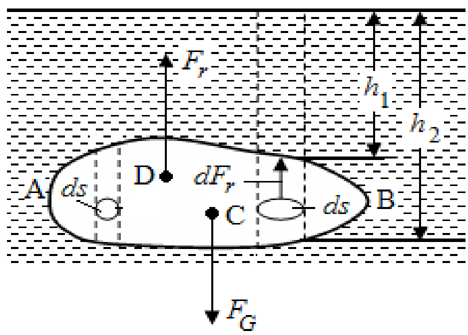
قوة الرفع الهيدروستاتيكية (*Hydrostatic Buoyant Force*) أو دافعة أرخميدس (*Archimedes' Principle*).

ليكن الجسم الصلب (A – B) مغموراً (*Submerged*) في سائل وزنه النوعي (γ)-الشكل (2.33)-، نقتطع منه إسطوانه شاقولية مساحة مقطعها (ds)، حيث يلاحظ أنها تخضع من الأعلى لتأثير ثقل إسطوانة السائل التي تساوي ($\gamma \cdot h_1 ds$)، ومن الأسفل لتأثير ثقل إسطوانة السائل التي تساوي ($\gamma \cdot h_2 ds$).



الشكل (2.33)، قوة الرفع الهيدروستاتيكية (دافعة أرخميدس)

F_G : وزن الجسم الصلب، C : مركز ثقل الجسم الصلب، D : مركز ثقل الحجم المزاح.

وبالتالي فإن إسطوانة الجسم الصلب ستتعرض لقوى دفع من الأسفل قيمتها:

$$dF_r = (h_2 - h_1) \cdot \gamma \cdot ds \qquad (2.104)$$

ويشكل مجموع قوى الدفع على كافة الإسطوانات التي يتألف منها الجسم الصلب قوة الدفع الكلية (F_r) التي تحاول رفع الجسم إلى الأعلى:

$$F_r = (h_2 - h_1) \cdot \gamma \cdot S = \gamma \cdot \mathrm{V} \qquad (2.105)$$

حيث إنَّ:

F_r : قوة الرفع الهيدروستاتيكية أو قوة الطفو (*Floatation Force*) كما تدعى دافعة أرخميدس.

V : حجم السائل المزاح.

وعليه يمكن البرهان بشكل مماثل على أن هذه القوة تؤثر أيضاً على الأجسام المغمورة جزئياً، حيث يكون:

$$F_r = \gamma \cdot V' \qquad (2.106)$$

حيث إنَّ V' : الحجم الجزئي المزاح من قبل الجسم.

وبناءً على ماسبق يمكن صياغة النتيجة التالية:

"قوة الرفع الهيدروستاتيكية (دافعة أرخميدس) التي تتلقاها الأجسام المغمورة كلياً أو جزئياً في السوائل الساكنة تساوي وزن السائل المزاح، وهي تؤثر شاقولياً (***Vertical***) للأعلى وتمر من مركز ثقل الحجم المزاح".

في الحالة العامة لاينطبق مركز ثقل الجسم (C) على مركز ثقل الحجم المزاح (D) وعلى هذا فإن كل جسم مغمور في السائل يتعرض لنقص ظاهري في وزنه بمقدار دافعة أرخميدس. فإذا كان وزن الجسم في الهواء (F_G)، ووزنه النوعي (γ_k)، فيصبح وزنه الظاهري بعد غمره في السائل وبفرض ($\gamma < \gamma_k$):

$$F'_G = F_G - F_r \qquad (2.107)$$

واعتماداً على هذه العلاقة يمكن تعيين (γ_k) للجسم الصلب بعد قياس (F'_G):

$$F'_G = F_G - \gamma \cdot \frac{F_G}{\gamma_k}$$

وبالتالي:

$$F_G - F'_G = \gamma \frac{F_G}{\gamma_k}$$

ومنه:

$$\gamma_k = \frac{\gamma \cdot F_G}{F_G - F'_G} \qquad (2.108)$$

وعلى هذا الأساس صمّمت مقاييس كثافة الوزن النوعي للأجسام الصلبة المتجانسة، كما تطورت أسس صناعة المناطيد ووسائط النقل البحرية اعتماداً على دافعة أرخميدس.

- **شرط التوازن المستقر للأجسام الطافية** (*Stability Considerations For Bodies in Floatoation*):

نفرض جسماً شكله على غير تعيين يطفو على السطح الحر لسائل وزنه النوعي (γ)، فإذا كان هذا الجسم في حالة توازن، فيجب أن تكون محصلة القوى المؤثرة عليه، وهي قوة الثقالة (F_G) الشاقولية للأسفل، ودافعة أرخميدس الشاقولية للأعلى، معدومة، أي أن يتحقق:

$$F_r = F_G = \gamma \cdot \mathrm{V}$$

حيث V : حجم السائل المزاح. غير أن (F_G) تؤثر في مركز ثقل الجسم C (*Center of Gravity*) بينما تؤثر (F_r) في مركز ثقل الحجم المزاح D (*Center of Buoyancy*)، وهما نقطتان مختلفتان عادةً، يطلق على الخط الواصل بينهما محور الطفو (*Axis of Floatation*)، وعليه فإنه مع تحقيق الشرط السابق يمكن أن تشكل القوتان (F_G) و(F_r) مزدوجة (*Torque*) تحاول تدوير (*Rotation*) الجسم. وحتى لايحدث ذلك يجب أن تكون هاتان القوتان على منحى شاقولي واحد، ونتيجة لذلك يمكن صياغة مايلي:

"إن الشرط اللازم والكافي لتوازن جسم طافٍ مغمور جزئياً أو كلياً يتطلب أن تكون دافعة أرخميدس مساوية لوزن الجسم وأن يكون محور الطفو شاقولياً".

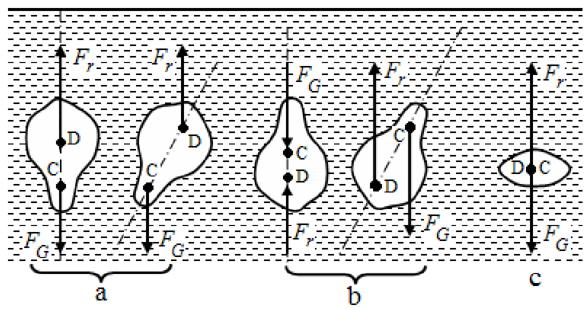
وبشكل عام يمكن تمييز الحالات الثلاث التالية:

- $F_r = F_G$: حيث يطفو الجسم مع انغماسه داخل السائل.
- $F_r > F_G$: يطفو الجسم على سطح السائل.
- $F_r < F_G$: حيث يغرق الجسم.

– الحالة الأولى: $F_r = F_G$ ، في هذه الحالة يمكن التمييز بين الحالات التالية: (لاحظ الشكل (2.34)):

- توازن مستقر للجسم –*Stabile Equilibrium*– (الشكل 2.34.a).

- توازن غير مستقر للجسم –*Unstable Equilibrium*– (الشكل 2.34.b).
- توازن كيفي –*Indifferent Equilibrium*– (الشكل 2.34.c).

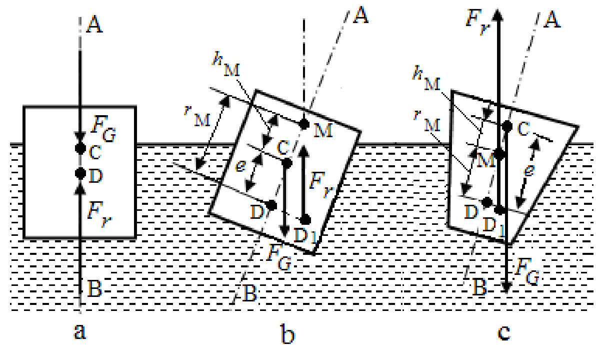


الشكل (2.34)، طفو الجسم في حالة انغماره الكامل.

– **الحالة الثانية:** $F_r > F_G$ ، في هذه الحالة سوف يطفو الجسم مع بقاء جزئه السفلي مغموراً داخل السائل (الشكل 2.35.a) وبشكل يتحقق الشرط:

$$F_G = F_r' \qquad (2.109)$$

حيث F_r' : وزن السائل المزاح.



الشكل (2.35)، طفو زورق مغمور جزئياً بالسائل.

من الشكل (2.35) يلاحظ مايلي:

الحالة a : وضعية التوازن، الحالة b : وضعية مستقرة، الحالة c : وضعية غير مستقرة، حيث إنَّ:

D_1 : مركز ثقل الحجم المزاح بعد جنوح الزورق.

M : نقطة تقاطع محور الطفو مع الشاقول.

C : مركز ثقل الزورق.

D : مركز ثقل الحجم المزاح في حالة توازن الزورق.

نستعرض الحالة التي تكون فيها النقطة (C) –مركز ثقل الجسم الطافي– أعلى من النقطة (D) –مركز ثقل الحجم المزاح– في هذه الحالة وبخلاف الشكل (2.34.b) يمكن الحصول على توازن مستقر وآخر غير مستقر. نناقش هذه الحالة على زورق عائم في مياه ساكنة (الشكل 2.35) حيث يطلق على مستوي تقاطع السطح السائب للسائل مع الجسم بمستوي الطفو ويسمى مقطع الجسم الواقع في هذا المستوي بسطح الطفو أو سطح خطوط الماء، كما يطلق على الارتفاع الشاقولي للجزء المغمور بعمق الغاطس أو اختصاراً بالغاطس.

عندما يزداد الغاطس بإزاحة الجسم شاقولياً نحو الأسفل فإن حجم السائل المزاح سوف يزداد وتزداد بالتالي دافعة أرخميدس وهذا مايؤدي إلى عودة الجسم لوضعية توازنه.

بمقارنة الرسوم (c) و(b) على الشكل (2.35) يمكن ملاحظة مايلي:

1– يلاحظ على الرسم (b) أن مركز ثقل الحجم المزاح عند جنوح الزورق ينتقل من النقطة (D) إلى النقطة (D_1) التي تقع على يمين النقطة (C) الأمر الذي يؤدي إلى نشوء مزدوجة تدعى مزدوجة التصحيح (*Restoring Torque*) التي تسعى لإعادة الجسم (الزورق) إلى وضعية توازنه الأصلية، ويتحقق بالتالي شرط الطفو المستقر.

نمدد خط تأثير (F_r) فيلتقي مع محور الطفو في النقطة (M) التي يطلق عليها اسم مركز الطفو المستنتج ويسمى البعد بينها وبين مركز ثقل الجسم ($\overline{\mathrm{MC}} = h_{\mathrm{M}}$) بارتفاع مركز الطفو المستنتج، تتصف هذه الحالة بأن النقطة (M) أعلى من النقطة (C).

2– على الرسم (c) يلاحظ أن النقطة (D_1) عند جنوح الزورق تقع على يسار النقطة (C) وبالتالي فإن المزدوجة الناتجة تحاول زيادة الجنوح حيث أن وضعية الطفو تكون قلقة ويمكن أن تؤدي في النهاية إلى أن ينقلب الزورق، تتصف هذه الحالة بأن النقطة (M) أخفض من النقطة (C).

إذا اعتبرنا أن ($\overline{CM} = h_M$) ارتفاع مركز الطفو المستنتج (*Metacentric Height*)، وأن ($\overline{DC} = e$) البعد بين مركز ثقل الجسم ومركز ثقل الحجم المزاح (V) يكون لدينا نصف قطر الطفو (r_M).

$$\overline{DM} = r_M = e + h_M \qquad (2.110)$$

يكون ارتفاع مركز الطفو (h_M) موجباً عندما تكون النقطة (M) أعلى من النقطة (C) –الشكل (2.35.b)–، وأما عكس ذلك فتكون قيمة (h_M) سالبة (الشكل (2.35.c)).

اعتماداً على ماسبق يمكن كتابة النتيجة التالية: "يتحقق شرط التوازن المستقر للأجسام الطافية عندما يكون مركز الطفو المستنتج أعلى من مركز ثقل الجسم ($h_M > 0$)، ويكون التوازن قلقاً عندما يكون ($h_M < 0$).

فإذا اعتبرنا أن (J) عزم عطالة سطح الطفو (A) بالنسبة للمحور المار من مركز ثقل السطح، وحيث إنَّ ($r_M = const$) يمكن كتابة العلاقة التالية:

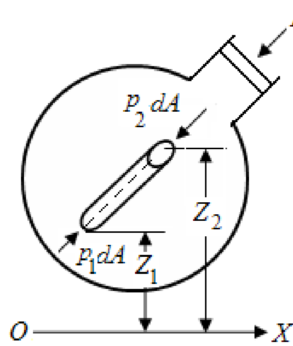
$$r_M = \frac{J}{V} \qquad (2.111)$$

حيث V : حجم السائل المزاح.

وبصورة عامة فإن التوازن المستقر للأجسام الطافية يحدده شكل الجسم وتوزع الكتل فيه، وكلما كان مركز ثقل الجسم أكثر انخفاضاً كلما كان الجسم أكثر استقراراً وأمكن للجسم تحمل زوايا دوران أكبر دون أن ينقلب.

2.12- قانون باسكال (*Pascal's Law*) وتطبيقاته:

عندما يتعرض السائل لضغوط عالية يمكن بالتالي إهمال قوة الثقالة بالمقارنة مع تلك الضغوط. فلو كان لدينا وعاء يمتلئ بسائل ساكن حجمه ثابت (الشكل (2.26)) يتلقى الضغط عبر المكبس الجانبي المبين في الشكل.



الشكل (2.36).

نختار داخل السائل إسطوانة صغيرة سطح كل من قاعدتيها (dA) ويقع مركزاهما على ارتفاع (Z_1) و(Z_2) عن المحور (OX).

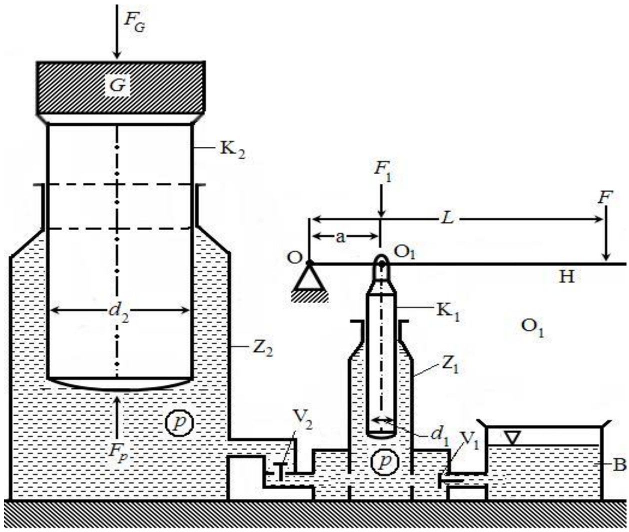
فإذا اعتبرنا أن الضغط المؤثر على قاعدتي الإسطوانة (p_1) و(p_2) وطبقنا شروط توازن القوى حول محور الإسطوانة ينتج لدينا مع ملاحظة أن مساقط جميع القوى العمودية على قميص الإسطوانة تساوي الصفر:

$$p_1 \cdot dA = p_2 \cdot dA \Rightarrow p_1 = p_2$$

وبما أن اختيار وضعية الإسطوانة كان على غير تعيين، فيمكن تعميم النتيجة السابقة: "عندما لاتؤثر على سائل متوازن قوة الثقالة أو أية قوة حجمية أخرى فإن الضغط في كافة نقاط السائل وفي كل الاتجاهات تكون له نفس القيمة الثابتة.

- المكبس الهيدروليكي:

يتألف المكبس الهيدروليكي من مكبس (K_1) صغير المقطع قطره (d_1) ويغلق بإحكام الإسطوانة (Z_1)، ومن مكبس (K_2) كبير المقطع قطره (d_2) ويغلق بإحكام الإسطوانة (Z_2).



الشكل (2.37)، المكبس الهيدروليكي.

عندما نؤثر بقوة (F) على الذراع (H) المتصل مع (K_1) في النقطة (O_1) والمتمفصل في (O) بحيث يرتفع (K_1) للأعلى، ينفتح الصمام (V_1) ويتسرب السائل من الوعاء (B) إلى الإسطوانة (Z_1) وينغلق الصمام (V_2)-صمام الدفع-، وعندما نضغط (K_1) للأسفل يغلق (V_1) وينفتح (V_2) ويتسرب السائل من (Z_1) إلى (Z_2) ويرتفع (K_2) للأعلى وهكذا. وحيث إنَّ الضغوط المتولدة في (Z_1) و(Z_2) عالية فإنه حسب قانون باسكال يكون الضغط فيها ذات قيمة ثابته (p).

بفرض أن القوة المؤثرة على الذراع (H) هي (F) وأنه يجب على المكبس (K_2) أن يرفع الحمل (G) الذي وزنه (F_G). فإذا طبقنا قانون العزوم حول (O) ينتج أن القوة المؤثرة على (K_1) في النقطة (O_1) تساوي:

$$F \cdot L + F_1 \cdot a = 0$$

ومنه:

$$F_1 = \frac{F \cdot L}{a}$$

وينتج الضغط المؤثر في (Z_1) باعتبار (S_1) مساحة مقطع المكبس (K_1):

$$p = \frac{F_1}{S_1} = \frac{F \cdot L}{a \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}}$$

وتكون قوة الضغط المؤثرة على المكبس (K_2) على اعتبار (S_2) مساحة مقطعه:

$$F_p = p \cdot S_2 = \frac{F \cdot L}{a} (\frac{d_2}{d_1})^2$$

وبالتالي باختيار نسبة الأقطار ($\frac{d_1}{d_2}$) ونسبة الأطوال ($\frac{a}{L}$) يمكن الحصول على قوة كبيرة بتطبيق قوة صغيرة.

مثال: $\frac{d_1}{d_2} = \frac{1}{5}$ ؛ $\frac{a}{L} = \frac{1}{5}$

ويكون:

$$F_p = \frac{F \cdot 5}{1} (5)^2 = F \cdot 125 \Rightarrow \frac{F_p}{F} = 125$$

أي أنه يلزم لرفع ($125\,Kp$) أن نطبق قوة مقدارها ($1Kp$).