علم ميكانيكا الموائع

يفترض في دراستنا السابقة أنها قد تناولت "علم الميكانيكا"، وهو العلم الذي يدرس توازن الأجسام وحركتها والأسباب المحدثة لذلك، أما علم ميكانيكا الموائع سائلة كانت أم غازية فهو ذلك الفرع من الميكانيكا الذي يدرس الموائع في حالتي السكون والحركة، وهو يعتمد على نفس المبادئ الأساسية المستخدمة في علم ميكانيكا الجوامد[1] بحيث إن علم ميكانيكا الموائع هو أكثر تعقيدًا، نظرًا لأن جزيئات المائع ينتقل بعضها نسبة لبعضها الآخر ولا توجد أجزاء منه منفصلة يمكن تمييزها، أما جزيئات المواد الصلبة فهي متلاحمة فيما بينها، ويمكن التعامل معها على أساس إمكان تجزئتها إلى أجزاء منفصلة يمكن دراستها منفصلة بشيء من السهولة والتدقيق.

ويمكن تقسيم علم ميكانيكا الموائع إلى ثلاثة فروع؛ "استاتيكا الموائع"[2] (الموائع الساكنة)، وهو علم دراسة الموائع وهي في حالة سكون؛ و"كينماتيكا الموائع"[3]، وهو العلم المتعلق بدراسة سرعات الانسياب وخطوطه بدون اعتبار القوى المؤثرة والطاقة المتداخلة؛ و"هيدروديناميكا" أو "ديناميكا الموائع"[4] وهو العلم المتمثل في دراسة العلاقات بين السرعات والعجلات والقوى المؤثرة على الموائع المتحركة، سواء كانت داخلية أم خارجية.

والهيدروديناميكا التقليدية هي موضوع كبير في علم الرياضيات، حيث إنها تتعامل مع موائع مثالية بدون اعتبار لقوى الاحتكاك كلية؛ الأمر الذي يبتعد عن واقع الموائع الحقيقية. وقد أدت هذه الدراسات إلى نتائج ذات قيمة تطبيقية محدودة نسبيًا. وفي المقابل، اتجه المهندسون إلى التركيز على الاختبارات المعملية التي من خلالها تم وضع العديد من العلاقات التجريبية وتطويرها بحيث أعطت حلولاً لمسائل تطبيقية. وهذا ما يعرف "بعلم الهيدروليكا"[1] الذي كان منصبًا على استخدام الماء في دراسته، الأمر الذي جعلها إلى حد ما محدودة التطبيق. ومع تطور علوم الطيران والكيمياء وصناعة البترول، ظهرت الحاجة إلى معالجات أكثر شمولاً. ولقد أدى ذلك إلى ضم علم الهيدروديناميكا إلى علم الموائع الواقعية في علم واحد جديد أصبح يسمى "علم ميكانيكا الموائع".

وفي علم ميكانيكا الموائع الحديث، فإن المبادئ الأساسية للهيدروديناميكا ضمت إلى التقنية المعملية للهيدروليكا بما يشمل استخدام المعطيات المعملية لتحقيق نظرية أو لإضافة معلومة متعلقة بالتحليل الرياضي. وأصبح واضحًا للباحثين والدارسين للموائع، ضرورة ربط النظريات بالمعمليات. وهكذا، فإن التجهيزات الحديثة للبحث والتطوير تستقطب الرياضيين والفيزيائيين والمهندسين والتقنيين المهرة، حيث أنهم يشتغلون في فريق واحد ويستوعبون كل المعطيات، ويطرحون كافة دقائق المسألة المعروضة للبحث. والناتج النهائي لهذا الترابط، يعد جسمًا متكاملاً يوحد المبادئ الأساسية لعلم ميكانيكا الموائع التي يمكن تطبيقها لحل المسائل الهندسية المتعلقة بسكون الموائع وسريانها.

العدديات والمتجهات1

تعرف "العدديات" على أنها تلك الكميات التي لها مقدار فقط، أي أن مقدارها يكفي لوصفها وصفًا كاملاً، مثلها مثل الكتلة والحجم والضغط ودرجة الحرارة والكثافة. فهي كميات عددية لا يتطلب وصفها وصفًا تامًا إلا تحديد مقدارها. فهي مقادير تتمثل في أرقام معينة ولا تملك اتجاهًا متعلقًا بها، على حين أن "المتجهات" أو الكميات المتجهة تحتاج لوصفها وصفًا تامًا إلى تحديد اتجاهها إضافة إلى مقدارها، فسرعة الطائرة لا تحدد بالقول إنها تطير بسرعة 300 km/hr، بل نحن في حاجة إلى تعيين اتجاهها. وهكذا هو حال سائر سرعات الأجسام المتحركة والأوزان والقوى بصفة عامة وعجلة الجاذبية الأرضية وغيرها. ويمكن تمثيل هذه المقادير المتجهة بسهم مرسوم طوله يعادل المقدار بمقياس رسم مناسب مع بيان زاوية ميله ليتحدد اتجاه العمل. ويدعى هذا السهم، على سبيل المثال؛ "متجه القوة" أو "متجه السرعة". وتجدر الإشارة هنا، إلى أن بعض المقادير المتجهة ومن بينها القوى، لا توصف وصفًا دقيقًا تامًا بمقاديرها واتجاهاتها فقط، بل تعتمد كذلك على خطوط عملها2 ونقاط تأثيرها، حيث إن خط العمل هو الخط المار بنقطة التأثير وله نفس اتجاه القوة المؤثرة.

وهكذا نرى أن المقادير تساهم في تحديد المتجهات ووصفها، على أنه من المعتاد تحليل المتجهات إلى مركباتها الثلاثة تجاه المحاور المتعامدة لنظام الإحداثيات الكارتيزية (x,y,z)3، على سبيل المثال. وانطلاقًا من أهمية علم المتجهات في تمثيل العلاقات الرياضية وسهولة التعامل معها، سنستخدم مفهوم المتجهات في دراسة كثير من المواضيع الواردة في هذا الكتاب.

الأبعاد والوحدات4

لقد أدرك الإنسان منذ القدم، بأن هناك مظاهر حوله تحتاج إلى تقدير وقياس، فالمسافات والارتفاعات والأطوال والكتل والأوزان والأزمنة والقوى والسرعات، وما إلى ذلك من المعطيات التي تعرف اليوم بالأبعاد، تحتاج إلى معايير لتقديرها وقياسها.

هذه الأبعاد، منها رئيسة أو أساسية ومنها الفرعية أو المشتقة. فالأبعاد الأساسية، هي تلك الأبعاد التي لا تعتمد على غيرها من الأبعاد الأخرى، مثل الطول والزمن والكتلة ودرجة الحرارة، فهي أبعاد لا تعتمد على غيرها وهي محدودة العدد كما سنرى. أما الأبعاد المشتقة، فهي التي تتولد من الأبعاد الأساسية من خلال تطبيق القوانين أو التعريفات أو العلاقات المحققة. وعلى ذلك، فإن كل الأبعاد المشتقة يمكن التعبير عنها باستخدام الأبعاد الأساسية. فعلى سبيل المثال؛ السرعة يمكن التعبير عنها بعلاقة الطول مع الزمن؛ والمساحة بالطول المربع؛ أما الكثافة فبعلاقة الكتلة مع الطول المكعب وهكذا.

وبإعطاء الأبعاد رموزًا، تسهل عملية التعامل لمعرفة كافة الأبعاد المتداولة واشتقاقها، فالكتلة يمكن التعبير عنها بالرمز M والقوة بالرمز F والطول L والزمن T ودرجة الحرارة t. وعلى هذا، فإن الأبعاد الممثلة للسرعة تكون (L/T)، أما العجلة فهي (L/T^2)، وهكذا. وتجدر الإشارة إلى أن أي معادلة أو علاقة محققة يجب أن تكون متجانسة بعديًا، أي أن كل حد من حدودها يجب أن يمتلك نفس الأبعاد التي تحملها تلك العلاقة، وسنتعرض لمزيد من التفا

نظام الوحدات MLTt أو نظام SI

هذا هو النظام الدولي للوحدات، ويرمز له بالرمز (SI)، وهو امتداد للنظام المتري التقليدي الذي سنتعرض له لاحقًا. وقد تركز هذا النظام العالمي على الأبعاد الأساسية؛ الكتلة والطول والزمن ودرجة الحرارة، متخذًا وحدة الكتلة بالكيلوجرام (kg) ووحدة الطول بالمتر (m) ووحدة الزمن بالثانية (s)، أما وحدة درجة الحرارة فهي بالكلفن (K)، كما جاء في الجدول (1.1). وتعتبر القوة هنا بعدًا مشتقًا، وسميت وحداتها بـ "النيوتن" (N) كما سنرى. ويمكن التذكير هنا بقانون نيوتن الثاني الذي يمكن كتابته على النحو التالي:

$$F = \frac{ma}{g_c} \qquad (3.1)$$

حيث إن F هي محصلة القوى المؤثرة على جسم معين وتساوي حاصل ضرب كتلته m في عجلته a، كما سبق وأن عرفنا في علم الديناميكا. ومن خلال التطبيق في هذا القانون، يمكن تعريف وحدة النيوتن على أساس أنها مقدار القوة اللازمة لتحريك كتلة مقدارها واحد كيلوجرام بعجلة مقدارها واحد m/s^2 على النحو التالي:

$$1\ N = \frac{1\ kg.m}{s^2} \qquad (4.1)$$

ج (1.1) الأبعاد الأساسية في نظام الوحدات العالمي (SI).

البعد الأساسي	رمز البعد الأساسي	الوحدة	رمز الوحدة
الطول(Length)	L	متر (Meter)	m
الكتلة (Mass)	M	كيلوجرام (kg)	kg
الزمن (Time)	T	ثانية (second)	s
درجة الحرارة (Temperature)	t	كلفن (Kelvin)	K

نظام الوحدات FLTt[1]

وهو النظام البريطاني، الذي يأخذ القوة والطول والزمن ودرجة الحرارة على أنها أبعاد أساسية ويسخرها لاشتقاق باقي الأبعاد، اعتمادًا على قانون الجاذبية، حيث إن وحدة القوة بالباوند (lbf)، والطول بالقدم (ft) والزمن بالثانية (s)، أما وحدة درجة الحرارة فهي الرانكن (R). ونظرًا لأن الكتلة بعد مشتق فإن هذا النظام تبنى وحدة كتلة أخذت على أنها مقدار الكتلة التي تكتسب عجلة مقدارها 1 ft/s^2 عند التأثير عليها بقوة مقدارها 1 lbf. وقد سميت هذه الوحدة بـ "الصلق" (slug)، التي يمكن تعريفها رياضيًا في ظل قانون نيوتن الثاني كالتالي:

$$1\ lbf = \frac{1\ slug.ft}{s^2}$$

أو أن؛

$$1\ slug = \frac{1\ lbf.s^2}{ft} \qquad (4.1)$$

ج (2.1) قائمة ببعض الكميات المشتقة المستخدمة في علم ميكانيكا الموائع مع أبعادها ووحداتها العالمية.

الكمية	الرمز	الوحدة بنظام (SI)
المساحة	L^2	m^2
الحجم	L^3	m^3
السرعة	LT^{-1}	m/s
العجلة	LT^{-2}	m/s^2
الكثافة	ML^{-3}	kg/m^3
الوزن النوعي	FL^{-3}	N/m^3
الضغط	FL^{-2}	$N/m^2=Pa$
معدل التدفق	L^3T^{-1}	m^3/s
اللزوجة الكينماتيكية	L^2T^{-1}	m^2/s
اللزوجة	FTL^{-2}	$N.s/m^2=Pa.s$
الطاقة	FL	N.m=J
القدرة	FLT^{-1}	N.m/s=J/s=W

وفي النظام المتري المطلق المشار إليه أعلاه، فإن وحدة الكتلة بالجرام (gm)، ووحدة الطول بالسنتيمتر (cm)، ووحدة الزمن بالثانية (s)، أما وحدة درجة الحرارة فهي بالكلفن (K). ونظرًا لأن القوة هي بعد مشتق، فإن وحدة القوة هي الداين (dyne) الذي يمكن تعريفه على أساس قانون نيوتن الثاني كما يلي:

$$1\,\text{dyne} = \frac{1\,\text{gm.cm}}{s^2} \qquad (5.1)$$

ومن هنا فإن الداين الواحد هو مقدار القوة اللازم لتحريك جسم كتلته واحد جرام بعجلة مقدارها واحد cm/s^2. توضح الأمثلة القادمة كيفية استخدام قانون نيوتن للحركة مع بيان معالجة الوحدات المستخدمة.

نظام الوحدات FMLTt [1]

وهذا نظام وحدات هندسي بريطاني آخر، يعتمد على الأبعاد الأساسية؛ القوة والكتلة والطول والزمن ودرجة الحرارة، بحيث تعطى وحدة القوة بالباوند قوة، ووحدة الكتلة بالباوند كتلة، ووحدة الطول بالقدم ووحدة الزمن بالثانية، على أن وحدة درجة الحرارة بالرانكن. ونظرًا لأن القوة والكتلة اختيرتا على أنهما بعدان أساسيان، فالقانون الثاني لنيوتن يقود إلى أن قوة 1lbf هي مقدار القوة بالباوند التي تحرك كتلة مقدارها 1lbm بعجلة مقدارها يساوى عجلة الجاذبية الأرضية القياسية $32.17\ ft/s^2$. وبالتطبيق في القانون المذكور، فإن؛

$$1\,\text{lbf} = \frac{1\,\text{lbm} \times 32.17\,\text{ft/s}^2}{g_c} \qquad (7.1)$$

ومن ثم، فإن،

$$g_c = 32.17\,\text{ft.lbm/lbf.s}^2 \qquad (8.1)$$

وعلى هذا فإن ثابت التناسب، g_c ، له مقدار ووحدات. وبمقارنة المعادلتين (4.1) و(7.1)، ينتج أن؛

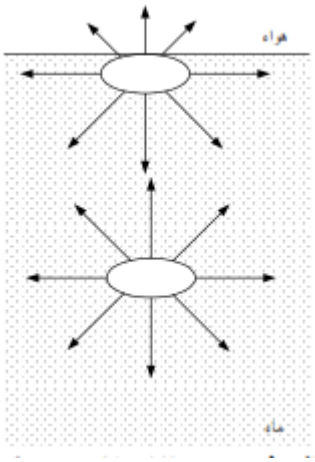
$$1\ \text{slug} = 32.17\ \text{lbm} \qquad (9.1)$$

ويلاحظ هنا أن الوزن بوحدات الباوند قوة تعادل عدديًا الكتلة بوحدات الباوند كتلة وذلك فقط عند سطح الأرض وحيثما كانت عجلة الجاذبية تساوي $32.17\ \text{ft/s}^2$.

يأتي الكثير من الخلط بين الكتلة والوزن؛ فالكتلة كما رأينا تعبر عن كمية المادة في الجسم ولا تعتمد على موقعه نسبة إلى سطح الأرض، فالكتلة ثابتة سواء كانت على سطح الأرض أو في الفضاء البعيد؛ أما وزن الجسم نفسه فيمكن تعريفه على أساس أنه القوة التي يجذب بها الجسم ناحية الكوكب الذي يقع هذا الجسم في مدار تأثيره.

التوتر السطحي1

يتكون لكل سائل يوضع في وعاء، سطح بيني يفصله عن المائع أعلاه، غازًا كان أم سائلاً. تتولد قوى شد موزعة على هذا السطح سببها عدم التوازن بين قوى التجاذب1 فيما بين جزيئات السائل المتشابهة أسفل السطح وبين قوى التلاحم2 بين جزيئات المائعين غير المتشابهة؛ أي جزيئات السائل عند السطح وجزيئات المائع الآخر أعلاه. في داخل هذا السائل، فإن قوى التجاذب بين جزيئاته متكافئة بحيث يلغي بعضها بعضًا، كما هو مبين في الشكل (4.2)، أما بالنسبة للجزيئات المكونة للسطح، فإن قوى التجاذب نحو داخل السائل تفوق قوى التلاحم تجاه خارج السائل، الأمر يولد شد على امتداد السطح البيني ويظهر وكأنه غشاء مطاطي مشدود بقوة "الشد السطحي" أو "التوتر السطحي".


هواء
ماء

ش (4.2) تولد التوتر السطحي من الاختلاف بين قوى التجاذب والتلاحم.

ولهذا السبب يتكون السطح الكروي لقطرة الماء، ولهذا السبب أيضًا، تستطيع بعض الحشرات الصغيرة الخفيفة المشي على سطح الماء دون أن تنغمس، بل عند وضع إبرة دقيقة فوق سطح الماء بلطف، لا تنغمس وتبقى محمولة فوق السطح. وبالرغم من أن أي اعتبارات مفصلة في هذا الموضوع، هي أقرب إلى الفيزيائي منها إلى المهندس، فإن هذه الخاصة للسوائل تستحق الخوض فيها ولو باختصار لأنها تدخل في بعض التطبيقات الهندسية.

يعرف التوتر السطحي على أنه شدة تحميل وحدة طول الخط المماس للسطح، ويعطى له الرمز "σ"، ويكون لكل وحدة طول من الخط المرسوم على السطح الحر، على أن يكون التحميل عموديًا على ذلك الخط. وتسمى σ "معامل التوتر السطحي"[1] المتمثل في مقدار القوة لكل وحدة طول؛ أي N/m بوحدات النظام العالمي.

ومن الأهمية أن نلاحظ أن التوتر السطحي ليس بقوة ولا إجهاد، بل كما ذكر أنه قوة لكل وحدة طول. وتعتمد قيمة التوتر السطحي على طبيعة السائل وطبيعة المادة الملاصقة لسطح السائل التي من الممكن أن تكون صلبة، أو سائلة أو غازية، كما أن قيمة التوتر السطحي تعتمد على درجة الحرارة للسائل وضغطه. ويلاحظ أن التوتر السطحي للسائل عند الغشاء البيني بين السائل والغاز أو البخار لا يعتمد على نوعية الغاز أو البخار إلا قليلاً، وذلك لأن جزيئات الغاز مفصولة بمسافات بينية في رتبة مئات المرات من تلك التي فيما بين جزيئات السائل، وعلى هذا فإن قوى التلاحم بين جزيئات الغاز والسائل صغيرة جدًا نسبيًا بحيث لا يكون لنوعية الغاز أو البخار أهمية كبيرة في هذا الشأن .

وتأتي ظاهرة "التبلل"[2] نتيجة لظاهرة التوتر السطحي. فعندما تفوق قوى التلاحم فيما بين السائل والسطح الجامد قوى التجاذب فيما بين جزيئات السائل، فإن السائل سوف ينتشر أو ينساب ويبلل السطح الجامد نتيجة لتفوق قوى التلاحم، أما إذا طغت قوى التجاذب في السائل على قوى التلاحم فيما بين السائل والسطح الصلب، فإن جزيئات السائل سوف تجذب بعضها بعضًا وتنغلق على نفسها لتكون قطرات صغيرة يمكنها أن تتدحرج على السطح كوحدة واحدة وكأنها كرة مطاطية.

تصنيف حركة الموائع

يلجأ العلماء إلى تصنيف حركة الموائع سعيًا وراء تسهيل الأمر للدارس من خلال تعريف خصائص كل صنف ليتم توظيف المعلومات والعلاقات الخاصة بكل منها من خلال حصر المتغيرات والتطبيق المباشر بكل صنف.

يوضح الشكل (7.2) تصنيف حركة الموائع لتوضيح الصورة لدى القارئ. جاء سرد الموضوعات هنا ليس بالضرورة خاضعًا لأولويات التقسيم، بل جاء مراعيًا لشرح المفاهيم والتعريفات أولا بأول وبالترتيب المناسب لعرض الموضوع. ويتضح من خلال الشكل المذكور، أن الانسياب يمكن أن يكون داخليًا أو خارجيًا، مستقرًا أو غير مستقر، لزجًا أو غير لزج، قابل للانضغاط أو غير قابل للانضغاط، ومنتظمًا أو غير منتظم وما إلى ذلك من التصنيفات التي نأتي هنا على بعضها ولو بشيء من الإيجاز.

السريان الداخلي أو السريان الخارجي1

يصنف السريان حسب وجوده بالنسبة للجدران المجاورة لها، فالسريان المحاط بالكامل بجدران يدعى "السريان الداخلي"، ومن بينه سريان مياه المدينة في أنابيب النقل والتوزيع، وسريان زيت النفط والغاز في خطوط الأنابيب المختلفة الأغراض، وانسياب هواء التدفئة والتبريد في قنوات منظومة تكييف المباني. أما "السريان الخارجي" فهو الذي يحدث حول الأجسام المغمورة، مثل السريان على الأسطح المستوية والمنحنية والسريان على الأجسام المفلطحة وغيرها مثل سريان الهواء على أسطح المباني وعلى أجسام الطائرات وعلى السيارات وعلى المراوح الهوائية لتوليد الطاقة، ومثل سريان الماء على أجسام الغواصات والسفن، وما إلى ذلك، فكل منها يعتبر سريان خارجي.

كما تجدر الإشارة هنا إلى أن في دراسة سلوك السريان نهتم بالحركة النسبية بين الجسم (أو الجدار) والمائع؛ أي أنه من الممكن أن يكون الجسم متحركًا والمائع ساكنًا، كما في حالة السيارات والطائرات، أو أن يكون المائع هو المتحرك والجسم ساكنًا، كما في حركة الرياح على الأسطح المختلفة. وكل من الحالتين تحقق نفس المعطيات وتوصل إلى نفس النتائج.

وهناك صنفا آخر يعالج عادة بطريقة خاصة إلى حد ما، يسمى سريان "القنوات المفتوحة"1، متمثلاً في سريان السوائل مع وجود سطح حر لها

خاضع لضغط ثابت. وأمثلة ذلك؛ الأنهار وسواقي الري والقنوات المفتوحة لمياه التبريد في بعض المصانع ومحطات القوى، كما أنها تشمل سريان السوائل داخل القنوات المقفلة غير المملوءة بالكامل، كما يحصل عادة في قنوات الصرف الصحي على سبيل المثال.

السريان اللزج أو السريان غير اللزج[2]

يعتبر السريان غير لزج عندما تكون تأثيرات اللزوجة على سلوك السريان صغيرة يمكن إهمالها. هنا نجد أن إجهادات القص في السريان صغيرة بحيث لا تؤثر تأثيرًا ذا قيمة على مجال السريان. ولقد كان لمجهودات العاملين الأوائل[3] في هذا المجال الأثر الطيب حيث اتضح أن السريان الخارجي الفسيح من بين الحالات الأولى للسريان التي يمكن اعتبارها غير لزجة، حيث تنحصر تأثيرات اللزوجة في طبقة رقيقة تلامس الجدار تسمى "الطبقة الحدودية"[4]، الأمر الذي يسهل عملية تحليل السريان غير اللزج وفي نفس الوقت يقود إلى نتائج ذات معنى.

وانطلاقًا من التعريف الوارد أعلاه، فإن السريان لزج هو السريان الذي يخضع سلوكه لتأثيرات اللزوجة، ونجد هذا السريان اللزج في معظم التطبيقات الهندسية. ومن بين هذه الأمثلة على السريان اللزج، السريان في منظومات نقل النفط الخام ومشتقاته. ففي مثل هذا السريان، تحدث مقاومة جمة نتيجة تأثيرات اللزوجة تكون مدعاة لاستخدام كميات كبيرة من الطاقة لتأمين نقل تلك الموائع. سنتعرض في الباب الخامس إلى كيفية معالجة سلوك السريان اللزج في الأنابيب.

السريان الطبقي أو المضطرب[1]

يتميز السريان اللزج بأن له طورين رئيسيين هما؛ الطبقي والمضطرب. فعندما يتحرك السريان اللزج بسرعات صغيرة وتكون لزوجة المائع كبيرة، تكون حركة هذا الانسياب عادة لطيفة هادئة. حيث تتحرك جسيمات المائع على طول مسارات ناعمة في طبقات رقيقة، كل طبقة تتميز بسرعتها عن الأخرى، فتتحرك كل طبقة بلطف فوق الطبقة المجاورة لها، دون تداخل طبقة في أخرى، ويوصف هذا السريان بأنه "سريان طبقي" أي سريان الطبقات. وهذا يحكم بواسطة قانون نيوتن للزوجة معادلة (6.2).

أما إذا كانت سرعات هذا السريان عالية نسبيًا مع صغر لزوجة المائع، فعادة ما يكون السريان "مضطربًا"، حيث تتحرك جسيمات المائع في مسارات غير منتظمة جدًا، ولا وجود لطبقة منفردة بل هناك تداخل مستمر، فهي حركة عشوائية ثلاثية الأبعاد لجسيمات المائع المدفوعة في وسط الحركة، محدثة تبادلاً في طاقة الحركة فيما بين جسيمات السريان الموجودة بأحجام مختلفة.

وحين تتغير الظروف يمن أن يتحول السريان من طور إلى آخر، فيمن التحول من السريان الطبقي إلى السريان المضطرب أو بالعكس، بحيث يمر بصورة ثالثة من السريان يطلق عليها السريان المختلط، أو "السريان الانتقالي"[2]، وهي المرحلة التي يتم بها العبور عند التغير من السريان الطبقي إلى المضطرب وبالعكس.

وعند مقارنة قوى القصور الذاتي المتولدة من حركة المائع مع قوى اللزوجة فيه، تتولد علاقة نسبية كان المهندس البريطاني رينولدز[3] قد حددها في عام 1883. تتمثل هذه العلاقة المهمة في النسبة التالية:

$$\frac{\text{Momentum Rate}}{\text{Viscous Forces}} \equiv \frac{\dot{m}V}{\tau A} = \frac{\rho A V^2}{\mu(\frac{V}{L})A} = \frac{\rho V L}{\mu} \equiv \text{Re} \qquad (27.2)$$

حيث L هو البعد المميز ذو العلاقة بالشكل الهندسي للممر. فمثلاً، في حالة سريان الأنابيب الدائرية المقطع، يعتبر القطر هو البعد المميز. وسميت هذه العلاقة النسبية، Re، بـ "عدد رينولدز"، الذي أصبح معيارًا يستخدم لمعرفة السريان الطبقي من المضطرب. ولقد أظهرت التجارب الأخيرة في هذا الشأن[1]، أن القيمة الدنيا الحرجة لعدد رينولدز لسريان الأنابيب الدائرية المقطع والمستقيمة الناعمة جدًا هي 2,300؛ أي أن الانسياب يعد طبقيًا، ما دام Re يساوي 2300 أو أقل. هذه القيمة الحرجة هي بالطبع، أقل قليلاً للأنابيب التي لها درجة أعلى من الدرجة المعتادة لخشونة الجدار، وكذلك للأنابيب المنحنية التي لا يخلو تطبيق من وجودها. وعلى هذا وللأغراض الهندسية التقليدية عامة، تؤخذ القيمة الحرجة بالخصوص على أنها 2,300، وهي لا بعدية؛ أي مهما كانت الوحدات المستخدمة، فإن الناتج العددي واحد.

وبتغيير المعطيات ليصل عدد رينولدز إلى قيمة تساوي 4000 أو أكثر، فإن الانسياب يعد مضطربًا، على أن يبقى السريان الانتقالي ليغطي المجال بين 2300 و4000. وتجدر الإشارة إلى أن هذه الأرقام ليست عامة، بل هي خاصة بالأنابيب والقنوات، وهناك قيم أخرى لهذا العدد خاصة بالتدفق على الأسطح المستوية وعلى الأسطوانات والكرات وما إلى ذلك، حيث تتولد قيمًا أخرى حرجة ذات شأن بسريانها اللزج.

السريان المستقر أو السريان غير المستقر[2]

يعتبر السريان مستقرًا عندما تكون كل خصائصه عند أي نقطة في مجال السريان ثابتة مع الزمن. فإذا ثبتت سرعة السريان عند كل النقاط في مجال السريان، مقدارًا واتجاهًا، فإن هذا يمكن تمثيله بالعلاقة التالية:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0 \qquad (28.2)$$

وهذا يعني أن السرعة عند أي نقطة في الفراغ (x,y,z) تكون ثابتة لا تتغير مع الزمن، ومن الممكن أن تتغير من نقطة إلى أخرى في الفراغ؛ أي أن

$$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z)$$

وعلى غرار هذا، يتميز السريان المستقر بأن كل من الكثافة ρ والضغط P ودرجة الحرارة T ثابتة مع الزمن عند أي نقطة، وبناء على ذلك فإن؛

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}=0 \qquad \text{or} \quad \rho(x,y,z)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t}=0 \qquad \text{or} \quad P(x,y,z)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}=0 \qquad \text{or} \quad T(x,y,z)$$

وبهذا يجدر بنا أن نتذكر أن في السريان المستقر، يمكن لأي خاصية أن تتغير من نقطة إلى أخرى في المجال، ولكن كل الخواص يجب أن تبقى ثابتة مع الزمن عند أي نقطة في المجال، ويمكن تمثيل هذا المفهوم بالعلاقة العامة التالية:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}=0$$
$$\eta=\eta(x,y,z) \qquad (29.2)$$

السريان القابل للانضغاط أو السريان غير القابل للانضغاط

لقد تعرضنا إلى موضوع الانضغاطية في البند (5.2) حيث تم التركيز على انضغاطية الموائع وليس لسريانها. فالسريان أو الانسياب غير القابل للانضغاط تبقى فيه كثافة كل جسيم منه نسبيًا ثابتة بينما يتحرك في مجال السريان، أي أن:

$$\frac{D\rho}{Dt}=0 \qquad (30.2)$$

وهذا الشكل للتفاضل يدعى التفاضل الكلي؛ ويتمثل في التفاضل بالنسبة للإحداثيات الفراغية والزمن معًا، أي أن الكثافة لا تتغير مع الزمن ولا تتغير من موقع إلى آخر.

ويمكن أن يكون السريان قابلاً للانضغاط أي أن تغيرات كثافة المائع في هذا السريان ذات قيمة لا يمكن إهمالها. أما إذا كانت تغيراتها صغيرة بحيث يمكن إهمالها دون الوقوع في نتائج بعيدة عن الواقع، فهذا السريان يصنف على أنه غير قابل للانضغاط. وفي كثير من التطبيقات، نجد أن سريان السوائل هو بالضرورة غير قابل للانضغاط. أما سريان الغازات فهو كذلك غير قابل للانضغاط ما دامت سرعته، V، صغيرة مقارنة بسرعة الصوت، c، في الوسط تحت نفس الظروف المعطاة. وتتمثل هذه النسبة بين السرعتين في عدد يسمى "عدد ماخ"، والذي سبق الإشارة إليه في البند (5.2)؛ أي أن:

$$M=\frac{V}{c} \qquad (31.2)$$

وهنا يتضح أنه كلما انخفضت سرعة السريان مقارنة بسرعة الصوت في نفس الوسط وتحت نفس الظروف؛ أي كلما صغرت M، أصبحت الانضغاطية أقل أهمية. وعند دراسة العلاقة بين M والتغير المتولد في كثافة المائع، وجد أنه ما دامت M أصغر من 0.3، فإن نسبة الخطأ في

حساب الكثافة لا تتعدى حدود 3 في المائة. ولذلك فإن سريان الغازات في عموم التطبيقات الهندسية مع $M > 0.3$، يمكن معالجته وكأنه غير قابل للانضغاط.

السريان المنتظم أو السريان غير المنتظم1

يمكن معرفة السريان المنتظم بالرجوع إلى طبيعة توزيع السرعة عند أي مقطع للسريان، فيتحقق السريان المنتظم عندما تكون السرعة ثابتة عبر المقطع ولا تتغير من نقطة إلى أخرى عند لحظة معينة، أي أن يكون متجه السرعة عند كل النقاط في مستوى مقطع السريان واحدًا اتجاهًا ومقدارًا، أي؛

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial s} = 0 \qquad (32.2)$$

حيث s تعني الإزاحة في أي اتجاه على مستوى المقطع. هذه العلاقة تنص على أنه لا يوجد تغير في متجه السرعة ما دمنا نتحرك على مستوى المقطع. وهنا تجدر الإشارة إلى أننا لم نتحدث حول تغير السرعة عند نقطة مع الزمن؛ أي أن السريان المنتظم يمكن أن يكون مستقرًا أو غير مستقر؛ أي من الممكن أن تبقى السرعة في مقطع ثابتة أو تكون متغيرة مع الزمن، أي أن؛

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \neq 0 \quad \text{or} \quad \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0$$

وبديهي فإن السريان غير المنتظم، له متجه سرعة متغير بين نقطة وأخرى داخل المجال، وعلى سبيل المثال، فالماء المتدفق في أنبوب طويل سرعته تكون صفرًا عند الجدار بينما سرعته القصوى تكون عند المحور، أي أن سرعته غير ثابتة، ويعد هذا تدفقًا غير منتظم.

ومازالت هناك تصنيفات فرعية أخرى، فهناك السريان المثالي ويقابله السريان الفعلي، والسريان الدوراني والسريان غير الدوراني، والسريان الكامل الطور وغيرها، وسوف يأتي كل منها في أوانه بشيء من التفصيل لاحقًا. وبالطبع يمكن أن تجتمع صفتان أو أكثر لنفس السريان كما جاء في الشكل (6.2)، فيكون السريان على سبيل المثال، "داخليًا لزجًا مستقرًا" خلال سريانه في أنبوب طويل بمعدل ثابت، كما يكون "داخليًا لزجًا غير منتظم مستقرًا خلال قناة مكبرة بمعدل ثابت وهكذا.

علم سكون الموائع أو ما يعرف بـ "استاتيكا الموائع"[1]، هو فرع من علم ميكانيكا الموائع الذي يعني بدراسة قوى الضغط التي تبديها الموائع الساكنة. يعتبر المائع ساكنًا، إذا كانت كل جسيماته لا تتحرك بالنسبة لإحداثيات قارة. ويتضمن هذا الموضوع، العديد من التطبيقات بما يشمل دراسة السدود والأحواض والخزانات، ودراسة أعماق البحار والمحيطات، ودراسة خزانات مستودعات النفط ومشتقاته، وما إلى ذلك.

ويمكن معالجة بعض التطبيقات على أنها موائع ساكنة إذا كانت جسيمات المائع لا تتحرك حركة نسبية فيما بين بعضها البعض، بغض النظر على أن جميعها متحركة بسرعة أو عجلة منتظمة؛ أي أن جميعها تتحرك وكأنها جسم واحد متماسك، كحركة الوقود السائل في العربات المتحركة الأرضية والبحرية والفضائية.

وعندما لا توجد حركة نسبية فيما بين الجسيمات، فلا يوجد تدرج في السرعة وبالتالي ليس هناك إجهادات قص، أي تختفي تأثيرات اللزوجة. لذلك فإن الإجهاد الوحيد الموجود في مثل هذه الحالة هو الإجهاد العمودي، وهو العنصر الأكثر أهمية في دراسة سكون الموائع من حيث تعريفه وكيفية تغيره وطرق قياسه وهو ما نركز عليه في هذا الباب.

وتتسع تطبيقات علم الموائع الساكنة لتشمل التعامل مع اتزان الأجسام المغمورة والطافية، لتدخل في الحسابات المتعلقة بتصميم وتشغيل السفن والبوارج والغواصات والبالونات والمناطيد، إضافة إلى دراسة أساسيات شروط استقرارية كل منها.

الضغط الاستاتيكي

انطلاقًا مما ذكر في الباب الثاني، فإن الإجهادات العمودية في الموائع الساكنة والموزعة على كافة أجزاء السطوح هي الممثلة لما يسمى بـ "الضغط الاستاتيكي". جاءت كلمة "الاستاتيكي" هنا لتؤكد على أن مقدار الضغط الاستاتيكي لا يأخذ في الحسبان تأثير حركة المائع. ويتبين من تعريف الإجهاد أن الضغط هو مقدار شدة تركيز القوة على المساحة؛ أي هو مقدار القوة المسلطة على وحدة المساحة. فالضغط عند نقطة في المائع، يمكن الحصول عليه بجعل المساحة تئول إلى مساحة صغيرة جدًا تقترب من الصفر على النحو التالي:

$$p = \lim_{\delta A \to 0} \frac{\delta F}{\delta A} \tag{1.3}$$

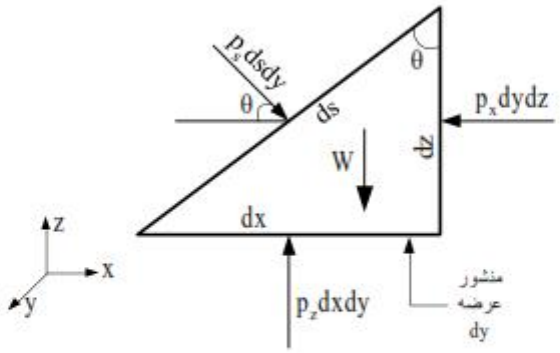
ووحداته العالمية N/m^2 او ما يعرف بـ "الباسكال"[1] (Pa). وحيث إن وحدة الباسكال هي وحدة صغيرة جدًا كما سنرى لاحقًا، فإنه من الملائم وضع الضغط بوحدات الكيلو باسكال أو ما يمثل kPa. وعلى سبيل المثال، فإن الضغط الجوى القياسي[2] عند سطح البحر يعطى بالمقدار 101.3 k Pa.

وبالطبع يمكن أن يتغير مقدار الضغط من نقطة إلى أخرى في المائع، لذا يمكن التعامل مع "متوسط الضغط" الذي يؤثر على مساحة معينة والمتمثل في التعريف الرياضي التالي:

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

ولقد اتضح لنا أن القوى السطحية الوحيدة التي تؤثر عند أسطح المائع الساكن هي قوى الضغط، وباعتبار أن القوى البدنية الوحيدة هي قوى الجاذبية، فإنه باستخدام عنصر متناه في الصغر من المائع على شكل منشور تحت الظروف المبينة في الشكل (1.3)، يمكن كتابة قانون نيوتن الثاني للحركة في اتجاه x على النحو التالي:

$$p_s\ ds\ dy\cos\theta - p_x\ dy\ dz = 0$$



ش (1.3) القوى المؤثرة على عنصر من المائع الساكن.

وحيث إن؛

$$dz = ds\cos\theta$$

وبذلك فإن؛

$$p_s = p_x$$

وبالمثل، فإنه بجمع القوى في اتجاه المحور z، نجد الآتي:

$$p_z\ dx\ dy - p_s\ ds\ dy\sin\theta - \frac{1}{2}\rho\ g\ dx\ dy\ dz = 0$$

وهنا نجد أن الحد الثالث يحوي حجم العنصر $(\frac{1}{2}dxdydz)$، وهو صغير جدًا ما دامت كل الأبعاد تئول إلى الصفر. وعلى هذا فإن هذا الحد يمكن إهماله؛ أي بالإمكان اعتبار العنصر نقطة واقعة في المائع، الأمر الذي يجعل المعادلة السابقة تقود إلى أن؛

$$p_z = p_s$$

وبنفس الطريقة السابقة، بأخذ القوى المؤثرة في اتجاه المحور y، يمكن إثبات أن؛

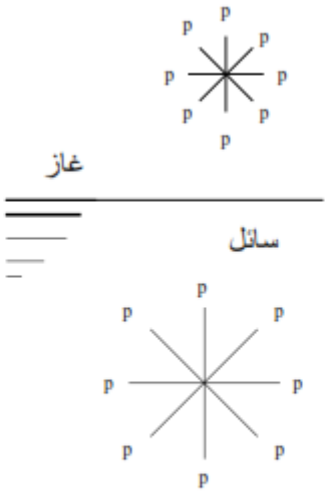
$$p_s = p_y$$

ويتضح من الاستنتاجات الثلاثة السالفة الذكر، أن كل الضغوط متساوية؛ أي؛

$$p_s = p_x = p_y = p_z = p \qquad (2.3)$$

وبما أن الزاوية θ يمكن أن تكون لها أية قيمة، فإن المعادلة أعلاه تدل على أن الضغط يؤثر بالتساوي في كل الاتجاهات كما يتضح في الشكل (2.3). والشرط الوحيد لهذا الاستنتاج العام، هو أن المائع يجب أن يكون متواصلاً؛ أي أن المنشور حتى وإن جعل صغير جدًا، فإنه ما زال يحتوي على عدد كبير من الجزيئات بما يضمن مفهوم الوسط المتواصل كما جاء في الباب الثاني.

وتجدر الملاحظة هنا، أن هذه النتيجة تؤدي إلى أن مقدار الضغط في المائع يكون ثابتًا عند أي نقطة، أي أن الضغط دالة عددية تؤثر بالتساوي في كل الاتجاهات عند النقطة المعطاة، وهذا ما جاء به العالم "باسكال" في قانونه المعروف الذي ينص على أن "الضغط يؤثر بانتظام في كل الاتجاهات عند نقطة معينة، وأنه يؤثر عموديًا على الأسطح الملامسة للمائع".



ش (2.3) الضغط عند نقطة في وسط المائع.

ومما سبق يتضح أن كل الإجهادات العمودية والمتمثلة في الضغط على الأسطح المارة بنقطة هي متساوية، ولقد سبقت الإشارة في الباب الثاني بالعلاقة (5.2) إلى أن الإجهاد الحجمي عند ة معينة هو متوسط الإجهادات الثلاثة المتعامدة عند تلك النقطة. ومن هنا يجب أن تكون الإجهادات العمودية مساوية للإجهاد الحجمي، أي من المعادلة (5.2) والمعادلة (2.3) نجد أن؛

$$-\bar{\sigma} = p \qquad (3.3)$$

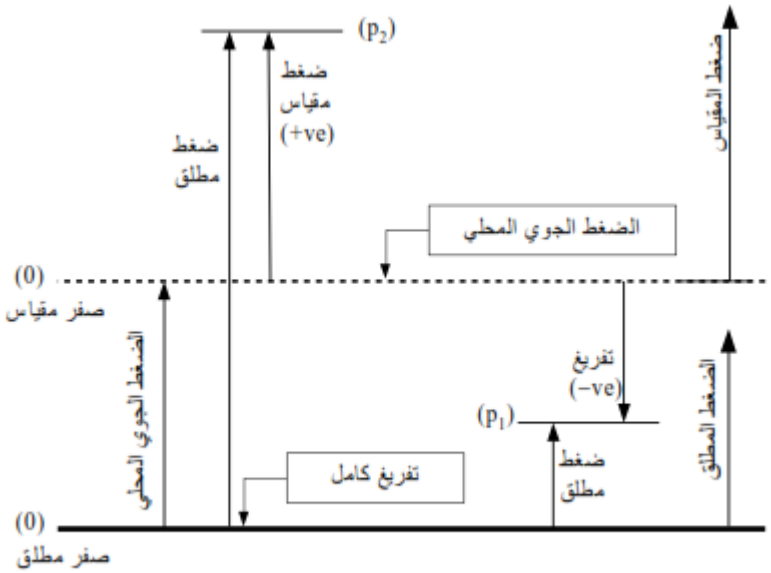
حيث جرت العادة، على أن يكون الإجهاد العمودي المحتمل في الموائع دائما متجها نحو المساحة وليس خارجًا منها، أي أنه يحمل إشارة سالبة. وباستخدام نظرية الحركة للغازات، ثبت أن هذه العلاقة صحيحة للغاز المثالي، كما تشير الدلائل إلى أن هذه العلاقة تصبح باطلة عندما تقترب حالة المائع، سائلاً كان أم غازًا، من النقطة الحرجة[1] التي عرفناها في دراستنا للديناميكا الحرارية.

ضغط المقياس والضغط المطلق[2]

إن الضغط مثله مثل درجة الحرارة، كمية فيزيائية يمكن تقييمها باستخدام مقاسات مختلفة. فعادة ما يتم قياس الضغط نسبة إلى الضغط الجوي الموضعي وهو الأساس، وذلك لأن أغلب أجهزة قياس الضغط تسجل عمليًا صفرًا إذا كانت تحت تأثير الضغط الجوي المحيط. ومن ثم

فهي تقيس الفرق بين ضغط المائع المتصلة به وضغط الهواء المحيط بها، وعلى هذا جاءت تسمية هذا الضغط بـ "ضغط المقياس". أما إذا تم قياس هذا الضغط بالنسبة للصفر المطلق، فإن هذا يعرف بـ "الضغط المطلق"، على أن كلا منهما له استخداماته. فيمكن استخدام أيًا منهما اختياريًا في بعض العلاقات وهما يقودان إلى نفس النتائج. أما فيما يتعلق ببعض العلاقات الأخرى، فإن استخدام الضغط المطلق يكون إجباريًا كما سيأتي لاحقا وكما درسنا سابقًا.

ويبين الشكل (3.3) العلاقة بين المقاسات المتداولة، حيث يوضح أن الضغط الجوي الموضعي عادة ما يعطى بمقدار مطلق يكون أكبر أو أصغر من الضغط الجوي القياسي، وهذا الضغط الموضعي يعتبر صفرًا بضغط المقياس. وحين يكون ضغط المائع أقل من الضغط الجوي الموضعي، فيكون هناك "تخلخل" أو "تفريغ"، وتكون قيمته المقاسة بالمقياس هي المقدار الذي تكون به أقل من الضغط الجوي الموضعي، على أنه يدعى بـ "ضغط التفريغ" دليلاً على أنه أقل من الضغط الجوي الموضعي. ويمكن الوصول إلى تفريغ شبه كامل، أي الاقتراب من الصفر المطلق، ولربما كان هناك إمكان التفريغ الكامل الذي يناظر الصفر المطلق؛ أي الوصول إلى التفريغ المثالي بضغط تفريغ مقداره ضغط جوي واحد. وهذا يعني أنه لا يبقى أي من جزيئات المائع في الحيز، وهذه الحالة؛ حالة الصفر المطلق، هي أقصى ما يمكن الوصول إليه، أي من المستحيل الحصول على ضغط مطلق بالسالب. وعلى هذا فإن جميع قيم الضغوط المطلقة موجبة.



ش (3.3) العلاقة بين الضغط المطلق وضغط المقياس.

وعند التعبير عن مقدار ضغط التفريغ سلك المختصون أسلوبين؛ أمّا الاحتفاظ بالإشارة السالبة كما نكتب ضغط مقياس مقداره (50 kPa–)، أو لا توضع الإشارة السالبة ويكتفي بأن نقول بـ "ضغط تفريغ مقداره 50kPa". ولعل العلاقة بين الضغط المطلق وضغط المقياس قد باتت الآن واضحة، ومن خلال النظر للشكل الوارد (3.3)، يمكن تمثيلها بالمعادلة البسيطة التالية:

$$p_{abs} = p_{gage} + p_{atm} \qquad (4.3)$$

الضغط المطلق = ضغط المقياس + الضغط الجوي الموضعي

وعمومًا في هذا الكتاب، سوف يؤخذ الضغط أينما أتى على أنه ضغط المقياس، ما عدا الضغط الجوي الذي عادة ما يعطى بالضغط المطلق، أما الضغوط المطلقة الأخرى فإن كلمة "مطلق" أو (abs) سوف تتبع مقدار الضغط المعطى، ليدل على أنه مطلق وليس مقياسًا.

وإنه لمن الضروري استخدام الضغط المطلق في غالبية المسائل ذات العلاقة بقوانين الديناميكا الحرارية، لأن معظم الخواص الحرارية هي دالة في الضغط المطلق للمائع، بغض النظر عن الضغط الجوي الموضعي. وعلى سبيل الذكر لا الحصر، فإن التعامل مع معادلة الحالة للغاز المثالي؛ $p = \rho RT$، يوجب استخدام الضغط المطلق فيها.

ضغط البخار[1]

بالإشارة إلى سلوك جزيئات السائل عند السطح الحر وما تتميز به من حركة دائمة، فإن بعض هذه الجزيئات المسرعة نسبيًا تتحرر من الحالة السائلة لتصبح مع الغاز أعلى السطح الحر. وفي المقابل، فإن بعض الجزيئات الموجودة في المجال الغازي فوق السطح الحر يمكن أن تسرع اتجاه السطح وتنغمس فيه وتجد نفسها محبوسة في الحالة السائلة. ويتحقق اتزان هذه المنظومة عندما تبقى كمية السائل ثابتة؛ أي عندما يكون معدل تحرر الجزيئات من السطح الحر يعادل تمامًا معدل انغماس الجزيئات في السائل.

وبتواجد الهواء فوق السطح الحر للسائل، فإن الاتزان سيشمل الخليط بين جزيئات الهواء وجزيئات بخار السائل أعلى السطح الحر. وعندها يكون ضغط الخليط فوق السطح الحر مكونًا من ضغط الهواء الجزئي إضافة لضغط البخار الجزئي، وذلك انطلاقًا من قانون "دالتون"[2] للضغوط الجزئية. وعندما يتحقق الاتزان، فإن السائل والهواء والبخار ثلاثتها عند نفس درجة الحرارة. وهنا فإن الضغط الجزئي[3] للبخار هو ما يعنى به "ضغط البخار" عند درجة الحرارة المعطاة.

وبتعبير آخر، فإن ضغط البخار للسائل هو الضغط الذي يتحول عنده السائل إلى بخار. ويعتمد ضغط البخار (أو ضغط التشبع) على درجة حرارة التشبع كما عرفنا في علم الديناميكا الحرارية، حيث يزداد الضغط مع ارتفاع درجة الحرارة وبالعكس. وكلنا نعرف، أنه عند تسخين الماء السائل تحت ضغط الهواء الجوي (101.35 kPa)، فإن السائل يتحول إلى بخار عند درجة حرارة 100°C وهي التي تعرف بدرجة حرارة غليان الماء تحت الضغط المذكور. أما إذا قل الضغط فوق سطح الماء عن الضغط الجوي المشار إليه، فإن درجة غليانه تهبط إلى ما تحت درجة 100°C؛ وفي المقابل يمكن أن يغلي الماء في درجة حرارة أعلى من 100°C إذا تعرض لضغط أعلى من الضغط الجوي المذكور.

قياس الضغط

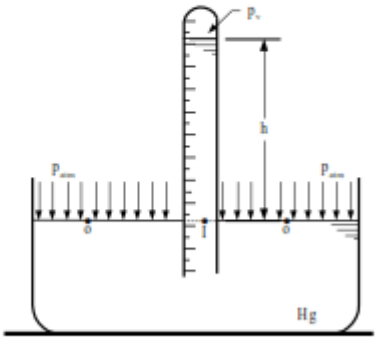
نحتاج في هذه المرحلة إلى معرفة كيفية قياس مقدار الضغط الناتج من تأثير وجود الموائع، سواء ساكنة كانت أم متحركة، على أن ما يهمنا هنا، هو "الضغط الاستاتيكي"1. يصاحب هذا الضغط كافة التطبيقات الهندسية اليومية ذات الصلة بالموائع، متمثلة في كل منظومات نقل الموائع وتوزيعها وتخزينها من بينها على سبيل المثال، المنظومات المتعلقة بنقل المياه وتوزيعها وتخزينها، والمنظومات ذات العلاقة بمشاريع الغاز، والمنظومات الخاصة بإنتاج النفط وصناعته. وتعتمد معظم طرق قياس الضغط على المفاهيم الأساسية والعلاقات المدروسة في البند السابق، وعلى رأسها ما جاء به العالم باسكال؛ من أن الضغط ثابت في كل النقاط على أي مستوى أفقي مادام المائع واحدًا متصلاً ببعضه، وأن الضغط عند أي نقطة في المائع يتناسب مع عمق هذه النقطة في الوسط المائع.

البارومتر

يبين الشكل (7.3) جهاز البارومتر الذي يعتمد عليه في قياس الضغط الجوي بوحدات ضغط مطلقة، ويتكون من أنبوبة نظيفة مدرجة مقفولة من أحد طرفيها، وحوض به كمية كافية من الزئبق. وقد تم اختراعه على يد العالم الإيطالي تورشيللي4 في عام 1643م.

يعادل الضغط الجوي القياسي عمودًا من الزئبق ارتفاعه؛

h = 760 mm (Hg)



ش (7.3) البارومتر

تملأ الأنبوبة بالكامل بالزئبق دون ترك أي فقاعات هوائية، وتقلب في الحوض بحيث يغرس طرفها المفتوح في حوض الزئبق، وتترك رأسيًا ليستقر الزئبق فيها عند ارتفاع معين. وتكون الأنبوبة ذات طول ليس بالقصير فتبقى الأنبوبة مملوءة بالكامل، وليس بالطويل حتى لا يكون الفراغ كبيرًا ودون حاجة لذلك، ومن المعتاد أن يكون في حدود 900 mm.

انطلاقًا من قاعدة باسكال، فإن الضغط على امتداد السطح الحر للزئبق في الحوض عند النقطة "o"، والناتج من الضغط الجوي، يساوي الضغط داخل الأنبوبة عند النقطة "i" على نفس المستوى؛ أي أن؛

$$p_{atm} = p_o = p_i$$

الضغط الجوي = الضغط عند النقطة o = الضغط عند النقطة i

ومن هنا يمكن معرفة مقدار الضغط الجوي بحساب وزن عمود الزئبق إضافة إلى مقدار ضغط بخار الزئبق المتكون في نهاية العمود، على النحو التالي؛

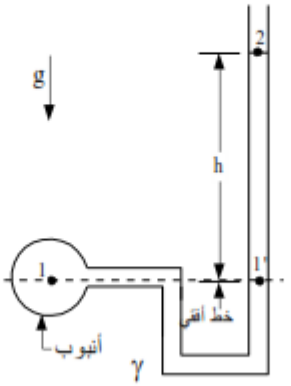
$$p_{atm} = p_i = \rho_{Hg} gh + p_v$$

وبالرغم من أن ضغط بخار الزئبق هو دالة في درجة الحرارة، فهو صغير جدًا عند درجات الحرارة للجو المعتاد، فهو يساوي 0.16 Pa عند درجة الحرارة 20°C، في حين أن الضغط الجوي في حدود 100,000 Pa، ولذلك فهناك معطيات قوية لتبرير إهمال ضغط بخار الزئبق هذا. وضغط البخار المنخفض للزئبق المتمشي مع كثافته العالية جعلت منه سائلاً مناسبًا جدًا للاستعمال في أجهزة البارومترات والمانومترات. وعلى هذا يمكن تحديد الضغط الجوي بالدقة الكافية لمعظم التطبيقات الهندسية، على أنه دالة في طبيعة الموقع وحالة الجو حينها، بالتطبيق في العلاقة السابقة التي أصبحت كالتالي؛

$$p_{atm} = \rho_{Hg} gh \qquad (17.3)$$

المانومترات

تعتبر المانومترات من أشهر المقاييس المستخدمة لقياس فرق الضغط باستخدام أعمدة السوائل وما يتعلق بها من تطبيق للقواعد الأساسية للموائع الساكنة. ونتعرض هنا، إلى عدد من أشكال هذه المقاييس لإيضاح استخداماتها وطريقة القيام بالحسابات المصاحبة لكل منها بصورة مبسطة قدر الإمكان.



ش (8.3) مانومتر بنفس المائع المراد قياس ضغطه.

المانومتر U. يبين الشكل (8.3) المانومتر U وقد أتت تسميته من شكله الذي يطابق شكل الحرف الوارد U. يستخدم هذا المانومتر لقياس الضغوط الصغيرة نسبيا. ويمكن وصل هذا المانومتر بالنقطة أو المقطع المراد عنده قياس الضغط في خزانات أو خطوط أنابيب على سبيل المثال. بمجرد ما تتم عملية الوصل حيث النقطة 1، يرتفع (أو ينخفض) السائل في الساق المفتوحة والمدرجة عادة ليستقر عند النقطة 2. وبأخذ المستوى الأفقي المار بالنقطة 1 لتقابل النقطة 1'، ونظرًا لأن المائع واحد ومتصل بين النقطتين1 و1' وعلى نفس المستوى الأفقي، فإن الضغط متساو في كل النقاط على هذا المستوى، ولذلك فإن:

$$p_1 = p_{1'}$$
$$= \rho g h + p_2$$

والمعتاد هنا، هو أن المانومتر مفتوح للهواء الجوي، أي أن p_2 هو الضغط الجوي الموضعي، ولذلك إذا كان المستهدف هو الضغط المطلق عند النقطة 1، فإن:

$$p_1 = \rho g h + p_{atm}$$

أما إذا كان ضغط المقياس هو المطلوب عند النقطة 1، وباعتبار أن $p_2=0$ (مقياسًا)، فإن؛

$$p_1 = \rho g h = \rho h \qquad (18.3)$$

يوضح الشكل (9.3) مانومترًا يستخدم لقياس الضغوط المتوسطة والصغيرة، لأننا نستطيع اختيار سائل القياس بحيث يكون وزنه النوعي مناسبًا لمقدار الضغط. وكثيرًا ما يؤخذ الزئبق لقياس ضغط الماء ويؤخذ الماء لقياس ضغط الهواء. وباتباع نفس الأسلوب السابق، يمكن تعيين الضغط عند النقطة 1 باستخدام المستوى الأفقي المار في نفس المائع المتواصل على النحو التالي:

$$p_2 = p_{2'}$$

حيث إن؛

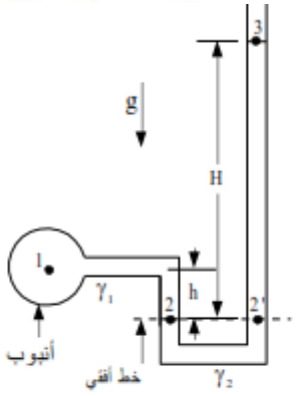
$$p_2 = \gamma_1 h + p_1$$
$$p_{2'} = \gamma_2 H + p_3$$

وبالتعويض في المعادلة الأولى، نجد أن؛

$$\gamma_1 h + p_1 = \gamma_2 H + p_3$$
$$\therefore \quad p_1 \quad = \gamma_2 H - \gamma_1 h + p_3$$

وبما أن الضغط الجوي $p_3=0(gage)$، فإن ضغط المقياس؛

$$p_1 = \gamma_2 H - \gamma_1 h \qquad (19.3)$$



ش (9.3) مانومتر بمائع يختلف عن المائع المراد قياس ضغطه.

المانومتر المائل. لقد أدخلت العديد من التحويرات على المانومترات لتفي بأغراض معينة. فمن هذه التحويرات جعل ساق المانومتر مائلة بزاوية على الأفقي بحيث يكون هناك تكبيرًا لتدريج الضغط؛ أي أننا سنقرأ العمود على مسافة أطول مقارنة بما نقرأه على تدريج الساق الرأسية. هذا يزيدنا مرونة في القراءة ويقلل نسبة خطأنا في القراءة وهو ما يمثل زيادة دقة المانومتر. وهنا نجد أنه كلما قلت زاوية الميل، ازداد عمود السائل طولاً، ولكن إلى حدٍ ما لأنه عندما تكون الزاوية صغيرة (أقل من 5^o)، فإن القراءة تصبح غير مرضية، وذلك لأنه من الصعب تحديد نهاية سطح السائل داخل الساق، خصوصًا في وجود زيادة في قيمة التوتر السطحي الناتج عن نقص مستوى نظافة الأنابيب، الأمر الذي يؤثر على دقة الجهاز المتوخاة، ناهيك عن زيادة صعوبة ضبط الزوايا الصغيرة لتثبيت المانومتر في الموضع المناسب.

خواص بعض السوائل عند الضغط الجوي ($T \cong 16\text{-}21^{o}C$)

المائل المتداول	الوزن النوعي γ N/m^3	الكثافة ρ kg/m^3	التوتر السطحي σ N/m	ضغط البخار kPa
كحول	7,744	789	0.022	-
بانزين	8,828	902	0.029	10.3
ثالث كلوريد الكربون	15,629	1,593	0.026	86.2
جازولين	6,660	680	-	-
جيليسرين	12,346	1,258	0.063	$1.4x10^{-5}$
كيروسين	7,933	809	0.025	-
زئبق	132,800	13,550	0.467	$1.59x10^{-4}$
زيت SAE 10	9,016	917	0.036	-
زيت SAE 30	9,016	917	0.035	-
ترينتين	8,529	871	0.026	$5.31x10^{-2}$
ماء	9,790	998	0.073	2.34

قيم التوتر السطحي هي عند التلامس مع الهواء.