[٦] الباب السادس :

الضغط الجوى وضغط الغازات

Atmospheric and Gas Pressure

[٦ ـ ١] عـــام :

يحيط بسطح الأرض طبقة سميكة من الهواء تعرف بالغلاف الجوى Atmosphere ،

والهواء خليطاً من الغازات ، يحتوى على حوالى $\frac{٤}{٥}$ من حجمه نيتروجين وحوالى $\frac{١}{٥}$ من حجمه أوكسجين ونسبة بسيطة من ثانى أكسيد الكربون بالإضافة إلى نسب ضئيلة جداً من النيون والكريبتون والهيليوم والهيدروجين والأوزون وبخار الماء .

وتكون كثافة غازات الغلاف الجوى ، أكبر ما يمكن ، عند سطح الأرض أو فى مستوى سطح البحر وتقدر هذه الكثافة بحوالى (١,٢ – ١,٣) كجم/م^{٣} .

وتمتد طبقة الغلاف الجوى الأتموسفير إلى ما بين ٨٠ كيلومتراً إلى عدة مئات من الكيلومترات فوق سطح البحر .

وكلما زاد الارتفاع كلما قلت كثافة الهواء ، فمثلاً نجد أنه عند ارتفاع حوالى ٢٠٠٠ متر عن سطح الأرض فإن كثافة الهواء تُصبح حوالى :

١ كجم/م^{٣} فقط ، بينما عند ارتفاع قدره ١٠٠٠٠ متر نجد أن الكثافة تقل جداً وتصبح حوالى ٠,٤ كجم/م^{٣} فقط .

وفى الفضاء الخارجى فإنه يمكننا اعتبار عدم وجود أى غاز ، فقط بعض قليل من الجزيئات موزعة بنسبة حوالى ١٠٠٠ جزىء فى اللتر فى حين أن لتر الهواء عند مستوى سطح الأرض يحتوى على ما مقداره ٢٥١٠ [واحد وأمامه خمسة وعشرون صفراً] جزىء/م^{٣} .

[٦ ـ ٢] الدليل على ضغط الهواء :

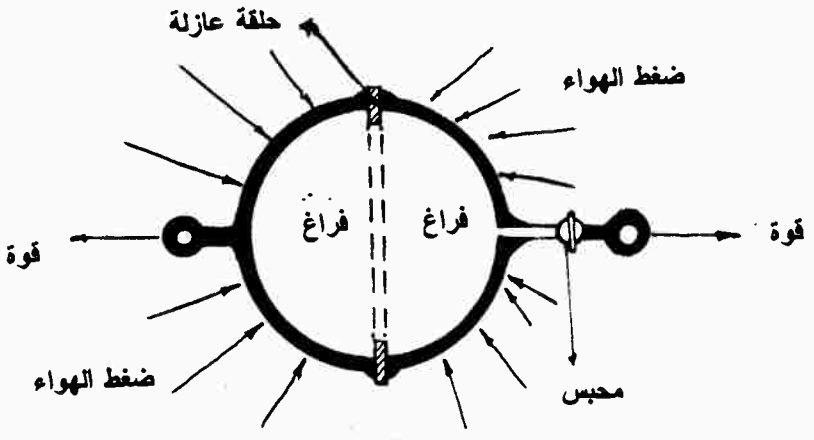
من المعروف أن الهواء عديم اللون ولا يمكننا أن نشعر به مباشرة غير أن هنالك الكثير من الشواهد التى تؤكد وجود وتأثير وضغط الهواء فالقوارب الشراعية تتحرك بتأثير ضغط الهواء وطواحين الهواء تدور بفعل الهواء وتحتفظ الطائرة بمستوى طيرانها بتأثير الهواء ويمكننا تأكيد هذا فى المختبر .

تجربـــة : أحضر علبة رقيقة الجدران وأدخل فى فوهتها سدادة مزودة بأنبوبة مرنة ، ثم نصل الإنبوبة من جهة طرفها الخارجى بمصخة خلخلة ، وبإدارة المضخة فإن العلبة تبدأ فى الإنكماش (تتطّبق) بعد فترة قليلة ، وعندما يقل الهواء بداخل العلبة فإن ضغط الهواء الخارجى على العلبة يزداد عما داخلها مما يؤدى إلى تطبقها .

انظر الرسم شكل [(٦ ـ ١) أ ، ب] .

شـكل [(٦ ـ ١) أ ، ب]
تجربة تبين تأثير الضغط الجوى على علبة معدنية
Crushing Air experiment

ومن الشواهد على ضغط الهواء ، أننا إذا قمنا بإخراج الهواء تماماً من الجسم الموضح بالشكل (٦ ـ ٢) والذى يتكون من جزئين كل جزء يشبه نصف الكرة إلى حد كبير ، فإننا نحتاج إلى قوة كبيرة جداً لإبعاد الجزئين عن بعضهما وذلك ينشأ من ضغط الهواء الخارجى على نصفى الكرة من الخارج .



شـكل [٦ ـ ٢]

تأثير الخلخله وضغط الهواء على نصفى كرة « ماجدبيرج »

Magdeburg Hemispheres

[٦ ـ ٣] البارومـتر البسـيط :

إذا أحضرنا إنبوبة رفيعة وطويلة وملأناها بالكامل بالماء وذلك لطرد الهواء ثم وضعناها مقلوبة فى كأس به ماء ، فإن عمود الماء فى الأنبوبة سيهبط لأسفل ويترك خلفه فراغاً ، ولكن إلى حد أن وزن عمود الماء يعادل الضغط الجوى الذى ينتقل خلال الماء بسهولة عبر النهاية المفتوحة للأنبوبة ، غير أننا فى حالة الماء سنحتاج لأنبوبة طويلة جداً ويكون إرتفاع عمود الماء كبيراً جداً .

فإذا أردنا عمود من السائل بطول معقول لموازنة ضغط الهواء الجوى فإنه يجب استعمال سائل ذو كثافة عالية عن الماء مثل الزئبق الذى تبلغ كثافته ١٣,٦ جم/سم^{٣} .

وقد استخدم العالم تورشيللى Torricelli ، الزئبق لقياس الضغط الجوى ومن هنا ، قام بعمل أول بارومتر ، لقياس الضغط الجوى .

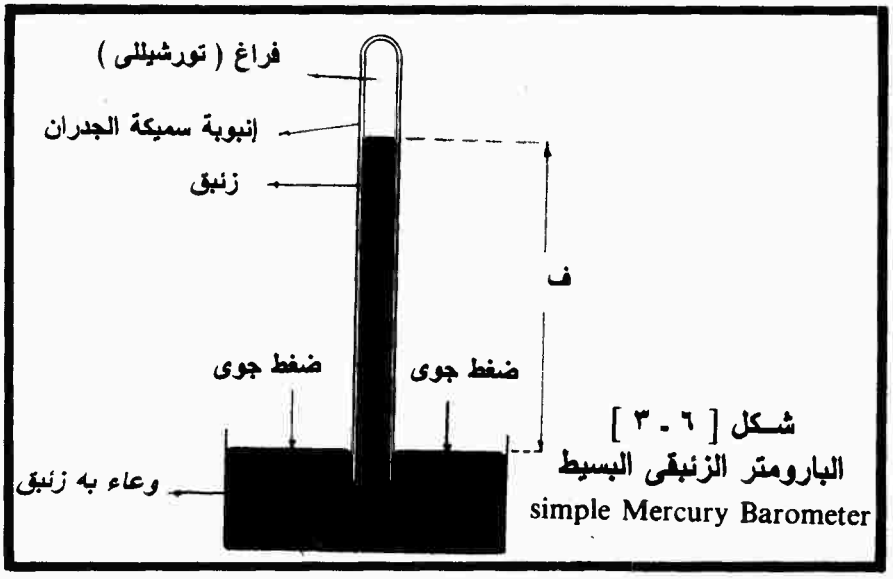
وفيما يلى تجربة لبيان عمل بارومتر بسيط .

تجربـــة : يتم عمل هذه التجربة بحرص شديد حيث أن الزئبق سام جداً ويجب أن تتم التجربة فى غرفة جيدة التهوية .

، أحضر أنبوبة نظيفة وجافة وسميكة الجدار طولها حوالى ١ متر ويتم ملئها بزئبق نظيف حتى نهاية الحافة بقليل ، ثم نسد نهايتها المفتوحة بإصبع اليد ثم نقوم بقلب الأنبوبة إلى أن تتصاعد فقاعات الهواء الذى كان موجوداً بالزئبق وتتجمع فى نهاية الأنبوبة عند طرفها المغلق .

ثم نقوم بعدل وضع الأنبوبة ثانية ونرفع الأصبع ثم نعيد ملء الأنبوبة تماماً حتى الحافة لطرد كل الهواء الذى بها .

ثم نضع الإصبع مرة ثانية على فوهة الأنبوبة ، ونقلبها ثم نضعها فى هذا الوضع ومازال الإصبع عليها تحت مستوى سطح الزئبق فى حوض أو وعاء كبير ثم نرفع الإصبع عن نهايتها المفتوحة وفى لحظة رفع الإصبع فإن الزئبق يهبط حالاً إلى أن يصل إلى ارتفاع « ف » . كما هو موضح بشكل [٦ ـ ٣] .



شـكل [٦ ـ ٣]
البارومتر الزئبقى البسيط
simple Mercury Barometer

وحيث أنه سبق لنا طرد كل الهواء من الأنبوبة ، لذلك ، فإن الحيز الموجود قرب نهاية الأنبوبة المغلق عبارة عن فراغ تام .

ويطلق على هذا الفراغ فراغ تورشيللى Torricallian vacuum .

ويكون الضغط الجوى هنا ، مساوياً عددياً للضغط الناشىء من عمود الزئبق بالأنبوبة عند نهايتها المفتوحة « يتساوى الضغط عند أى نقطة فى السائل فى جميع الاتجاهات » ويلاحظ أن طوال عمود الزئبق هنا مقاساً من مستوى سطح الزئبق بالوعاء أو الحوض وليس من نهاية الأنبوبة المفتوحة .

وبالتجربة والقياس سنجد أن هذه المسافة « ف » تساوى حوالى ٧٦٠ مم ولغرض عمل البارومتر فإنه يجب وضع مسطرة بحيث تكون :

(أ) رأسية .

(ب) بعيدة نسبياً وبمسافة صغيرة عن الأنبوبة « حيث أن للزئبق قوة شد سطحى » .

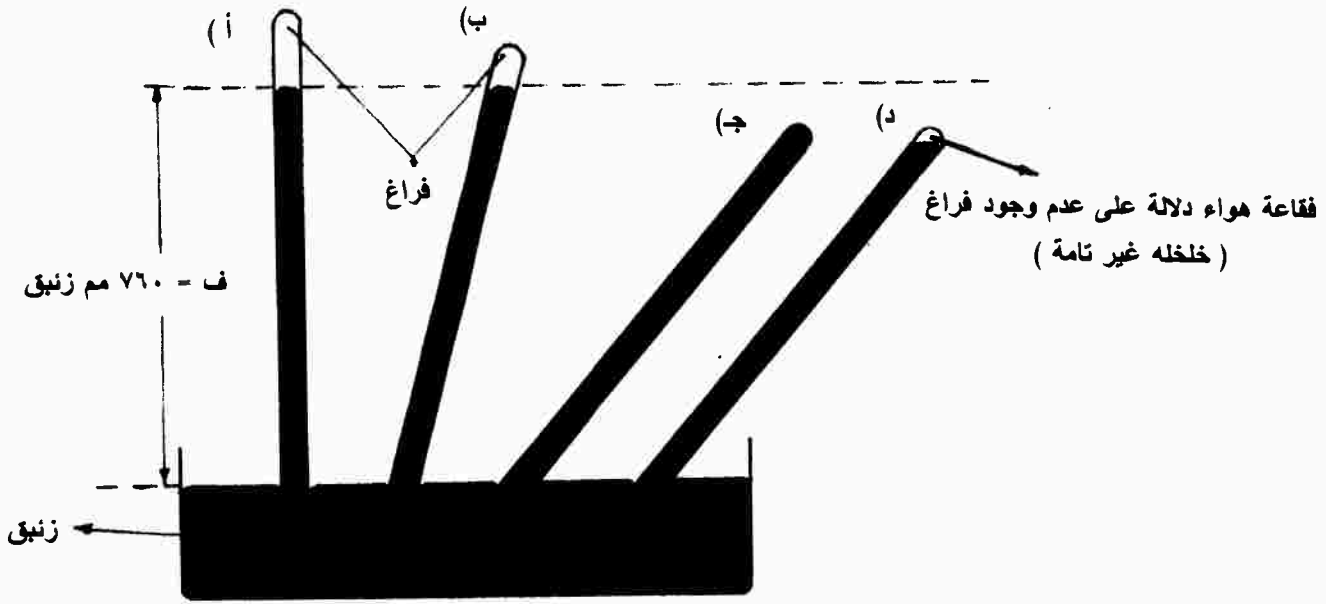
(جـ) بحيث يكون صفرها مباشرة فوق سطح الزئبق بالحوض .

[٦ ـ ٤] اختبار الخلخلة بالبارومتر :

فإذا اعتبرنا أن الفراغ بأعلى الزئبق بالأنبوبة ليس فراغاً تاماً كأن يكون به بعض من بخار الماء مثلاً ، فإن قراءة البارومتر سوف تعطى ضغطاً أقل من الضغط الجوى .

ويمكن اختبار الخلخلة عن طريق إمالة الإنبوبة .

حيث يجب أن يكون مستوى سطح الزئبق عند نهاية الإنبوبة المُغلق ، فى الحالتين (الأنبوبة رأسية والأنبوبة مائلة) على نفس الارتفاع من مستوى سطح الزئبق فى الحوض ، انظر الرسم (٦ ـ ٤) .



شـكل [٦ ـ ٤]
إختبار الخلخلة بالبارومتر

الأنبوبة (أ) ، مستوى الزئبق بها على ارتفاع ف ،

، الأنبوبة (ب) ، بعد إمالتها ، مستوى الزئبق بها على ارتفاع ف كذلك .

فإذا ما تم إمالة الأنبوبة بدرجة أكبر بحيث تكون نهايتها المغلقة على ارتفاع يقل عن ٧٠ مم فوق سطح مستوى الزئبق بالخزان ، مثلاً عند نقطة (جـ) ، فإن الزئبق سيملأ كل الأنبوبة ، أما إذا لم تكن الخلخلة تامة فى الأنبوبة فإنه ستظهر فقاعات هواء عند نهاية الأنبوبة المغلقة كما فى الأنبوبة (د) .

[٦ ـ ٥] مقدار الضغط الجوى :

تستخدم أحياناً وحدة للضغط وهى « واحد جوى » – one atmosphere أو « الضغط القياسى » وتُعرف بأنها الضغط الذى ينشأ من عمود من الزئبق إرتفاعه ٧٦٠ مم .

ومن المهم أن نتذكر أن الضغط عبارة عن قوة لوحدة المساحة وليس مجرد إرتفاع أو عمود .

وحيث أنه وكما سبق وأن ذكرنا بالدرس السابق [بند ٥ ـ ٤] فإن :

الضغط ض = ف × ث × جـ ، حيث :

ف = ٧٦٠ مم = ٠,٧٦ متر .

وكثافة الزئبق ث = ١٣,٦ حم/سم^{٣} = ١٣٦٠٠ كجم/م^{٣} .

عجلة الجاذبية الأرضية جـ = ٩,٨ م/ث^{٢} .

∴ ض = ٠,٧٦ × ١٣٦٠٠ × ٩,٨ = ١٠١٣٠٠ نيوتن/متر^{٢}

= ١,٠١٣ × ١٠^{٥} نيوتن/م^{٢} .

وهو ما يعادل ١,٠١٣ كجم/سم^{٢} أ، حوالى ١٠,١٣ نيوتن/سم^{٢}

ويمكننا إيجاد الإرتفاع ف فى حالة استخدام عمود من الماء بدلاً من الزئبق أو بمعنى آخر إيجاد طول عمود الماء المناظر لضغط ١ جوى .

وفى هذه الحالة وحيث أن ض = ف × ث × جـ

، ث $_{ماء}$ = ١٠٠٠ كجم/م^{٣} .

$$\therefore \quad ٠,٧٦ \times ١٣٦٠٠ \times ٩,٨ = ف \times ١٠٠٠ \times ٩,٨$$

$$\therefore \quad ف = \frac{١٣٦٠٠ \times ٠,٧٦}{١٠٠٠} = ١٠,٣٤ \text{ متر .}$$

وهذا يعنى أن واحد ضغط جوى يمكنه أن يوازن الضغط الناشيء من عمود من الماء ارتفاعه ١٠ متر .

وتدل تجربة تورشيللى أن وزن عمود من الهواء مساحة مقطعه ١ م^{٢} ويمتد من سطح الأرض وحتى نهاية الغلاف الجوى ، يعادل وزن عمود من الزئبق له مساحة مقطع ١ م^{٢} كذلك وبارتفاع ٠,٧٦ متر فقط وهو يعادل أيضاً وزن عمود من الماء ارتفاعه ١٠,٣ متر وبمساحة مقطع ١ م^{٢} أيضاً .

وتقل كثافة الهواء كما علمنا كلما اتجهنا لأعلى بسبب إنخفاض الضغط فى الأعلى والناشيء من تناقص وزن الهواء كلما صعدنا .

ويمكننا حساب ارتفاع طبقة الأتموسفير (ف) باعتبار ثبوت كثافة الهواء عند ١,٢ كجم/م^{٣} ،

$$\therefore \quad \text{الضغط الجوى} = ف \times ١,٢ \times ٩,٨ = ٠,٧٦ \times ١٣٦٠٠ \times ٩,٨$$

$$\therefore \quad ف = \frac{١٣٦٠٠ \times ٠,٧٦}{١,٢} = ٨٦٠٠ \text{ متر} = ٨,٦ \text{ كيلومتر}$$

وبذلك فإن عمود من الهواء ارتفاعه فى حدود ٩ كيلومتر (٨,٦) وبكثافة منتظمة مقدارها ١,٢ كجم/سم^{٢} ، يُبدى من الضغط ما يعادل ذلك الناشيء عن ٧٦٠ ملليمتر زئبق عند القاعدة .

وعملياً فإن الهواء الجوى يمتد لأكثر من هذا الرقم (٩) بكثير [عشرات الكيلومترات] ويضغط الهواء الجوى على جميع أجزاء سطح الكرة الأرضية بملايين الملايين من ملايين النيوتن .

وإذا نظرنا إلى جسم الإنسان ، سنجد فى الظروف العادية ، أن ضغط الدم فى أجسامنا يتعادل مع الضغط الجوى الخارجى .

كما وأن الغطاسين فى المياه العميقة (لأعماق كبيرة) ، عند الرغبة فى الصعود إلى سطح الماء ، يجب عليهم العودة ببطء وتدريجياً حيث أن الانخفاض الفجائى فى الضغط عند الصعود بسرعة للسطح يكون مؤلماً جداً .

ولهذا أيضاً ، نجد أن الطيارين الذين يطيرون على ارتفاعات عالية يجب عليهم ارتداء غطاء رأس واق لمنع نزيف الدم من الأنف .

والناشىء من إنخفاض الضغط الجوى الخارجى .

[٦ ـ ٦] وحدات الضغط الجوى :

علمنا أن الضغط الجوى الذى يقاوم وزن عمود من الزئبق طوله ٧٦٠ مم أو ٠,٧٦ متر ، إرتفاعاً يمكن حسابه من :

ض = ف × ث × جـ

= ٠,٧٦ × ١٣٦٠٠ × ٩,٨ نيوتن/م^{٢} = ١٠١٣٠٠ نيوتن/م^{٢}

= ١,٠١٣ × ٥١٠ نيوتن/م^{٢} = ١٠,١٣ نيوتن/سم^{٢} .

= ٠,١٠١٣ نيوتن/مم^{٢} .

ويطلق على الوحدة ١ نيوتن/م^{٢} بالباسكال «Pa» كما سبق وأن ذكرنا .

ويستخدم فى مجال الأرصاد الجوية وعلم الأرصاد الجوية meteorology وحدة من الضغط تعرف بالبار [b – bar] .

والبار = ١٠٠ ٠٠٠ نيوتن/م^{٢} = ٥١٠ نيوتن/م^{٢}

والميللى بار = $\frac{١}{١٠٠٠}$ بار = ٢١٠ نيوتن/م^{٢} .

والضغط ← الناشىء من ٧٦٠ مم زئبق يكون مساوياً لـ : (١,٠١٣) بار .

أ، مساوياً لـ ١٠١٣ ملى بار ويظهر هذا الرقم على خطوط تساوى الضغط الجوى «isobar» على خرائط الطقس .

مثـال : على الضغط الجوى :

سجلت قراءة الضغط على بارومتر زئبقى ٧٦٠ مم زئبق عند أسفل جبل إرتفاعه = ٨٠٠ متراً .

فكم تكون قراءة البارومتر عند قمة الجبل ، معتبراً أن :

متوسط كثافة الهواء = ١,٢ كجم/م^{٣}

وأن كثافة الزئبق = ١٣٥٠٠ كجم/م^{٣} ؟

الحـل :

التغير فى الضغط لإرتفاع ف فى السائل = ف$_{١}$ × ث × جـ

التغير فى ضغط الهواء = ٨٠٠ × ١,٢ × جـ

والتغير فى الضغط للزئبق = ف$_{٢}$ × ١٣٥٠٠ × جـ

حيث ف$_{٢}$ = إرتفاع الزئبق ، فإذا كانت ف$_{٢}$ هى الإرتفاع الذى يعطى نفس التغير فى الضغط كالهواء .

∴ ف$_{٢}$ × ١٣٥٠٠ × جـ = ٨٠٠ × ١,٢ × جـ

∴ ف$_{٢}$ = $\frac{٨٠٠ \times ١,٢}{١٣٥٠٠}$ متر ≈ ٠,٠٧١ متر .

= ٧١ مم زئبق .

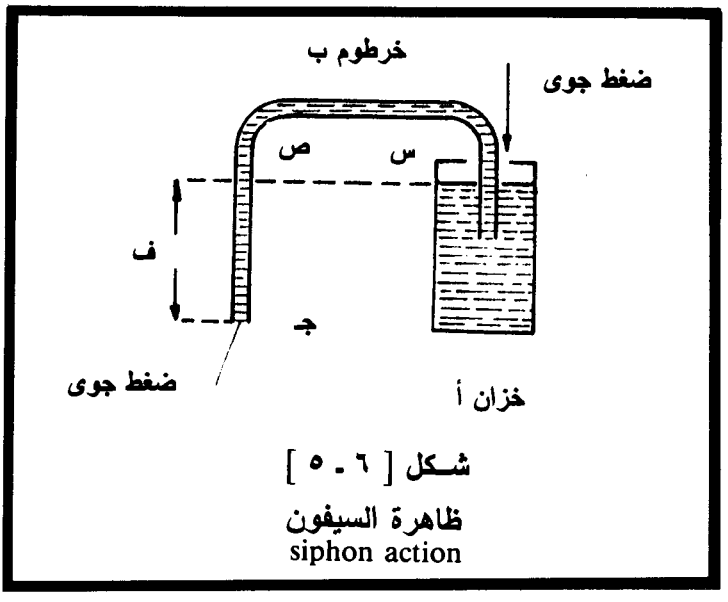
∴ قراءة البارومتر الزئبقى عند قمة هذا الجبل = ٧٦٠ ـ ٧١

= ٦٨٩ مم زئبق

[٦ ـ ٧] ظاهرة السيفون : Siphon action :

فى بعض الخزانات المليئة بالسوائل المختلفة مثل خزانات وقود السيارات والتى تكون مثبتة فى مكانها ، يقتضى الأمر أحياناً أن نفرغها كلياً أو جزئياً ، ويصعب والحال هكذا إفراغها نتيجة تثبيتها .

إلا أنه ، وبناء على ما سبق دراسته يمكننا إفراغها بسهولة ويسر ويوضح شكل (٦ ـ ٥) مبدأ عمل السيفون .



شـكل [٦ ـ ٥]

ظاهرة السيفون
siphon action

الخزان (أ) مثبت ومليء بسائل وفتحته معرضة للضغط الجوى ولإفراغه ،نحضر جزء من خرطوم مرن (ب) ونملأه بالسائل ثم ندفع بإحدى نهايتيه لأسفل سطح السائل (س) فى الخزان (أ) حيث يبدأ السائل فى الإنسكاب خارجاً من النهاية الأخرى (جـ) للخرطوم (ب) عندما تكون هذه النهاية فى مستوى أفقى يقل عن مستوى سطح السائل (س) فى (أ) ، وبذلك يتم إفراغ الخزان تقريباً .

ولإيضاح ظاهرة السيفون بدقة فإننا نحتاج إلى معرفة قوانين الهيدروديناميكا Hydrodynamics ، إلا أننا سنكتفى بذكر شرح مبسط لهذه الظاهرة .

نلاحظ أن الضغط عند النقطة (ص) ، هو ضغط جوى ، مثله مثل الضغط عند (س) تماماً ، فى حين أن الضغط عند مستوى (جـ) فى السائل يكون أكبر من الضغط الجوى خارج (جـ) بمقدار يعادل الإرتفاع (ص جـ) أو اختصاراً **المسافة (ف)** .

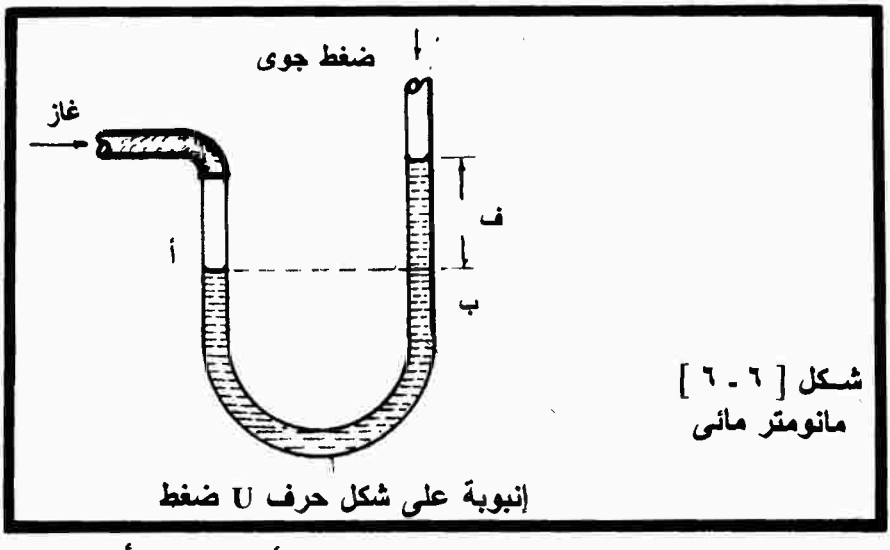
ويجب ملاحظة أنه إذا لم تكن الأنبوبة (ب) مليئة بالسائل فإنها لن تمرر أى سائل لخارج الخزان ، لأنه فى هذه الحالة فإن الضغط بداخلها (لوجود هواء جوى بها) ، سيكون ضغطاً جوياً مثله مثل الضغط خارج الأنبوبة عند النهاية (جـ) .

[٦ ـ ٨] قياس ضغط الغازات :

المانومتر : هو جهاز بسيط لقياس ضغط الغازات ويمكن استخدامه فى قياس ضغط الغازات باستخدام الماء (مانومتر مائى) Water manometer .

وهو يتكون ببساطة من أنبوبة على شكل حرف «U» مليئة بالماء ومفتوحة من إحدى جهتيها للهواء الجوى فى حين تتصل النهاية الأُخرى بمصدر الغاز المُراد قياس ضغطه .

انظر الرسم شكل (٦ ـ ٦) .



شكل [٦ ـ ٦]
مانومتر مائى

فإذا فتحنا مصدر الغاز فإنه يضغط على الماء فى أحد فرعى الأنبوبة ذات الشكل U حيث ينخفض فى فرع ويرتفع فى الآخر وعندما يستقر مستوى الماء فإن ضغط الغاز عند المستوى (أ) = ضغط السائل فى الفرع الآخر عند المستوى (ب) .

وحيث أن الضغط عند (ب) = الضغط الجوى + ض حيث ض هى الضغط الناشيء من وزن عمود الماء فوق (ب) .

فإذا فرضنا أن ارتفاع عمود السائل (ف) = ١٩ سم مثلاً = ١٩٠ مم ماء وحيث أن نسبة كثافة الماء إلى الزئبق

$$= \frac{١}{١٣,٦} \text{ تقريباً .}$$

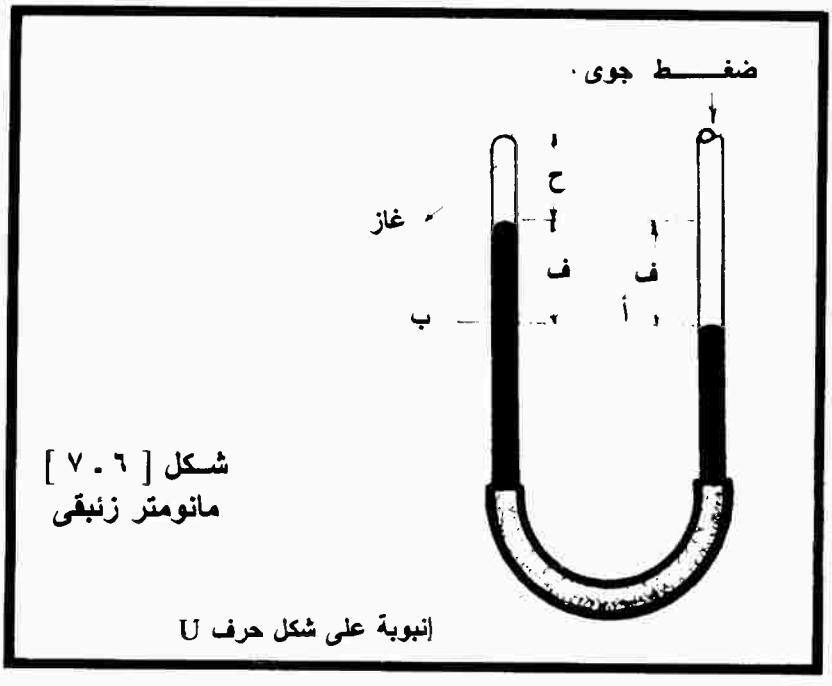
∴ ١٩٠ مم ماء تؤثر بضغط يعادل ارتفاع $\frac{١٩٠}{١٣,٦}$ مم زئبق .

، $\frac{١٩٠}{١٣,٦} = ١٤$ مم زئبق .

فإذا فرضنا أن الضغط الجوى المؤثر عند (ب) = ٧٥٦ مم زئبق مثلاً فيكون ضغط الغاز مساوياً :

ض = ٧٥٦ + ١٤ = ٧٧٠ مم زئبق .

ويوضح شكل (٦ ـ ٧) مانومتر زئبقى لقياس ضغط الغازات .



شـكل [٦ ـ ٧]
مانومتر زئبقى

عبارة عن أنبوبة على شكل حرف U ويوجد عند نهايتها المغلقة حجم معين (ح) من غاز فوق عمود الزئبق ، فى حين أن النهاية الأخرى مفتوحة على الهواء الجوى حيث يكون الضغط عند (أ) ضغطاً جوياً مساوياً للضغط عند (ب) التى تقع فى نفس مستوى (أ)

∴ الضغط الجوى عند (أ) = ضغط الغاز المحبوس فوق (ب) + الضغط الناشىء من وزن عمود الزئبق الذى ارتفاعه = (ف) .

∴ الضغط الجوى = ضغط الغاز + ف

∴ ضغط الغاز = ض جوى ـ ف .

فإذا فرضنا أن ض$_{جوى}$ = ٧٦٠ مم زئبق وأن ف = ٣٠ مم زئبق مثلاً .

فإن ضغط الغاز = ٧٦٠ ـ ٣٠ = ٧٣٠ مم زئبق لحجم الغاز (ح) :

الخلاصـــة :

[١] يمكن للضغط الجوى أن يقاوم ما يعادل وزن عمود من الزئبق طوله ٧٦٠ مم (إرتفاعاً) .

[٢] واحد ضغط جوى = ٧٦٠ مم زئبق ضغط .

= ٠,٧٦ × ١٣٦٠٠ × ٩,٨ نيوتن/م^{٢} تقريباً .

= ١٠١٣٠٠ نيوتن/م^{٢} .

[٣] ١ بار = ٥١٠ نيوتن/م^{٢} .