الفراغ.



الشكل (12-1)

عند توصيل اللوحين EE بالأرض أي في حالة عدم وجود أي مجال كهربائي نجد أن الأشعة تسير جميعها في اتجاه واحد ويظهر ذلك على شكل نقطة سوداء واحدة على لوح التصوير بعد تحميضه وتكون تلك النقطة على امتداد طول الثقب الموضوع به الراديوم المشع داخل كتلة الرصاص، ويحدث ذلك أيضاً عند عدم وجود مجال مغناطيسي.

أما عند التأثير بمجال كهربائي بين اللوحين نلاحظ انقسام النقطة السوداء إلى ثلاث نقط إحداها في نفس مكان النقطة الأصلية وواحدة إلى يمينها والأخرى إلى يسارها كما نلاحظ أن انحراف النقطة ناحية اللوح الموجب التكهرب يكون أكبر بكثير من انحراف النقطة الأخرى ناحية اللوح سالب التكهرب.

نستخلص من ذلك وجود ثلاثة أنواع من الأشعة تنبعث من الراديوم:

1- أشعة تجذب إلى اللوح السالب التكهرب وتسمى أشعة ألفا $\alpha - rays$.

2- أشعة تجذب إلى اللوح الموجب التكهرب وتسمى أشعة بيتا $\beta - rays$.

3- أشعة لا تتأثر بالمجال الكهربائي وتسمى أشعة جاما $\gamma - rays$.

وكما تنحرف أشعة ألفا وبيتا في المجال الكهربائي فإنها تنحرف أيضاً في المجال المغناطيسي مما يثبت أنها جسيمات مشحونة.

12-3- جسيمات ألفا $\alpha - particles$

هي نوى ذرات هليوم- يحمل كل جسيم من ألفا شحنتين موجبتين أي

$2 \times 1.6 \times 10^{-19}$ كولوم. أما كتلة الجسم فتساوي تقريباً أربعة أمثال كتلة

البروتون وتتحرك هذه الجسيمات بسرعة تصل إلى ستة عشر ألفاً من

الكيلومترات في الثانية ولها من الطاقة ما يصل إلى عشرة ملايين إلكترون فولت.

ولتعيين مقدار الشحنة على جسيمات ألفا عملياً وضع رذرفورد وجيجر كتلة معلومة من مادة الراديوم على بعد معين من نافذة عداد جيجر (سيأتي شرح هذا العداد فيما بعد) وتمكنا بذلك من إيجاد عدد جسيمات ألفا التي تنبعث من الجرام من الراديوم في الثانية الواحدة. ثم أسقطا بعد ذلك نفس هذه الكمية من الأشعة على لوح معدني معزول يتصل بالكترومتر لإيجاد معدل الزيادة في شحنة اللوح نتيجة لسقوط الأشعة عليه وبقسمة معدل الزيادة في شحنة اللوح على عدد الجسيمات المنبعثة في الثانية وجد الشحنة على الجسيم الواحد هي 3.19×10^{-19} كولوم وتساوي عملياً هذه القيمة ضعف شحنة الإلكترون ولكن بإشارة موجبة.

ولتعيين كتلة جسيم ألفا استخدم الطريقة المعروفة في إيجاد نسبة الشحنة إلى الكتلة q/m للجسيمات المشحونة وذلك بالتأثير عليها بمجال كهربائي وآخر مغناطيسي ثم معادلة انحراف الجسيمات تحت تأثير المجال الكهربائي والانحراف الناشئ عن المجال المغناطيسي عندما يكون تأثيره عمودياً على كل من اتجاه حركة الجسيمات واتجاه المجال الكهربائي.

وقد وجد أن النسبة بين شحنة جسيم α إلى كتلته هي:

$$q/m = 1.82 \times 10^7 \text{ coul./Kg.}$$

فإذا كانت شحنة الجسيم هي:

$$q = 3.2 \times 10^{-19} \text{ coulomb.}$$

تكون بذلك كتلته هي:

$$m = 6.62 \times 10^{-27} \text{ Kg.}$$

وهذه القيمة تساوي عملياً كتلة أربع ذرات أيديروجين أي حوالي أربعة بروتونات.

وللتحقق من أن جسيمات ألفا ما هي إلا نوى ذرات هليوم جمع رذرفورد على مدى ستة أيام جسيمات ألفا المنبعثة من مصدر مشع داخل أنبوبة تفريغ كهربى ثم بتوصيل الأنبوبة بمصدر جهد مرتفع وبدراسة الطيف الناتج حينئذ أمكن التحقق بوضوح من وجود غاز الهيليوم الذي لم يكن موجوداً قبل ذلك. وقد أثبتت التجربة أن جسيم ألفا ما هو إلا نواة ذرة هليوم تأينت مرتين He^{++} أي أن هناك إلكترونين ناقصين من المقدار الخارجى لذرة الهيليوم. (Doubly ionized helium atom)

12-4- جسيمات بيتا β - Particles

عند اختبار أشعة بيتا لتحديد مقدار شحنتها وكتلتها بالطريقة التي اتبعت مع جسيمات ألفا وجدت أنها إلكترونات تتحرك بسرعات متفاوتة تفاوتاً كبيراً فمنها ما هو بطيء ومنها ما تقترب سرعته من 0.999 من سرعة الضوء. ولذلك فعند قياس النسبة بين شحنة الإلكترون إلى كتلته e/m بطريقة الانحراف في المجالات الكهربائية والمغناطيسية يجب أن يدخل في الاعتبار النظرية النسبية لأينشتاين special theory of relativity والتي تنص على أن كتلة الجسيم المتحرك m تتوقف على سرعته v تبعاً للعلاقة:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1 - 12)$$

حيث m_0 هي كتلة الجسيم في حالة السكون، c هي سرعة الضوء وواضح من المعادلة (1-12) أنه عندما تقترب سرعة الجسيم v من سرعة الضوء c تزداد قيمة كتلته m زيادة كبيرة $\left(\frac{v}{c} \simeq 1\right)$ بينما عند السرعات الصغيرة $\left(\frac{v}{c} < 1\right)$ يمكن إهمال الحد $\frac{v^2}{c^2}$ وبالتالي يمكن اعتبار أن $m = m_0$ بدون خطأ يذكر. وقد أمكن بالتجربة التحقق من صحة المعادلة النسبية السابقة وذلك باستخدام أشعة بيتا الصادرة عن الراديوم.

5-12- أشعة جاما γ - rays

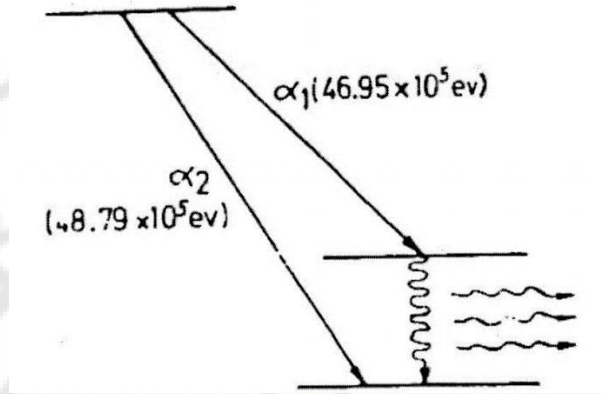
هذا النوع من الأشعة لا يتأثر إطلاقاً بالمجالات الكهربائية أو المغناطيسية ولذلك فلا يمكن أن تكون هذه الأشعة جسيمات مشحونة. وقد وجد أن هذه الأشعة تظهر حيوداً على سطح بعض البلورات تماماً كما يحدث للأشعة السينية ولكن وجد أن زوايا الحيود لأشعة جاما صغيرة بدرجة كبيرة. وقد أثبتت تلك التجارب أن هذه الأشعة هي نوع من أنواع الأشعة الكهرومغناطيسية أطوال فوتوناتها صغيرة جداً وتصل إلى حوالي $\frac{1}{100}$ من أطوال موجات الأشعة السينية المعتادة. فهي لذلك ذات طاقات عالية جداً مما يسمح لها بالنفوذ خلال بضعة ملليمترات من الرصاص وربما أكثر من ذلك.

ويشكل طيف أشعة جاما المنبعث من أي عنصر مشع طيفاً خطياً line spectrum وبذلك فهو مختلف عن طيف أشعة بيتا الذي هو من النوع المستمر $\text{continuous spectrum}$.

أي أن طاقة فوتون جاما الصادر من نواة ذرة معينة تكون ثابتة دائماً مما يشير إلى أن انبعاث الفوتون يصاحب دائماً انتقال النواة من مستوى طاقة مرتفع إلى آخر أقل منه.

نأخذ مثلاً الإشعاع الصادر من نواة الراديوم عندما ينبعث جسيم ألفا. تتحول ذرة الراديوم إلى رادون Radon. وقد وُجد أن هناك نوعين من جسيمات ألفا تصدر عن الراديوم للنوع الأول طاقة تقدر بـ $48,79 \times 10^5$ إلكترون فولت بينما طاقة النوع الثاني هي $46,95 \times 10^5$ إلكترون فولت. كما وجد أن فوتون جاما المنبعث من الراديوم له طاقة قدرها $1,84 \times 10^5$ إلكترون فولت. وعلى هذا الأساس فإن انبعاث جسيم ألفا ذي الطاقة الصغيرة يسبب تحول ذرة الراديوم إلى رادون ولكن في حالة مثارة Excited state. وهذه الحالة غير مستقرة فينبعث منها فوتون جاما طاقته $1,84 \times 10^5$ إلكترون فولت.

ويمكن أيضاً أن ينبعث مباشرة جسيم ألفا ذو الطاقة الكبيرة وعندئذ لا يصاحب خروج جسيم ألفا هذا انبعاث أي فوتون جاما. وتكون طاقة جسيم ألفا في الحالة الثانية مساوية طاقة جسيم ألفا في الحالة الأولى مضافاً إليه فوتون جاما كما هو مبين في الشكل (2-12) الذي يظهر مستويات الطاقة Energy levels النووية عند التحول من عنصر الراديوم إلى عنصر الرادون.



الشكل (2-12).

12-6- اكتشاف البوزيترون Positron

تمتص أشعة جاما عند مرورها في المواد المختلفة كما يحدث للأشعة السينية. وكل شدة الأشعة وفقاً لدالة أسية. فإذا سقط شعاع جاما شدته I_0 عمودياً على لوح سمكه d سم تصبح شدة الشعاع بعد مروره هي I حيث:

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (2-12)$$

ويعرف الثابت μ بمعامل امتصاص المادة للأشعة جاما.

وتمتص أشعة جاما في المواد بأحد ثلاث طرق: absorption coefficient

(a) بالتأثير الكهروضوئي photo - electric effect

وفيه يسبب سقوط فوتونات جاما على المادة انبعاث الكترونات photo electrons من ذراتها وتمتص هذه الالكترونات جزءاً من طاقة الأشعة.

(b) بتأثير كومبتون Compton effect

حيث يتصادم فوتون جاما مع أحد الالكترونات الحرة في المادة التي تمتص نتيجة لتصادم جزءاً من طاقة الفوتون تاركة إياه بطاقة أقل ويسبب ذلك في زيادة طول موجة هذا الفوتون.

(c) الإنتاج الزوجي pair production

وجد أنه عند مرور فوتون جاما ذو طاقة عالية بالقرب من المجال الكهربائي القوي لنواة الذرة يختفي الفوتون تماماً ويتحول إلى جسيمين متساويين في الكتلة ولكن مختلفين في الشحنة. وتسمى هذه العملية بالإنتاج الزوجي pair production وقد ثبت أن أحد هذين الجسيمين هو الكترون أما الجسيم الآخر الذي يماثل الالكترتون تماماً ولكن بشحنة موجبة فقد أطلق عليه اسم البوزيترون وعمر هذا الجسيم صغير جداً إذ سرعان ما يتحد مع أي الكترون حر. وينتج عن ذلك ظهور فوتون جاما آخر. ولحساب أقل طاقة لفوتون جاما يمكن أن ينتج الكترون وبوزيترون يستخدم قانون أينشتاين لتكافؤ الكتلة والطاقة:

$$E = m C^2 \quad (3 - 12)$$

حيث E هي الطاقة التي تتحرر نتيجة لتحول كتلة m من المادة، C هي سرعة الضوء.

$$m_e = 9.1 \times 10^{-31} Kg \quad \text{فإذا كانت كتلة الالكترتون هي}$$

$$= 2 \times 9.1 \times 10^{-31} Kg \quad \text{كانت كتلة زوج الجسيمات هو}$$

وتكافئ هذه الكتلة قدراً من الطاقة E هو

$$E = 2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times (3 \times 10^8)^2$$

$$= 1.64 \times 10^{-13} \text{ joules}$$

لكن من تعريف الالكترتون فولت

$$ev = 1.6 \times 10^{-19} \text{ joules}$$

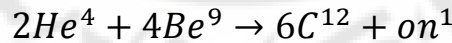
أي أن الطاقة المكافئة لكتلة الجسيمين هي:

$$E = 1.02 \times 10^6 \text{ ev} = 1.02 \text{ Mev}$$

وهذا يعني أن فوتون جاما ذي الطاقة 1.02 مليون إلكترون فولت على الأقل يمكن أن يتحول إلى إلكترون وبوزيترون وعندما تكون طاقة الفوتون أعلى من ذلك فإن الجسيمين يتقاسمان الفائض من الطاقة وتظهر على شكل طاقة حركة.

12-7 - اكتشاف النيوترون والنيوترينو Neutron&Neutrino

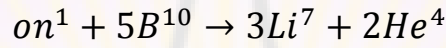
في عام 1930 وجد بوزوبيك في ألمانيا وجوليو ومدام كوري في فرنسا أنه عند اصطدام جسيمات ألف سريعة بعنصر البريليوم تخرج إشعاعات أو جسيمات لها قدر نفاذية أكبر بكثير من قدرة جسيمات ألفا التي سببتها ولم تتجح جميع محاولات تفسير طبيعة هذه الأشعة على أنها أشعة جاما حتى جاء تشادويك عام 1932 وفسر نتائج جميع التجارب على هذه الأشعة تفسيراً مقبولا افتراض أنها عبارة عن جسيمات غير مشحونة كتلتها تساوي تقريبا كتلة البروتون. وقد سمى هذه الجسيمات تيوترونات neutrons وخروج النيوترون من ذرة البريليوم يخضع للتفاعل النووي.



حيث on^1 هو رمز النيوترون.

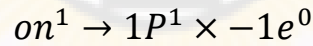
ولما كان النيوترون جسيما عديم الشحنة لذلك فهو لا يحدث تأينا في الغازات التي يمر بها كما أنه لا ينحرف في مجال كهربائي أو مغناطيسي. ولا يمكن إيقاف النيوترون أو تغيير اتجاه سيره إلا بتصادم مباشر مع نواة ذرة أخرى تعترض طريقه. وهو في هذه الحالة إما أن يتصادم معها تصادما مرنا

فيرتد تبعاً لقوانين التصادم المرن أو ينفذ خلال نواة الذرة وربما أحدث فيها انشطاراً. ولما كانت كتلة النيوترونات مساوية تقريباً لكتلة البروتونات لذلك وجد أن أنسب طريقة لتهدة سرعة النيوترونات هي أن تتصادم مع نوى ذرات أيروجين أو مواد أيروجينية مثل الماء أو البارافين. وإذا ما أصبحت سرعة النيوترونات بطيئة أمكن الكشف عنها بجعلها تصدم ذرات يورون *Boron* فينبعث منها جسيمات ألفا تبعاً للتفاعل



ويمكن الكشف عن جسيمات ألفا بواسطة عداد جيجر أو بغرفة تأين.

ومن أهم نتائج اكتشاف النيوترون هو وضع نموذج صحيح للتركيب الداخلي لنواة الذرة. لما كانت جميع الحقائق العلمية تشير إلى عدم وجود الإلكترونات في نواة الذرة. لذلك يمكن اعتبار أن خروج أشعة بيتا من النواة نتيجة تفاعل نووي يتم فيه تحول أحد النيوترونات إلى بروتون والكترون يقذف خارج النواة على شكل جسيم بيتا تبعاً للمعادلة



ولما كانت أشعة بيتا الصادرة من أي نواة مشعة يمكن أن تكون لها طاقات تتفاوت من قيم صغيرة إلى حد أقصى upper limit ولـ اعتبارات خاصة بمستويات الطاقة في النواة اقترح باولي أن النواة تفقد دائماً مقدراً ثابتاً من الطاقة لكل جسيم بيتا ينبعث منها وينظر هذا المقدار أكبر طاقة في طيف جسيمات بيتا. فعندما ينبعث جسيم بيتا بطاقة أقل من هذا الحد الأقصى يصاحب ذلك انبعاث.

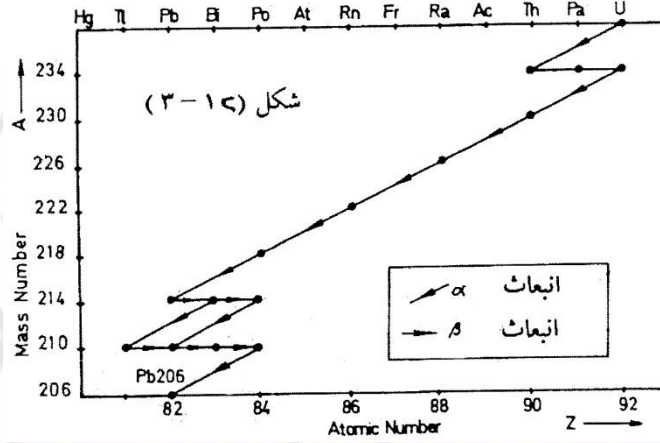
اسم النيوترينو *neutrino* ليس له شحنة وكتلته الساكنة تساوي صفراً، وتوازن طاقته الفرق بين الطاقة الثابتة التي تفقدها النواة عند انبعاث جسيم بيتا والطاقة الفعلية التي انبعث بها هذا الجسيم.

12-8- الاضمحلال الإشعاعي والسلاسل الإشعاعية

Radio active decay and radio active series

تمر أي نواة مشعة بسلسلة من التغيرات قبل أن تصل إلى حالة الاستقرار. فكل جسيم ينبعث من النواة يغير من شحنتها أو كتلتها أو كليهما. فمثلاً عند انبعاث جسيم ألفا من نواة ذرة الراديوم $^{226}_{88}\text{Ra}$ فإنها تنقص في الكتلة بمقدار أربعة وحدات كتلة كما تفقد أيضاً شحنتين موجبتين فتصبح الذرة الجديدة هي الرادون $^{222}_{86}\text{Ra}$.

أما إذا انبعث جسيم بيتا من النواة فإن العدد الذري يزداد بمقدار الوحدة دون أي تغير في الكتلة. ولا يحدث أي تغير أو تحول للذرة عند انبعاث أشعة جاما. ويبين الشكل (3-12) السلسلة الإشعاعية (Radio-active disintegration series) التي تمر بها نواة ذرة اليورانيوم ^{238}U حتى تصل إلى الناتج النهائي المستقر وهو ذرة الرصاص $^{206}_{\text{Pb}}$ (فليست هذه هي السلسلة الإشعاعية الوحيدة بل توجد سلاسل إشعاعية أخرى تبدأ بالثوريوم 232 والنيوتونيوم 237 والاككتينيوم 235 وتنتهي جميعها بالرصاص 206).



الشكل (12-3).

9-12- زمن نصف العمر الإشعاعي Half life time

تتعرف عادة أي مادة مشعة بما يأتي:

1- نوع الإشعاع الصادر عن نوياتها.

2- زمن نصف العمر الإشعاعي λ ويعرف بأنه الزمن اللازم لكي تتحول

نصف عدد ذرات المادة المشعة إلى نوع جديد من الذرات فمثلاً زمن

نصف العمر الإشعاعي للراديويم $^{226}_{88}\text{Ra}$ هو 1620 سنة أي أنه إذا

كان لدينا 1 جرام من مادة الراديويم تكون الكمية المتبقية منه على

صورة راديويم بعد 1620 عاما هي نصف جرام فقط.

نفرض أن هناك N_0 ذرات مشعة في لحظة ما. وأن عدد الذرات التي تبقى

دون تحول إشعاعي بعد زمن t ثانية هو N تكون العلاقة من هذه المتغيرات هي

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4-12)$$

حيث λ هو مقدار ثابت يميز المادة المشعة ويسمى قابت الاضمحلال

(decay contant) ويعرف بأنه التغير النسبي في عدد الذرات المشعة في

وحدة الزمن. فإذا تحولت عدد ΔN ذرات في زمن قدره Δt وكان العدد الكلي للذرات في ذلك الوقت هو N يكون ثابت الاضمحلال هو

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (5-12)$$

والإشارة السالبة هنا تفيد بأنه كلما ازداد الزمن كلما نقص عدد الذرات المتحولة.

من المعادلة (4-12) إذا وضعنا $t = \lambda$ تكون $N = \frac{1}{2} N_0$ أي أن

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t}$$

ومنها

$$\lambda t = \log_e 2 = 2.303 \log_{10} 2 = 0.693$$

$$\therefore \lambda = \frac{0.693}{t} \quad (6-12)$$

وتعطي هذه المعادلة علاقة ثابت الاضمحلال λ بزمّن نصف العمر للمادة المشعة.

مثال (1-12):

إذا علم أن زمن نصف العمر للرادون هو 3,82 يوما وأمكن فصل عدد 8×10^{10} ذرات مادة الرادون من الراديوم. أوجد عدد الذرات التي تتحول إشعاعيا في زمن 11,46 يوما.

الحل:

إذا لاحظنا أن الزمن 11,46 يوما يعادل ثلاثة أمثال زمن نصف العمر للرادون نجد أن نصف عدد الذرات يتحول في 3,82 يوما الأولى أي يتبقى عدد 4×10^{10} ذرات فقط وفي عدد 3,82 يوما التالية يتحول نصف الباقي أي

يتبقى عدد 2×10^{10} ذرات وفي عدد 3,82 يوماً الأخيرة يتحول نصف المتبقي أي يبقى مشعاً 1×10^{10} ذرات فقط وبذلك تكون عدد الذرات التي تحولت إشعاعياً هو 7×10^{10} ذرة.

أما الحل الرياضي باستخدام القانون، فكما يلي:
ثابت الاضمحلال λ هو

$$\lambda = \frac{0.693}{T} = \frac{0.693}{3.82}$$

∴ عدد الذرات التي تبقى دون تحول هي:

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{-\lambda t} \\ &= 8 \times 10^{16} e^{-\frac{0.693}{3.82} \times 11.46} \\ &= 8 \times 10^{10} e^{-2.029} \\ &= 8 \times 10^{10} \times 0.125 \\ &= 1 \times 10^{10} \end{aligned}$$

∴ عدد الذرات التي تحولت إشعاعياً هو 1×10^{10} ذرة.

مثال (2-12):

أوجد مقدار القوة الكولومية الواقعة على بروتون عند "سطح" نواة يورانيوم ${}_{92}^{238}\text{U}$ على فرض أن البروتونات تتوزع توزيعاً منتظماً في النواة التي يمكن اعتبارها كرة نصف قطرها 9×10^{-15} متراً.

الحل:

يوجد بالنواة خلال البروتون المعني عدد 91 بروتوناً آخر شحنتها هي $91 \times 1.6 \times 10^{-19}$ كولوم حيث 1.6×10^{-19} هي شحنة البروتون الواحد. نعتبر هذه الشحنة مركزة في مركز النواة أي أنها تبعد مسافة 9×10^{-15} متراً عن البروتون المعني.

تبعاً لقانون كولوم تكون القوة المؤثرة على البروتون هي:

$$F = K_o \frac{q q^1}{r^2}$$
$$= \frac{9 \times 10^9 \times 91 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 1.6 \times 10^{-19}}{(9 \times 10^{-15})^2}$$
$$= 260 \text{ newtons}$$

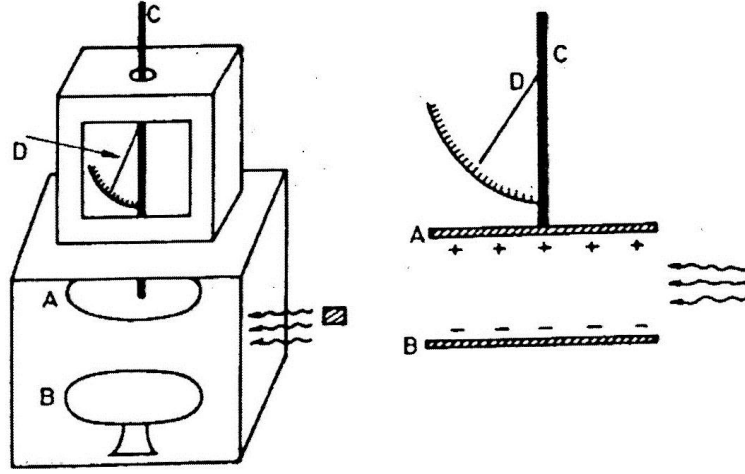
وهذه قوة تزيد على ثقل 26.5 كيلو جرام.

10-12 - أجهزة كشف الإشعاع النووي Nuclear detectors

منذ اكتشاف بيكر الأشعة المؤينة وإلى الآن تستخدم الألواح الفوتوغرافية وأجهزة الالكترومتيرات في الكشف عن هذه الأشعة. وبالرغم من أنه قد أدخل على هذه الأدوات الكثير من التعديلات إلا أن الفكرة أساساً لم تتغير. وفيما يلي وصف لبعض أنواع كاشفات الأشعة والتي تعتمد في عملها على تأين الغازات.

1-10-12 - الالكترومتيرات Electrometers

وهي أبسط أنواع كاشفات الأشعة. وتتكون غرفة تأين الالكترومتر كما هو واضح من الشكل (4-12) من زوج من الألواح المعدنية B, A المعزولة جيداً وبينهما غاز أو هواء. يتصل اللوح A بعمود معدني C مثبت على طرفه الأعلى طرف ورقة ذهبية D عندما يشحن الالكترومتر يتولد فرق في الجهد بين لوحين المكثف. ولما كانت الشحنة على العمود C والورقة الذهبية D من نفس النوع. تتنافر الورقة الذهبية فيبتعد طرفها الحر متحركاً على مقياس مدرج تؤخذ قراءاته مقياساً لشحنة الالكترومتر وبالتالي لفرق الجهد بين لوحيه.



الشكل (4-12).

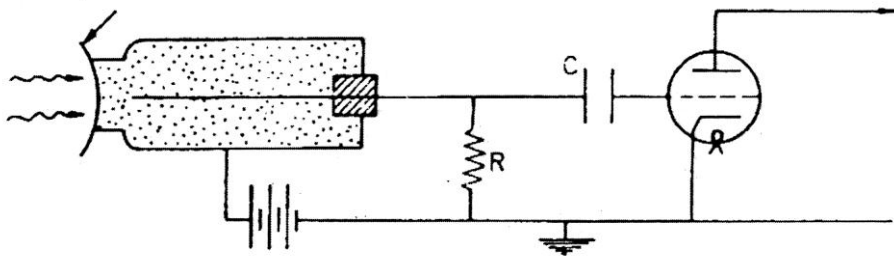
إذا مر جسيم في غرفة التأين ينتج عن ذلك تأين الغاز بين لوحى الالكترومتر وتتجه الالكترونات إلى اللوح الموجب بينما تتجه الأيونات السالبة وينشأ عن ذلك تيار تأين ionization current بين اللوحين مما يسبب انقاص شحنة الالكترومتر وبالتالي هذه يلاحظ حينئذ هبوط الورقة الذهبية واقتربها من العمود C ويستدل على شدة الإشعاع الساقط بمعدل النقص في جهد الالكترومتر كما يسجله انخفاض الورقة الذهبية والتي يمكن تتبع حركتها بواسطة ميكروسكوب.

ويستخدم العاملون في معامل الطاقة النووية والذين يحتمل تعرضهم للإشعاعات النووية نوعاً من الالكترونات على شكل أقلام تسمى دوزيمترات Dosimeters تشحن أول كل أسبوع ويعطى واحد لكل عامل. ثم يقاس النقص في شحنة أو جهد الالكترومتر في نهاية الأسبوع وتسجل القراءات لكل فرد وذلك لمعرفة كمية الإشعاع الذي تعرض له أثناء عمله. فإذا ما زاد مقدار

الإشعاع الذي تعرض له عند حد معين مسموح به minimum permissible dose يمنع من الاستمرار في عمله حرصاً على حياته ومنعاً للأضرار التي قد تلحق به إذا استمر تعرضه للأشعة.

12-10-2- عداد جيجر Geiger counter

تُعدّ عداد جيجر واحداً من أهم أجهزة قياس الإشعاع النووي إذ بواسطته يمكن إيجاد عدد الجسيمات المشعة المنبعثة من أي مادة مشعة. ويتركب العداد كما في الشكل (5-12) من أسطوانة معدنية بداخلها غاز أرجون تحت ضغط مخلخل إلى حوالي 50مم زئبق ومثبت داخل الأسطوانة سلك معزول عنها عزلاً جيداً ويوضع بين السلك والاسطوانة فرق في الجهد أقل قليلاً من الجهد اللازم لإحداث انهيار أو تفريغ كهربى electric breakdown داخل الغاز.



الشكل (5-12) عداد جيجر.

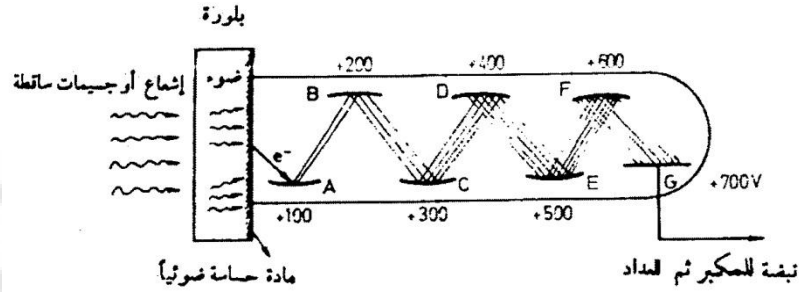
يقفل الأسطوانة من الامام نافذة رقيقة جدا من مادة مثل الميكا حتى تسمح بدخول الأشعة للعداد بسهولة، عند مرور أي جسيم داخل الغاز يحدث تأين وتتجلى أيونات الغاز بتأثير فرق الجهد بين السلك والأسطوانة مما يسبب المزيد من التأين عن طريق التصادم بين الأيونات المتعجلة وجزيئات الغاز

ويسبب ذلك مرور تيار تأين في المقاومة R لحظة مرور الجسيم. وينتج عن ذلك تغير لحظي في فرق الجهد السلك والاسطوانة يظهر على شكل نبضة كهربية electric pulse تصاحب مرور كل جسيم داخل الجهاز. ويمكن تكبير تلك النبضات بواسطة مكبر وتوصل بعد ذلك إلى عداد آلي. وهذا يعني إمكان إيجاد عدد الجسيمات الكلي الذي يمر بالعداد إذ أن كل جسيم يحدث نبضة في الجهاز تسجل بواسطة العداد الآلي.

يستخدم عداد جيجر عادة في عدد جسيمات بيتا أو ألفا كما يمكن له أيضاً إيجاد عدد الفوتونات من أشعة X أو فوتونات الأشعة فوق البنفسجية.

12-10-3- عداد الوميض Scintillation counter

يتكون عداد الوميض الشكل (6-12) من بلورة من أيوديد الصوديوم NaI منشطة بنسبة بسيطة من الثاليوم. وتتميز هذه البلورة بخواصها البلورية فهي تعطي ومضة ضوء كلما سقط عليها جسيم ألفا أو بيتا أو فوتون جاما. والسطح الخلفي للبلورة مطلي بمادة حساسة للضوء كالتلي يطلو بها مهبط الخلية الكهروضوئية. فعند سقوط ضوء الوميض عليها تتبعث منها فوتو الكترونات Photo-electrons ولذلك يعمل هذا السطح عمل خلية ضوئية Photo tube حساسة جداً. وتتصل بالبلورة أنبوبة المضاعفة الالكترونية electron multiplier tube وعملها هو مضاعفة عدد الفوتو الكترونات المنبعثة من البلورة وذلك لتكبير حجم النبضة الناشئة عن سقوط الجسم على البلورة فيسهل تسجيلها بواسطة العداد.



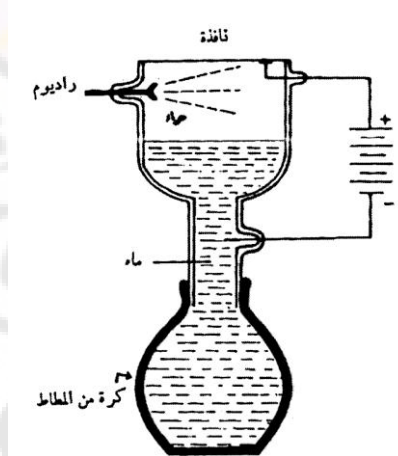
الشكل (6-12) عداد الوميض.

عندما تسقط جسيمات ذات طاقات عالية أو فوتونات جاما تنبعث ومضات ضوئية (فوتونات) داخل البلورة. تسقط هذه الفوتونات على المادة الحساسة المطلي بها سطح البلورة الخلفي فتسبب انبعاث الكترونات Photo electrons تنجذب إلى اللوح A ثم B وهكذا حتى C داخل الأنبوبة انظر الشكل (6-12) وذلك تحت تأثير فرق الجهد المتزايد على التتابع من لوح إلى آخر والذي يمكن تهيئته بواسطة بطارية. وعندما يسقط الالكترون على أي من هذه الألواح ينبعث منها المزيد من الالكترونات عن طريق الانبعاث الالكتروني الثانوي secondary electron emission فتتضاعف أعدادها حتى تصل إلى لوح التجميع G والذي يتصل بشبكة صمام مكبر لتكبير النبضة ثم إلى عداد. ومن مزايا هذا النوع من العدادات أنه أكثر حساسية لأشعة جاما عن عدادات جيجر.

كما أن حجم النبضة الخارجة من أنبوبة المضاعفة الالكترونية يتناسب مع طاقة الجسيم أو الفوتون الساقط. أي أن الجهاز يمكنه تعيين طاقة الجسيمات بالإضافة إلى عددها.

12-10-4 - غرفة ويلسن السحابية Wilson cloud chamber

تعتمد نظرية الجهاز على أنه إذا تمدد غاز فجأة داخل حيز محدود فإن الشغل المبذول في التمدد يؤخذ على حساب الطاقة الداخلية للغاز. وباعتبار أن المجموعة معزولة فإن هذه الطاقة تمتص من حرارة الغاز ولذلك يبرد. فإذا كان الغاز ملائماً لسطح ماء بحيث يكون مشبعاً بالبخار أصلاً فإن هذا التمدد يجعله فوق مشبع وبالتالي يسهل تكثيف البخار الزائد على جسم غريب يتصادف وجوده بالداخل، عند مرور الأشعة المؤينة داخل غرفة ويلسن يحدث تأين في الهواء. وتعمل الأيونات عمل نويات تكاثف condensation nuclei وبذلك يظهر واضحاً للعين خلال النافذة خط سير الجسيم نتيجة لتكثيف بخار الماء على تلك الأيونات الناشئة على طول المسار. ولكي نحدث حالة فوق التشبع هذه في هواء الغرفة انظر الشكل (7-12) نضغط على كرة المطاط باليد فيرتفع سطح الماء في الغرفة ثم بإزالة الضغط يحدث التمدد الفجائي لهواء الغرفة ومن ثم نحصل على حالة فوق التشبع.



الشكل (7-12) غرفة ويلسن.

ولزيادة وضوح رؤية هذه المسارات تزال أي أيونات تكون موجودة قبل مرور الجسيم وذلك عن طريق التأثير بمجال كهربى بين سطح الماء وطبقة رقيقة غير منظورة من مادة موصلة كهربيا ومرسبة على السطح الداخلى للنافذة. ووجود هذا المجال يجعل الحيز داخل الغرفة السحابية خاليا دائما من الأيونات وبذلك يصبح معدا لظهور مسار أي جسيم يمر بداخله.

مثال (3-12):

وجد أنه عندما يدخل بروتون غرفة ويلسن السحابية عابرا مجالا مغناطيسيا منتظما شدته 1 وبيبر/متر² في اتجاه عمودي عليه فإنه يتحرك في مسار دائري نصف قطره 0.2 مترا. أوجد سرعة البروتون علما بأن كتلته 1.67×10^{-27} كيلو جرام (أهمل تأثير السرعة على الكتلة).

الحل:

تتزن القوة الطاردة المركزية مع القوة التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على البروتون تبعا للعلاقة:

$$B q v = \frac{mv^2}{r}$$

$$\therefore 1 \times 1.6 \times 10^{-19} \times v = \frac{1.67 \times 10^{-27} \times v^2}{0.2}$$

$$\therefore v = 2.5 \times 10^7 \text{ m/sec.}$$

تمارين ومسائل

- 1- في عام 1960 تمكن أحد المعامل من تخضير 20 ميلي جرام من التريتيوم (أحد النظائر المشعة للأيدروجين H^3). أوجد مقدار ما يتبقى منه عام 1985 علما بأن نصف العمر الزمني له هو 12.5 سنة.
- 2- إذا علم أن نصف العمر الزمني للراديوم هو 1600 سنة ما هي نسبة التحول لعينة من الراديوم بعد 6400 سنة؟
- 3- أوجد طاقة جسيم α تسارع خلال فرق في الجهد قدره 50000 فولت.
- 4- أوجد النسبة m/m_0 لجسيم بيتا يتحرك بسرعة تعادل نصف سرعة الضوء. (m كتلة الجسيم أثناء حركته، m_0 هي كتلته في حالة السكون).
- 5- ما هي أقل طول موجة لفوتون جاما يمكنه التحول إلى زوج الكترون وبوزيترون؟



جداول الثوابت الفيزيائية



عوامل التحويل من واحدة لأخرى

ACCELERATION التسارع	LENGTH الطول
$1\text{ m.s}^{-2} = 100\text{ cm.s}^{-2} = 3.281\text{ ft.s}^{-2}$	$1\text{ m} = 100\text{ cm} = 1000\text{ mm} = 10^6\mu\text{m} = 10^9\text{ nm}$
$1\text{ cm.s}^{-2} = 0.01\text{ m.s}^{-2} = 0.03281\text{ ft.s}^{-2}$	$1\text{ km} = 1000\text{ m} = 0.6214\text{ mi}$
$1\text{ ft.s}^{-2} = 0.3048\text{ m.s}^{-2} = 30.48\text{ cm.s}^{-2}$	$1\text{ m} = 3.28\text{ ft} = 39.37\text{ in}$
$1\text{ mi.hr}^{-1}.\text{s}^{-1} = 1.467\text{ ft.s}^{-2}$	$1\text{ cm} = 0.3937\text{ in}$
MASS الكتلة	$1\text{ in} = 2.540\text{ cm}$
$1\text{ kg} = 10^3\text{ g} = 0.0685\text{ slug}$	$1\text{ ft} = 30.48\text{ cm}$
$1\text{ g} = 6.85 \times 10^{-5}\text{ slug}$	$1\text{ yd} = 91.44\text{ cm}$
$1\text{ slug} = 14.59\text{ kg}$	$1\text{ mi} = 5280\text{ ft} = 1.609\text{ km}$
$1\text{ u} = 1.661 \times 10^{-27}\text{ kg}$	$1\text{ \AA} = 10^{-10}\text{ m} = 10^{-8}\text{ cm} = 10^{-1}\text{ nm}$
$1\text{ kg has a weight of } 2.205\text{ lb when } g = 9.80\text{ m.s}^{-2}$	$1\text{ nautical mile} = 6080\text{ ft}$
FORCE القوة	$1\text{ light year} = 9.461 \times 10^{15}\text{ m}$
$1\text{ N} = 10^5\text{ dyn} = 0.2248\text{ lb}$	AREA المساحة
$1\text{ lb} = 4.448\text{ N} = 4.448 \times 10^5\text{ dyn}$	$1\text{ cm}^2 = 0.155\text{ in}^2$
PRESSURE الضغط	$1\text{ m}^2 = 10^4\text{ cm}^2 = 10.76\text{ ft}^2$
$1\text{ pa} = 1\text{ N.m}^{-2} = 1.451 \times 10^{-4}\text{ lb.in}^{-2} = 0.209\text{ lb.ft}^{-2}$	$1\text{ in}^2 = 6.452\text{ cm}^2$
$1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa}$	$1\text{ ft}^2 = 144\text{ in}^2 = 0.0929\text{ m}^2$
$1\text{ lb.in}^{-2} = 6891\text{ Pa}$	VOLUME الحجم
$1\text{ lb.ft}^{-2} = 47.85\text{ Pa}$	$1\text{ LITER} = 1000\text{ cm}^3 = 10^{-3}\text{ m}^3 = 0.03531\text{ ft}^3 = 61.02\text{ in}^3$
$1\text{ atm} = 1.013 \times 10^5\text{ Pa} = 1.013\text{ bar}$	$1\text{ ft}^3 = 0.02832\text{ m}^3 = 28.32\text{ liter} = 7.477\text{ gallons}$
$= 14.7\text{ lb.in}^{-2} = 2117\text{ lb.ft}^{-2}$	$1\text{ gallon} = 3.788\text{ liter}$
$1\text{ mm Hg} = 1\text{ torr} = 133.3\text{ Pa}$	TIME الزمن
ENERGY الطاقة	$1\text{ min} = 60\text{ s}$
$1\text{ J} = 10^7\text{ ergs} = 0.239\text{ cal}$	$1\text{ hr} = 3600\text{ s}$
$1\text{ cal} = 4.186\text{ J (based on } 15^\circ\text{ calorie)}$	$1\text{ da} = 86.400\text{ s}$
$1\text{ ft.lb} = 1.356\text{ J}$	$1\text{ ya} = 365.24\text{ da} = 3.156 \times 10^7\text{ s}$
$1\text{ Btu} = 1.55\text{ J} = 252\text{ cal} = 778\text{ ft.lb}$	ANGLE الزاوية
$1\text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{ J}$	$1\text{ rad} = 57.30^\circ = 180^\circ/\pi$
$1\text{ kWh} = 3.600 \times 10^6\text{ J}$	$1^\circ = 0.01745\text{ rad} = \pi/180\text{ rad}$
MASS-ENERGY EQUIVALENCE تكافؤ الكتلة والطاقة	$1\text{ revolution} = 360^\circ = 2\pi\text{ rad}$
$1\text{ kg} \leftrightarrow 8.988 \times 10^{16}\text{ J}$	$1\text{ rev.min}^{-1}(\text{rpm}) = 0.1047\text{ rad.s}^{-1}$
$1\text{ u} \leftrightarrow 931.5\text{ MeV}$	SPEED السرعة
$1\text{ eV} \leftrightarrow 1.073 \times 10^{-9}\text{ u}$	$1\text{ m.s}^{-1} = 3.28\text{ ft.s}^{-1}$
POWER الاستطاعة	$1\text{ ft.s}^{-1} = 0.3048\text{ m.s}^{-1}$
$1\text{ W} = 1\text{ J.s}^{-1}$	$1\text{ mi mm}^{-1} = 60\text{ mi.hr}^{-1} = 88\text{ ft.s}^{-1}$
$1\text{ hp} = 746\text{ W} = 550\text{ ft.lb.s}^{-1}$	$1\text{ km.hr}^{-1} = 0.2778\text{ m.s}^{-1} = 0.6214\text{ mi.hr}^{-1}$
$1\text{ Btu.hr}^{-1} = 0.293\text{ W}$	$1\text{ mi.hr}^{-1} = 1.466\text{ ft.s}^{-1} = 0.4470\text{ m.s}^{-1} = 1.609\text{ km.hr}^{-1}$
	$1\text{ furlong fortnight}^{-1} = 1.662 \times 10^{-4}\text{ m.s}^{-1}$

الثوابت الفيزيائية الأساسية

الاسم	الرمز	القيمة العددية والواحدة
Speed of light	c سرعة الضوء	$2.9979 \times 10^8 m.s^{-1}$
Charge of electron	e شحنة الالكترون	$1.602 \times 10^{-19} C$
Gravitational constant	G ثابت التجاذب العالمي	$6.673 \times 10^{-11} N.m^2.Kg^{-2}$
Plank s constant	h ثابت بلانك	$6.625 \times 10^{-34} J.s$
Boltzmann s constant	K ثابت بولتزمان	$1.381 \times 10^{-23} J.K^{-1}$
Avogadro s number	N_A عدد أفوغادرو	$6.022 \times 10^{23} molecules/mol$
Gas constant	R ثابت الغازات العام	$8.314 J.mol^{-1}.K^{-1}$
Mass of electron	m_e كتلة الالكترون	$9.110 \times 10^{-31} Kg$
Mass of neutron	m_n كتلة النوترون	$1.675 \times 10^{-27} Kg$
Mass of proton	m_p كتلة البروتون	$1.673 \times 10^{-27} Kg$
Permittivity of free space	ω_0 سماحية الفضاء الحر	$8.854 \times 10^{-12} C^2.N^{-1}.m^{-2}$
	$1/4 \pi \omega_0$	$8.987 \times 10^9 N..m^2C^{-2}$
Permeability of free space	μ_0 نفوذية الفضاء الحر	$4\pi \times 10^{-7} Wb.A^{-1}.m^{-1}$
Mechanical equivalent of heat	J المكافئ الميكانيكي للحريرة	$4.186 J.Cal^{-1}(15^0 calorie)$
Standard atmospheric pressure	atm الضغط الجوي النظامي	$1.1013 \times 10^5 Pa$
Absolute zero	$O K$ الصفر المطلق	$-273.15^{\circ}C$
Electronvolt	eV الالكترون فولط	$1.602 \times 10^{-19} J$
Atomic mass unit	u وحدة الكتلة الذرية	$1.661 \times 10^{-27} Kg$
Electron rest energy	mc^2 طاقة الالكترون السكونية	$0.511 MeV$
Energy equivalent of 1 u	Mc^2 المكافئ الطاقي لـ u	$931.5 MeV$
Volume of ideal gas (0C and 1 atm)	V حجم الغاز المثالي	$22.4 liter.mol^{-1}$
Acceleration due to gravity (sea level, at equator)	g التسارع الأرضي	$9.78049 m.s^{-2}$

الحرارة النوعية، حرارة الانصهار، نقطة الغليان
Specific Heat, Heat of Fusion, Melting and Boiling Points

- (1): المادة
(2): الحرارة النوعية
(3): نقطة الانصهار
(4): حرارة الانصهار
(5): نقطة الغليان

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Substance	Specific Heat at 20°C cal/g degree	Melting point °C	Heat of Fusion cal/g	Boiling point °C
Acetone	0.52	-94.3	-	56.7
Aluminium	0.21	658.7	76.8	2,000
Benzene	0.407	5.5	30.4	80.2
Brass	0.0917	900	-	-
Carbon disulfide	0.24	-112	-	46.2
Cast iron	0.12	1,100-1,200	23.33	-
Copper	0.094	1,083	42	2,300
Ethyl alcohol	0.58	-114	25	78.3
Ethyl ether	0.56	-116.3	27	34.6
Fluoplastic-4	0.25-0.22	-	-	-
Glycerine	0.58	-20	42	290
Gold	0.032	1,063	15.9	2,600
Ice(water)	0.50	0	79.7	100
Iron	0.119	1,530	23.33	3,000
Lead	0.03	327	5.36	-
Mercury	0.033	-38.9	2.8	356.7
Methyl alcohol	0.6	-97	24	64.7
Naphthalene	0.29	80	-	2.18
Nickel	0.11	1,452	58.3-73	-
Propyl alcohol	0.57	-127	20.7	96
Silver	0.056	960.5	21	2,100
Steel	0.11	1,300-1,400	49	-
Tin	0.055	231.9	14	-
Toluene	0.414	-95.1	17.2	110.7
Vinyl plastic wood:	0.271-0.286	-	-	-
Oak, 6-8% moisture content y weight	0.57	-	-	-
Pine, 8% moisture content y weight	0.65	-	-	-
Wood`s alloy	0.04	65.5	8.4	-

كثافة المواد الصلبة في الدرجة (20°C)

Density of Some Solid (20°C)

Substance المادة	Density الكثافة g/cm ³	Substance المادة	Density الكثافة g/cm ³
Metal and alloys		Minerals and rock	
Aluminium	2.7	Anthracite (dry)	1.2-1.5
Brass	8.4-8.7	Asbestos	0.1-0.5
Bronze	8.7-8.9	Chalk (air dry)	2
Cast iron	7	Corundum	4
Chromium	7.15	Diamond	3.51
Cobalt	8.8	Granite	2.5-3
Constantan	8.88	Marble	2.5-2.8
Copper	8.93	Mica	2.6-3.2
Duralumin	2.79	Quartz	2.65
Germanium	5.3	Plastics and laminated plastics cellon	1.3
Gold	19.31	Fluoplastic	2.1-2.3
Iron	7.88	Laminated amino plastics	1.4
Lead	11.35	Phenolic plastic impregnated	1.34-1.4
Magnesium	1.76	Plexiglas	1.18
Manganin	8.5	Polycrylate (or organic glass)	1.2
Molybdenum	10.2	Polystyrene	1.06
Neptunium	19.5	Polyvinyl plastic	1.34-1.4
Nickel	8.9	Teflon	2.2
Nickeline	8.77	Textolite	1.3-1.4
Platinum	21.46	Vinyl plastic	1.38-1.40
Silicon	2.3	Different materials	
Silver	10.5	Amber	1.1
Sodium	0.975	Bakelite varnish	1.4
Steel	7.7-7.9	Beeswax, white	0.95-0.96
Tin	7.29	Bone	1.8-2.0
Tungsten	19.34	Glass, common	2.5
Uranium	19.1	Glass, for mirrors	2.55
White Babbitt	7.1	Glass, for thermometers	2.59
Zinc	7.15	Glass pyrex	2.59
Wood (air dry)		Glass, quartz	2.21
Ash, mahogany	0.6-0.8	Ice (at 10°C)	0.917
Bamboo	0.4	Porcelain	2.2-2.4
Cedar	0.5-0.6	Rubber, ordinary hard	1.2
Ebony	1.1-1.3		
Lignum vitae	1.1-1.4		
Oak, beech	0.7-0.9		
Pine	0.4-0.5		
Walnut	0.6-0.7		

كثافة السوائل في الدرجة (20°C)

Density of Liquids (at 20°C)

Liquid السائل	Density, الكثافة g/cm ³	Liquid السائل	Density, الكثافة g/cm ³
Acetic acid	1.049	Heptane	0.684
Acetone	0.79	Hexane	0.660
Aniline	1.02	Machine oil	0.9
Benzene	0.879	Mercury	13.55
Benzine	0.68–0.72	Methyl alcohol	0.792
Bromine	3.12	Milk of average fat content	1.03
Bromobenzen	1.495	Nitric acid	1.51
Choroform	1.489	Nitrobenzene	1.2
Curde oil	0.76–0.85	Nitroglycerline	1.6
Diiodomethane	3.325	Sea water	1.01–1.03
Ethyl alcohol	0.79	Toluene	0.866
Formic acid	1.22	Tribromomethane	2.890
Glycerine	1.26	Vaseline oil	0.8
Heavy water (H ₂ O)	1.1086	Water	0.99823

كثافة الماء في درجات الحرارة المختلفة

Density of Water at Various Temperatures (g/cm³)

t, °C	Density الكثافة	t, °C	Density الكثافة	t, °C	Density الكثافة
-10	0.99815	7	0.99993	25	0.99707
-9	0.99843	8	0.99988	26	0.99681
-8	0.99869	10	0.99973	27	0.99652
-7	0.99892	11	0.99963	28	0.99622
-6	0.99912	12	0.99952	29	0.99592
-5	0.99930	13	0.99940	30	0.99561
-4	0.99945	14	0.99927	31	0.99521
-3	0.99958	15	0.99913	32	0.99479
-2	0.99970	16	0.99897	33	0.99436
-1	0.99979	17	0.99880	34	0.99394
0	0.99987	18	0.99862	35	0.99350
1	0.99993	19	0.99843	40	0.99118
2	0.99997	20	0.99823	50	0.98804
3	0.99999	21	0.99802	60	0.98318
4	1.0000	22	0.99780	70	0.97771
5	0.99999	23	0.99757	80	0.97269
6	0.99997	24	0.99732	90	0.96534

التوتر السطحي لبعض السوائل في الدرجة (20°C)

Surface Tension of Liquids at 20°C

Substance	Surface Tension Dynes/cm	Substance	Surface Tension Dynes/cm
Acetic acid	27.8	Methyl alcohol	22.6
Acetone	23.7	Nitrobenzene	43.9
Aniline	42.9	Olive oil	33.06(18°C)
Benzene	29.0	Petroleum	26
Butyric acid	27.2	Propionic acid	27
Castor oil	36.4(18°C)	Propyl alcohol	23.8
Ethyl alcohol	22.8	Toluene	28.5
Glycerine	59.4	Water	72.8
Kerosene	28.9 (0°C)		

حدود الأطوال الموجية للضوء المرئي

Wavelengths of Visible Region of Spectrum

Violet	بنفسجي
Dark blue	أزرق غامق
Light blue	أزرق فاتح
Green	أخضر
Yellowish – green	أخضر مصفر
Yellow	أصفر
Orange	برتقالي
Red	أحمر

اللون Colour	(A) الحدود Boundaries	اللون Colour	(A) الحدود Boundaries
Violet	3800–4500	Yellowish – green	5.500–5.750
Dark blue	4500–4800	Yellow	5.750–5.850
Light blue	4800–5100	Orange	5.850–6200
Green	5100–5500	Red	6200–7600

لزوجة السوائل في درجة حرارة (18°C)

Viscosity of Various Liquids at 18°C

Liquid السوائل	$\eta \times 10^2$ g/cm sec	Liquid السوائل	$\eta \times 10^2$ g/cm sec
Acetic acid	1.27	Glycerine	1.393
Acetone	0.337	Machine oil, heavy	660
Aniline	4.6	Machine oil, light	113
Benzene	0.673	Mercury	1.59
Bromine	1.02	Methyl alcohol	0.632
Carbon disulfide	0.382	Olive oil	90
Castor oil	1.200	Pentane	0.244
Chloroform	0.579	Propyl alcohol	2.39
Cylinder oil, dark	240	Soya bean oil(30°C)	40.6
Cylinder oil, refined (40°C)	1.09	Toluene	0.613
Ethyl alcohol	1.22	Water	1.05
Ethyl ether	0.238	Xylene	0.647

لزوجة الغازات في الدرجة (0°C)

Viscosity of Various Gases at (0°C)

Gas الغاز	$\eta \times 10^4$ g/cm sec	Gas الغاز	$\eta \times 10^4$ g/cm sec
Air (without CO ₂)	1.72	Hydrogen	0.84
Ammonia	0.93	Methane	1.04
Carbon dioxide	1.40	Nitric oxide	1.72
Carbon monoxide	1.67	Nitrogen	1.67
Chlorine	1.29	Nitrous oxide	1.38
Helium	1.89	Oxygen	1.92

عامل التمدد الطولي للأجسام الصلبة في الدرجة (20°C)

Coefficients of Linear Expansion α of Solids at about 20°C

Substance	$\alpha \times 10^4$	Substance	$\alpha \times 10^4$
Aluminum	22.9	Iron, cast	10.2
Bismuth	13.4	Iron, pig	10.4
Brass	18.9	Iron, wrought	11.9
Brick masonry	5.5	Lead	28.3
Bronze	17.5	Magnesium	25.1
Carbon (graphite)	7.9	Nickel	13.4
Cement and concrete	12.0	Platinum	8.9
Constantan	17.0	Platinum-iridium alloy	8.7
Copper	16.7	Porcelain	3.0
Diamond	0.91	Quartz (fused)	0.5
Duralumin	22.6	Steel (grade 20)	11.9
Ebonite	70	Steel, Stainless	11.0
German silver	18.4	Tin	21.4
Glass, ordinal	8.5	Tungsten	4.3
Glass, pyrex	3	Vinyl plastic	70
Gold	14.5	Wood (across grain)	50.60
Granite	8.3	Wood (Long grain)	2.6
Ice (from -10°C to 0°C)	50.7	Zinc	30.0
Iridium	6.5		

عامل التمدد الحجمي للسوائل في الدرجة (18°C)

Coefficients of Volume Expansion of liquids β at about (18°C)

Substance	$\beta \times 10^4$ 1/degree	Substance	$\beta \times 10^4$ 1/degree
Acetone	14.3	Methyl alcohol	11.9
Aniline	8.5	Nitric acid	12.4
Benzene	10.6	Petroleum	9.2
Carbon disulfide	11.9	Propyl alcohol	9.8
Chloroform	12.8	Toluene	10.8
Ethyl alcohol	11.0	Turpentine	9.40
Ethyl ether	16.3	Water at 5° – 10°	0.53
Formic acid	10.2	Water at 10° – 20°	1.50
Glycerine	5.0	Water at 20° – 40°	3.02
Kerosene	10.00	Water at 40° – 60°	4.56
Mercury	1.81	Water at 60° – 80°	5.87

عوامل المرونة لبعض المواد ونسبة بواسون

Moduli of Elasticity and Poisson's Ratios

المادة : (1)

عامل يانغ : (2)

عامل القص : (3)

نسبة بواسون : (4)

(1) Material المادة	(2) Young's modulus, Kg/mm ²	(3) Shear modulus, Kg/mm ²	(4) Poisson's ratio
Aluminum bronze, casting	10.500	4.200	–
Aluminum rolled	6.900	2.600–2.700	0.32–0.36
Aluminum wire drawn	7.000	–	–
Bakelite	200–300	–	–
Brass, rolled, for ship building	10.000	–	0.36
Cold – drawn	9.100–9.900	3.500–3.700	0.32–0.42
Cast iron, wrought	15.500	–	–
Cast iron, white, gray	11.500–16.000	4.500	0.23–0.27
Celluloid	1.74–1.93	–	0.39
Constantan	16.600	6.200	0.33
Copper, casting	8.400	–	–
Copper, cold-drawn	13.000	4.900	–
Copper, rolled	11.000	4.000	0.31–0.34
Duralumin, rolled	7.100	2.700	–
Getinax (laminated insulation)	1.000–1.700	–	–
Glass	5.000–8.000	1.800–3.000	0.2–0.3
Granite	4.900	–	–
Ice	1.000	280–300	–
Invar	14.000	5.600	–
Lead	1.700	700	0.42
Limestone	4.200	–	–
Manganin	12.600	4.700	0.33
Marble	5.600	–	–
Phosphor bronze, rolled	11.500	4.200	0.32–0.35
Plexiglas	535	151	0.35
Rubber	0.8	–	0.47
Steel, alloyed	21.000	8.100	0.25–0.30
Carbon	20.000–21.000	8.100	0.24–0.28
Steel casting	17.500	–	–
Textolite	600–1.000	–	–
Vinyl plastic	300	–	–
Wood	400–1.800	–	–
Zinc, rolled	8.400	3.200	0.27

طيف الإصدار لبعض المعادن لأطوال موجبة مقدرة بالانغستروم

Emission Spectra of Some Metal (in Å)

- (1): قوس الألمنيوم
(2): قوس النحاس (في الخلاء)
(3): مصباح الزئبق (في الخلاء)
(4): لهب الصوديوم
(5): قوس الكاديوم
(6): قوس التوتياء (في الخلاء)

* وضع خط تحت الخطوط الطيفية الشديدة.

* أشير للون الخط الطيفي بالحرف الأول من لونه باللغة الإنكليزية وهي كالاتي:

الرمز	اللون
r	أحمر
o	برتقالي
y	أصفر
g	أخضر
b	أزرق
v	بنفسجي

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Aluminium (arc)	Copper (arc in vacuum)	Mercury (mercury lamp)	Sodium (in flame)	Cadmium (arc)	Zinc (arc in vacuum)
3,083	3,248	3,126	5,889.970	3,261	3,036
3,093	3,274	3,131	5,895.930	3,404	3,072
3,9440 v	4,023 v	3,650		3,466	3,345
3,962 v	4,063 v	4,046.8 v		3,611	4,680 b
4,663 b	5,105.5 g	4,078.1 v		3,982 v	4,722 b
5,057 g	5,153.3 g	4,358.3 v		4,413 b	4,811 b
5,696 v	5,218.2 g	4,916.4 bg		4,678 b	4,912 b
5,723 v	5,700.7 g	4,959.7 g		4,799.9 b	4,925 gb
	5,782.1 v	5,460.7 g		5,085.8 g	6,103 o
	5,782.2	5,769.6 y		5,338 g	6,362 o
		5,790.7 y		5,379 g	
		6,152 c		6,438.5	
		6,232.0 o			

ثوابت فلكية أساسية

الجرم السماوي	الكتلة	نصف القطر	نصف قطر المدار	مدة الدورة
Body	Mass, kg	Radius, m	Orbit radius, m	Orbit period
Sun	1.99×10^{30}	6.95×10^8	–	–
Moon	7.36×10^{22}	1.74×10^6	0.38×10^9	27.3 d
Mercury	3.28×10^{23}	2.57×10^6	5.8×10^{10}	88.0 d
Venus	4.82×10^{24}	6.31×10^6	1.08×10^{11}	224.7 d
Earth	5.98×10^{24}	6.38×10^6	1.49×10^{11}	365.3 d
Mars	6.34×10^{23}	3.43×10^6	2.28×10^{11}	687.0 d
Jupiter	1.88×10^{27}	7.18×10^7	7.78×10^{11}	11.86 y
Saturn	5.63×10^{26}	6.03×10^7	1.43×10^{12}	29.46 y
Uranus	8.61×10^{25}	2.67×10^7	2.87×10^{12}	84.02 y
Neptune	9.99×10^{25}	2.48×10^7	1.08×10^{12}	164.8 y
Pluto	5×10^{23}	4×10^5	5.90×10^{12}	247.7 y

قائمة المصطلحات العلمية

إنكليزي	فرنسي	عربي
-A-		
Aberration of light	Aberration de la lumiere	الزيف الضوئي
Absolute Humidity	Humedite absolue	الرطوبة المطلقة
Absolute temperature	Temperature absolue	درجة الحرارة المطلقة
Absolute Zero	Zero Absolue	درجة الصفر المطلق
Absorption	Absorption	امتصاص
Acceleration	Acceleration	تسارع
Alternating current	Courant alternative	تيار متناوب
Ammeter	Amperemeter	مقياس أمبير
Amplitude	Amplitude	سعة، اتساع
Angle (critical)	Angle critique	الزاوية الحرجة
Angle of incidence	Angle dincidence	زاوية الورود
Angle of refraction	Angle de refraction	زاوية الانكسار
Angle of deviation	Angle de deviation	زاوية الانحراف
Angle of friction	Angle of forttement	زاوية الاحتكاك
Angle of reflection	Angle de reflexion	زاوية الانعكاس
Apparent distance	Distance apparente	البعد الظاهري
Archimeds principle	Principe d Archimede	مبدأ أرخميدس
Atmospheric pressure	Pression atmosferique	ضغط جوي
Atomic Number	Numero atomique	عدد ذري
Atomic weight	Poids atomique	وزن ذري
Autotransformer	Autotransformatrice	محول ذاتي
Average velocity	Vitesse moyenne	سرعة وسطى
Axis	Axe	محور
-B-		
Barometer (aneroid)	Barometre (aneroide)	مقياس الضغط الجاف
Beam of light	Faisceau de lumiere	حزمة ضوئية
Bernoulli Effect	Effet Bernoulli	أثر برنولي

Biconcave lens	Lentille biconcave	عدسة مقعرة الوجهين
Biconvex lens	Lentille biconcave	عدسة محدبة الوجهين
Boilbg point	Point d ebullition	نقطة الغليان
Boyle s Law	Loi de Boyle	قانون بويل
British thermal unit	Unite thermique britannique	وحدة حرارة بريطانية

-C-

Calory	Calorie	حريرة
Calorimeter	Calorimetre	مسعر
Camera	Camera	آلة تصوير
Capacitance	Capacitance	سعة
Capacitor	Condensateur	مكثف
Capillarity	Capillarite	الخاصة الشعرية
Capillary tube	Tube capillaire	أنبوب شعري
Cathode	Cathode	المهبط
Cathode rays	Rayons cathodiques	أشعة مهبطية
Cathode scale	Tube des rayons cathodque	أنبوب الأشعة المهبطية
Centigrade scale	Graduation centigrade	التدريج المئوي
Centre of gravity	Centre de gravite	مركز الثقل
Centre of inertia	Centre d inertie	مركز العطالة
Centrifugal force	Force centrifuge	قوة نابذة
Centripetal force	Force centripete	قوة جاذبة
Charge	Charge	شحنة
Chromatic aberration	Aberration chromatique	زيغ لوني
Circular motion	Mouvement circulaire	حركة دائرية
Coefficient of expansion	Coefficient de dilatation	معامل التمدد
Cohesion	Cohesion	تماسك
Coil	Bobine	ملف
Collimator	Collimateure	المجمع
Collision	Collosion	تصادم
Combustion	Combustion	احتراق

Compound microscope	Microscope compose	مجهر مركب
Concave	Concave	مقعر
Concave mirror	Miroir concave	مرآة مقعرة
Conduction	Conduction	توصيل
Convergent of energy	Conservation de l'energie	انحفاظ الطاقة
Convergent lens	Lentille convergent	عدسة مقربة
Convex lens	Lentille convexe	عدسة محدبة الوجهين
Convexo – concave lens	Lentille convexo – concave	عدسة مقعرة الوجهين
Coulomb	Coulomb	كولون
Critical point	Point critique	النقطة الحرجة
Cycle	Cycle	دورة
-D-		
D.C.motor	Moteur de courant continu	محرك تيار مستمر
Deflection	Deflexion	انحراف
Degree	Degre	درجة
Density	Densite	كثافة
Diaphragm	Diaphragme	حظار
Discharge tube	Tube de decharge	أنبوب انفراغ
Dispersion	Dispersion	تبديد
Displacement	Deplacement	إزاحة
Divergent lens	Divergence	تباعد
Divergent lens	Lentille divergente	عدسة مبعدة
Double concave	Biconcave	مقعر الوجهين
Double convex	Biconvexe	محدب الوجهين
Dyne	Dyne	الدينه
-E-		
Earth (mass of)	Masse de la terre	كتلة الأرض
Efficiency	Efficacite	مردود
Elasticity	Elasticite	مرونة
Electrical energy	Energie electrique	طاقة كهربائية

Electrical induction	Induction d electricite	التأثير الكهربائي، الحث الكهربائي
Electric discharge	Decharge electrique	انفراغ كهربائي
Electric Field	Champ electrique	حقل كهربائي
Electric current	Courant electrique	تيار كهربائي
Electric lamp	Lampe electrique	مصباح كهربائي
Electric potential	Potentiel electrique	كمون كهربائي
Electromagnetic waves	Ondes electromagnetiques	أمواج كهريطيسية
Electron microscope	Microscope electroniques	مجهر الكتروني
Electrostatics	Eelctrostatique	الكهرباء الساكنة
Emission	Emission	إصدار
Energy levels	Niveaux d energie	سويات الطاقة
Equipotential surfaces	Surface a potential egal	سطوح تساوي الكمون
Erg	Erg	إرعة
Eyepiece	Oculaire	عينية
-F-		
Fahrenheit scale	Gradution Fahremeit	تدريج فهرنهايت
Faraday s effect	Effet de Faraday	مفعول فارادي
Flotation	Flottement	طفو
Fluorescent	Fluorescent	متفلور
Flux	Flux	تدفق
Focal length	Longeur focale	بُعد محراقي
Focal plane	Plan focal	مستوي محراقي
Force	Force	قوة
Frequncy	Frequence	تردد، تواتر
Fuse	Coupe-circuit	فاصمة
Fusion	Fusion	اندماج
-G-		
Gas	Gas	غاز
Gas constant	Constante du gas	ثابت الغاز
Gas thermometer	Thermometre a gas	ميزان حرارة غازي

Generator	Generateur	مولد
Graph	Diagramme	رسم بياني
Gravity	Gravite	الثقالة، الجاذبية
Grille	Grille	شبكة
Gyroscope	Gyroscope	جيروسكوب

-H, I, J, K....

Harmonic motion	Mouvement harmonique	حركة توافقية
Heat capacity	Capacite de la chaleur	سعة حرارية
Heat of combustion	Chaleur de combustion	حرارة الاحتراق
Heat engines	Machines thermiques	آلات حرارية
Heat quantity	Quantite de chaleru	كمية حرارة
Heat	Chaleur	حرارة
Henry s law	Loi de Henri	قانون هنري
Humidity	Humidite	رطوبة
Hydraulic press	Presse hydraulique	مكبس مائي
Hygrometer	Hygrometer	مقياس الرطوبة
Ideal Gas	Gas ideal	غاز مثالي
Image (real)	Image reelle	خيال حقيقي
Image (virtual)	Image vertuelle	خيال وهمي
Impact	Choc	تصادم
Impedance	Impulsion	ممانعة
Impulse	Impulsion	دفع
Incidet light	Lumiere incidente	ضوء وارد
Inclined plane	Plan incline	مستوي مائل
Inclined plane	Plan incline	قرينة الانكسار
Induction coil	Bobine d induction	وشيعة تحريض
Inertia	Inertie	عطالة
Interference	Interference	تداخل
Inverse square law	Loi du carre inverse	قانون التربيع العكسي
Ion	Ion	أيون، شاردة
Isobar line	Ligne isobare	خط تساوي الضغط
Isotopes	Isotopes	نظائر

Joule	Joule	جول
Kilowatt	Kilocaloric	كيلو حريرة
Kilowatt	Kilowatt	كيلو واط
Kilowatt hour	Kilowatt – heure	كيلو واط ساعي
Kinetic theory of gases	Energie cinetique	طاقة حركية
Kinetic theory of gases	Theorie cinetique des gaz	النظرية الحركية للغازات
-L, M, N-		
Latent heat	Chaleur latente	حرارة كامنة
Latent heat of fusion	Chaleur latent de fusion	الحرارة الكامنة للانصهار
Laws of motion	Lois du mouvement	قوانين الحركة
Laws of reflection	Lois de reflexion	قوانين الانعكاس
Laws of refraction	Lois de refraction	قوانين الانكسار
Lens	Lentille	عدسة
Lenz's law	Loi de lenz	قانون لنز
Linear acceleration	Acceleration lineaire	تسارع خطي
Liquid	Liquide	سائل
Longitudinal	Ondes longitudinales	أمواج طولانية
Mass	Masse	كتلة
Microfarad	Microfarad	ميكرو فاراد
Microscope	Microscope	مجهر
Millibar	Millibar	ميلي بار
Minimum Deviation	Deviation Minimum	الانحراف الأصغري
Mirror	Miroir	مرآة
Modulation	Modulation	تعديل
Modulation (amplitude)	Modulation par amplitude	تعديل سعوي
Molecule	Molecule	جزيء
Moment	Moment	عزم
Moment of inertia	Moment d inertie	عزم عطالة
Monochromatic light	Lumiere monochromatique	ضوء وحيد اللون

Multiple reflection	Reflexion multiple	انعكاس متعدد
Negative lens	Lentille negative	عدسة سالبة
Neon lamp	Lamp au neon	مصباح نيون
Neutron	Neutre	معتدل
Newton s laws of motion	Lois de mouvement de Newton	قوانين نيوتن في الحركة
Nuclear	Nucleaire	نووي
Numerical aperture	A ture numerique	فتحة عددية
-O, P, Q, R-		
Objective	Objectif	جسيمة
Ohm w Law	Loi d ohm	قانون أوم
Oil-immersion objective	Objectif a immersion dans l hnile	عدسة غاطسة
Opaque	Opaque	كثيم
Optics	Optique	بصريات
Oscillation	Oscillation	اهتزاز
Oscillograph	Oscillograph	راسم الاهتزاز
Out of phase	Hors-phase	مختلف الأطوار
Parallel resistance	Resistances paralleles	مقاومات على التوازي
Pascal s priniciple	Principe de Pascal	مبدأ باسكال
Perfect gas	Gaz parfait	غاز كامل
Periodic table	Table periodique	الجدول الدوري
Phase angle	Angle de la phase	زاوية الطور
Photoelectric cell	Cellule photoelectrique	خلية كهروضوئية
Photoelectric effect	Effect photoelectrique	المفعول الضوئي
Photon	Photon	فوتون
Plane mirror	Miroir plan	مرآة مستوية
Plano – concave	Plan concave	مستوية مقعرة
Plano – convex	Plan convexe	مستوية محدبة
Polarization of light	Polarisation de la lumiere	استقطاب الضوء
Positron	Positron	بوزيترون
Potential	Potential	كمون
Potential energy	Energie potentiel	طاقة كامنة

Power	Puissance	استطاعة
Pressure of liquids	Pression des liquides	ضغط السوائل
Primary coil	Bobine primaire	ملف ابتدائي
Propagation of light	propagation de la lumiere	انتشار الضوء
Proton	Proton	بروتون
Quantity of electricity	Quantite s electricite	كمية الكهرباء
Quantum theory	Theorie du quantum	نظرية الكم
Radiant heat	Chaleur radiante	حرارة اشعاعية
Radioactive	Radioactif	ذو نشاط اشعاعي
Range	Etrndue – portee	مدى
Ray	Rayon	شعاع
Reflection of light	Reflexion de la lumiere	انعكاس الضوء
Reflection (total)	Reflexion totale	انعكاس كلي
Refraction	Refraction	انكسار
Refractive index	Indice de Refraction	قرينة الانكسار
Relative humidity	Humedite relative	رطوبة نسبية
Resistance	Resistance	مقاومة
Resistance box	Caisse de Resistance	علبة مقاومات
Resonance	Resonance	تجاوب
Rheostat	Rheostat	مقاومة متغيرة
Rigid body	Crops rigide	جسم صلب
Rutherford – Bohr atom	Atom de Rutherford – Bohr	ذرة رذرفورد-بور
-S, T, U, V....-		
Saturated vapour	Vapeur saturee	بخار مُشبع
secondary coil	Bobine secondaire	ملف ثانوي
Self induction	Self induction	حث ذاتي
Sensitivity	Sensitivite	حساسية
Shunt	Shunt	مفرغة
Slite	Fente	شق
Spectrum	Spectre	طيف
Spectrograph	Spectrographe	راسم الطيف

Statics	Statique	علم السكون
Stationary	Stationnaire	مستقر
Steam	Vapeur	بخار
Step-down transformer	Transformateur abaisseur	محول خافض
Step-up transformer	Transformateur elevateur	محول رافع
Surface tension	Tension superficielle	توتر سطحي
Target	But, cible	هدف
Temperature	Temperature	درجة حرارة
Thermionic emission	Emission thermique	إصدار حراري
Thermocouple	Thermocouple	مزدوجة كهربائية
Thermodynamics	Thermodynamique	تحريك حراري (ترموديناميك)
Thermometer	Thermometer	ميزان حرارة
Thermopile	Thermopile	نابعة كهربائية
Transverse waves	Ondes transversales	أمواج عرضانية
Ultra-violet	Ultra – violet	فوق بنفسجي
Velocity	Vitesse	سرعة
Viscosity	Viscosite	لزوجة
Wave	Onde	موجة
Work	Travail	عمل



المراجع العلمية

1- المراجع العربية:

- 1- الفيزياء للمهندسين. د. أحمد حصري، أ. جهاد أبو النعاج، مطبوعات جامعة دمشق
- 2- الفيزياء العملية. د. أحمد الحصري، أ. جهاد أبو النعاج، أ. عمر طه، مطبوعات جامعة دمشق.
- 3- الفيزياء العامة (2). د. أحمد الحصري، د. إحسان الموصلي. مطبوعات جامعة دمشق.
- 4- الفيزياء للمهندسين، د. معد يوسف النجار، مطبوعات جامعة البعث. 1991. كلية الهندسة المدنية.
- 5- الفيزياء الحديثة للجامعات. سيزر- زيمانسكي، يانغ. ترجمة د. عبد الرزاق قدورة، د. أحمد حصري، أ. وجيه السمان، مطبوعات جامعة دمشق
- 6- الكيمياء الفيزيائية (1). د. ياسر حورية، مطبوعات جامعة البعث
- 7- الفيزياء (1)، (2). د. بسام المغربي، د. مخلص الرئيس، مطبوعات جامعة دمشق



2- المراجع الأجنبية:

- 1- University Physics 1987. Seventh edition, Sears /Zemansky/ Young. Addison Wesley Publishing Company
- 2- Modern College Physics. Fifth edition, Harvery E. White, D. Van Nostrand Company , INC.
- 3- Physics for Entertainment. Y. Perelman, Foreign Languages Publishing Company . Moscow.
- 4- Fundamentals of Physics. D. Halliday and R. Resniek. Willey International Edition.



اللجنة العلمية:

أ. د. أحمد حصري

أ. د. عبد الجليل النفوري

أ. د. محمد سعيد الشاطر

المدقق اللغوي:

د. محسن علي العبيد

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات الجامعية