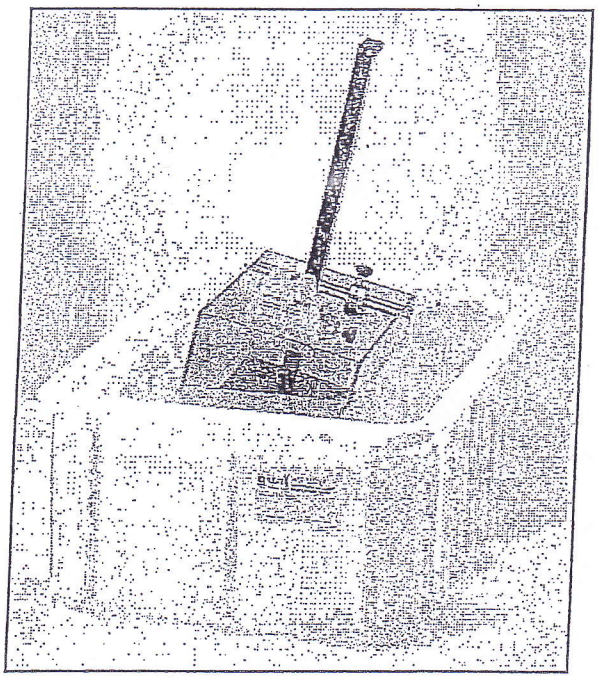
تجربة رقم
(3)

استقرارية الأجسام الطافية

Stability of a Floating Body



تجربة رقم (3)

استقرارية الأجسام الطافية

Stability of a Floating Body

✓ مقدمة

يُعتبر مفهوم استقرارية الأجسام الطافية في الماء وآلية التحكم بها من المتطلبات الأساسية في تطبيقات الملاحة والإبحار. ويُعد العالم أرخميدس أول من صاغ قانوناً لمفهوم الطفو في السوائل، حيث بيّن أن قوة الطفو تساوي وزن السائل المزاح. كما درس حالة الاستقرارية لطفو جسم بشكل قطع مكافئ متزن مع ميل قاعدته عن سطح الماء. ولا يزال المصمّمون حتى وقتنا الحاضر يعتمدون مفهوم أرخميدس للطفو والاستقرارية في تصميم القوارب والسفن، والرافعات الطافية (Floating Cranes)، وعوامات الجسور، والمحطات النفطية العائمة (Oilrigs).

إن إيجاد وتحديد قيمة ما يُدعى بالمركز الفوقي (Metacentre) يُعد من الدلائل المهمة والعوامل المؤثرة على استقرارية الأجسام الطافية، حيث أنه بالاعتماد على هذه القيمة تتم دراسة تصاميم استقرارية السفن وهي تتعرض للموجات البحرية.

✓ الغرض من التجربة

يتمثل الهدف من التجربة فيما يأتي:

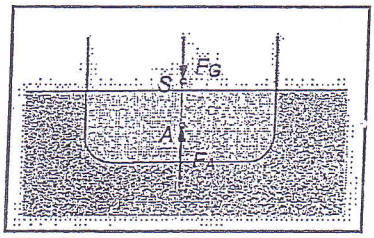
1. دراسة استقرارية عوامة مستطيلة الشكل تطفو فوق الماء في حالات تمايل مختلفة.
2. قياس زاوية التمايل مع حالات مختلفة لموقع مركز ثقل الجسم الطافي (العوامة).
3. تحديد وإيجاد قيمة ارتفاع المركز الفوقي، وملاحظة الظروف التي تجعل الجسم الطافي غير مستقر.
4. حساب قوة الطفو.

وعموماً فإن جهاز التجربة يوفر ملاحظة ودراسة المبادئ التالية:

- مركز الثقل (Center of Gravity)
- مركز الطفو (Center of Buoyancy)
- موقع المركز الفوقي (Metacentre)
- زاوية التمايل (Angle of Heeling)
- قوة الطفو (Buoyancy Force)

✓ نظرية التجربة

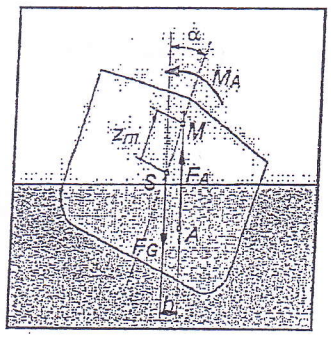
1.3 طفو الأجسام



من الممكن أن يطفو جسم ما فوق سائل معين إذا كان مقدار قوة الطفو (F_A) لذلك الجسم (عند غمره كلياً) أكبر من وزنه. أو بتعبير آخر فإن الجسم سيبقى غارقاً في السائل لحين تساوي مقدار قوة الطفو تماماً مع الوزن الميت (F_G) لذلك الجسم. ويمكن حساب مقدار قوة الطفو عن طريق حساب وزن السائل المزاح بعد غمر الجسم وفق قاعدة أرخميدس.

سيتم تعريف مركز ثقل السائل المزاح (A) على أنه مركز الطفو (Centre of Buoyancy)، والذي ستتركز فيه قوة الطفو (F_A). في حين أن مركز ثقل الجسم (S) (Centre of Gravity) سيمثل مركز تأثير وزن الجسم.

2.3 استقرارية الأجسام الطافية



يمكن أن يطلق مصطلح الاستقرارية (Stability) على الجسم الطافي إذا تحققت الشروط الآتية:

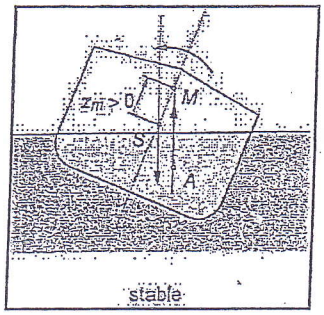
- يجب أن تمتلك قوة الطفو (F_A) ووزن الجسم (F_G) خطاً مشتركاً للتأثير.
- أن تكون القوتان متساويتين بالمقدار ومتعاكستين بالاتجاه.

مع ملاحظة أن الاستقرارية لا تعني بالضرورة وجود مركز الطفو (A) أسفل مركز الثقل (S) تماماً، بمعنى أن خط التأثير المشترك بين القوتين ليس بالضرورة أن يكون عمودياً قائماً.

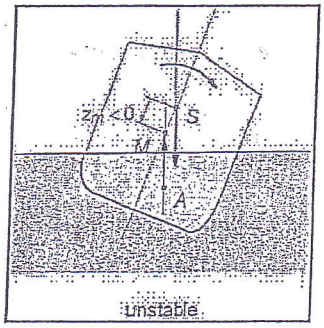
ويجب ملاحظة أهمية مقدار العزم المتولد نتيجة التمايل بزاوية معينة على استقرارية الجسم الطافي. حيث تبعد نقطة تأثير قوة الطفو (المتجهة للأعلى) مسافة (b) عن نقطة مركز ثقل الجسم (المتجهة للأسفل)، مما سيولد عزماً يُدعى عزم التصحيح (Righting Moment). ويمكن اعتبار المسافة الفاصلة بين نقطتي التأثير (b) دالة لاستقرارية الطفو.

يطلق على نقطة تقاطع خط تأثير قوة الطفو مع امتداد خط مركز ثقل الجسم (S) (المائل بزاوية التمايل) بما يسمى المركز الفوقي (Metacentre) ويرمز لها بالحرف (M)، وتسمى المسافة بين مركز الثقل (S) والمركز الفوقي (M) بارتفاع المركز الفوقي (Metacentric height) ويرمز لها (z_m).

ويمكن بيان حالة الاستقرار للجسم الطافي من خلال الشروط التالية:



- **الجسم الطافي المستقر:** تحدث هذه الحالة عندما تكون قيمة ارتفاع المركز الفوقي موجبة ($z_m > 0$)، بمعنى أن يكون المركز الفوقي (M) أعلى من مركز ثقل الجسم (S). كما مبين في الشكل المجاور.

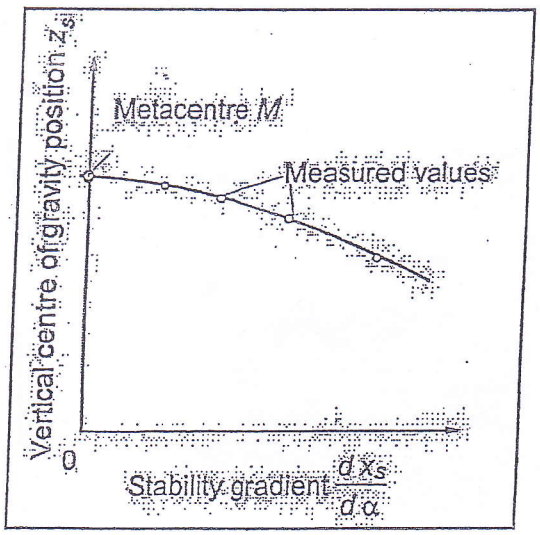


- **الجسم الطافي غير المستقر:** تحدث هذه الحالة عندما تكون قيمة ارتفاع المركز الفوقي سالبة ($z_m < 0$)، بمعنى أن يكون المركز الفوقي (M) أسفل من مركز ثقل الجسم (S) كما مبين في الشكل.

3.3 إيجاد موقع المركز الفوقي

إن موقع المركز الفوقي لا يعتمد بأي حال من الأحوال على موقع مركز الثقل، بل يعتمد على شكل الجزء المغمور للجسم ومقدار الإزاحة للسائل.

إن إزاحة مركز الثقل أفقياً عن موقعه بمسافة معينة (x_s) سيولد عزماً للتمايل. كما إن إزاحة مركز الثقل الشاقولي سيغير من زاوية التمايل (α). وعلى هذا الأساس يمكن رياضياً إيجاد تدرّج (إنحدار) الاستقرارية من خلال المشتقة ($\frac{dx_s}{d\alpha}$). وإن هذا التدرج في الاستقرارية سيتناقص كلما اقترب مركز الجسم الشاقولي (z_s) من موقع المركز الفوقي (M)، فإن تطابق موقع المركز الفوقي مع مركز الثقل كان مقدار التدرج مساوياً للصفر، وحينها يكون الجسم في حالة شبه استقرار (Metastable).



ويمكن توضيح المسألة عن طريق جمع القيم في رسم بياني (كما موضح جانباً). حيث يمثل المحور الأفقي (x-axis) قيم تدرج الاستقرارية ($\frac{dx_s}{d\alpha}$)، أما المحور الشاقولي (y-axis) فيمثل قيم المركز الشاقولي للثقل (z_s).

نرسم المنحني بواسطة النقاط المقاسة، ونمده ليقطع المحور الشاقولي في النقطة ($\frac{dx_s}{d\alpha} = 0$). إن نقطة التقاطع تمثل موقع المركز الفوقي (M).

✓ وصف جهاز التجربة

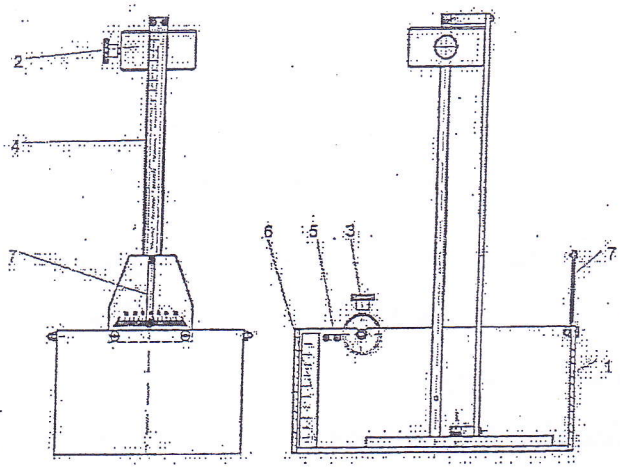
الجزء الأساسي في جهاز التجربة (المبين في المخطط والصورة) عبارة عن عوامة [1] (Pontoon) شفافة مستطيلة بأبعاد (L300 × W200 × H120 mm) تطفو فوق الماء الموجود في خزان يمثل إناء الطفو [8]. تحوي العوامة على الأجزاء الأساسية المتعلقة بقياسات التجربة.

تم اختيار الشكل المستطيل للعوامة ليتناسب مع حامل الثقل المنزلق العمودي [2]، والذي يمكن من خلاله ضبط ارتفاع مركز ثقل العوامة. كما تحوي العوامة على حامل الثقل المنزلق الأفقي [3] والذي يمكن من خلاله توليد عزوم تمايل مختلفة.

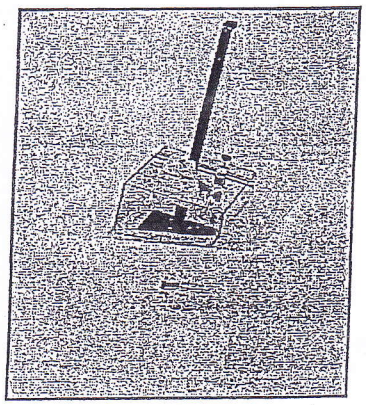
تحوي العوامة بجانب كل منزلق للأثقال على أشرطة مدرّجة [4,5] يمكن من خلالها قراءة وتحديد مواقع الأثقال. كما تحوي على شريط مدرّج لتحديد ارتفاع السائل المزاح [6]، إضافة إلى لوحة مدرجة ومؤشر [7] لقياس زاوية تمايل العوامة بصيغة الدرجة.

لقد تم تصنيع الجهاز ليحمل صفات سهولة الاستخدام وبساطة العمل ووضوح التصميم ليكون ملائماً لإجراء التجارب المختبرية. ويتألف جهاز التجربة من الأجزاء الآتية:

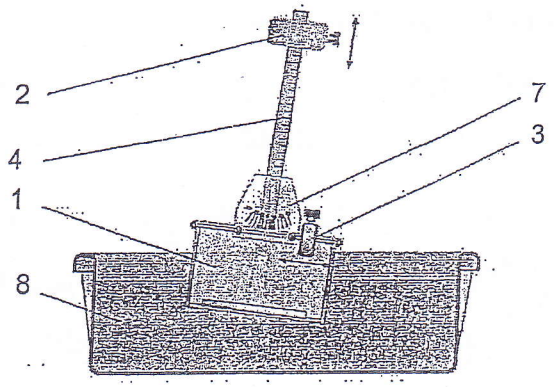
1. العوامة (Pontoon)
2. الثقل المنزلق العمودي (Vertical sliding weight)
3. الثقل المنزلق الأفقي (Horizontal sliding weight)
4. شريط قياس الموقع العمودي (Vertical scale)
5. شريط قياس الموقع الأفقي (Horizontal scale)
6. شريط قياس ارتفاع السائل المزاح (Draught scale)
7. لوحة قياس زاوية التمايل (Heel angle scale)
8. خزان الماء (إناء الطفو) (Water vessel) بسعة (50 lits)



مخطط للعوامة والأجزاء الملحقة



صورة لجهاز التجربة



مخطط لجهاز التجربة

✓ خطوات إجراء التجربة

يمكن إجراء التجربة بإتباع الخطوات التالية:

1. يتم في البداية تثبيت منزلق الثقل الأفقي عند نقطة الصفر من خلال شريط المقياس الخاص به. كما يتم وضع منزلق الثقل الشاقولي في أوطأ نقطة.
2. يتم ملئ خزان الطفو بالماء إلى مستوى معين، وتوضع العوامة فيه كجسم طافي، مع التأكد من أن قيمة زاوية التمايل تساوي صفراً ($\alpha = 0°$) من خلال قراءتها على لوحة القياس الخاصة بها.
3. بعد ذلك يتم ضبط منزلق الثقل الأفقي على موقع معين، وسيتم اختياره ($x = 8$ cm). مع إبقاء المنزلق الشاقولي في موضعه (في أوطأ نقطة)، لأنها تمثل الإزاحة الشاقولية الأولى ($z = 3$ cm).
4. يتم تغيير موقع الوزن الشاقولي ومراقبة وتسجيل زاوية التمايل لكل ارتفاع.
5. تثبت قراءات الارتفاع (z)، وزاوية التمايل (α) لكل مرة، وتُدرج في جدول القراءات.

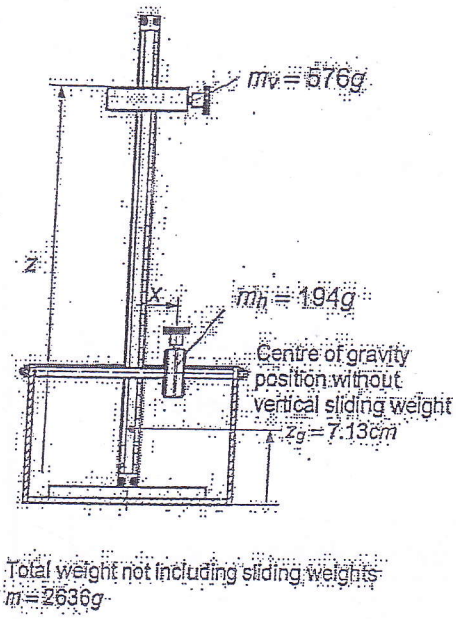
- ملاحظة: يمكن تكرار الخطوات أعلاه لأكثر من موقع أفقي (x) للثقل.

✓ حسابات موقع مركز ثقل الجسم

تشتمل حسابات التجربة بصورة رئيسة على حساب موقع المركز الأفقي (x_s) وموقع المركز الشاقولي (z_s) لوزن الجسم الطافي.

من خلال موازنة العزوم الأفقية حول المحور المركزي الشاقولي للعوامة، نحصل على:

$$(m + m_v + m_h)\, g.x_s = (m_h)\, g.x$$



حيث أن :

m = الكتلة الكلية للعوامة والملحقات باستثناء كتلتي المنزلقين (2636 g)

m_v = كتلة المنزلق الشاقولي (576 g)

m_h = كتلة المنزلق الأفقي (194 g)

g = التعجيل الأرضي = (9.81 m/s²)

x = إزاحة المنزلق الأفقي للثقل.

$$\therefore x_s = \frac{(m_h).x}{(m + m_v + m_h)}$$

وبالتعويض عن قيم الكتل نحصل على المعادلة :

$$x_s = 0.057\,x \qquad \ldots (1)$$

كما أنه بموازنة العزوم حول محور القاعدة السفلية للعوامة:

$$(m + m_v + m_h)\,g.z_s = (m_v)\,g.z + (m + m_h).g.z_g$$

$$\therefore z_s = \frac{(m_v)\,z + (m + m_h)\,z_g}{(m + m_v + m_h)}$$

حيث أن:

z_g = يمثل المسافة من القاعدة السفلية إلى مركز الثقل الشاقولي للكتلة الكلية عدا الكتلة (m_v).

z = إزاحة المنزلق الشاقولي للثقل.

وبالتعويض عن القيم:

$$z_s = 5.924 + 0.169\,z \qquad \ldots (2)$$

أما مقدار التدرج في الإستقرارية فيُحسب من المعادلة:

$$\frac{dx_s}{d\alpha} = \frac{x_s}{\alpha} \qquad \ldots (3)$$

✓ حسابات الطفو

يمكن حساب قوة الطفو (F_A) حسب المعادلة:

$$F_A = V.\rho.g = F_G$$

حيث أن :

V = حجم السائل المزاح، ويساوي مساحة قاعدة العوامة (L300 × W200 mm) مضروباً في ارتفاع السائل المزاح، والذي يمكن تحديده من خلال المقياس رقم [6].

ρ = كثافة الماء = $(1000\ kg/m^3)$

g = التعجيل الأرضي = $(9.81\ m/s^2)$

✓ القراءات والنتائج

يتم إدراج القراءات حسب الجدول أدناه:

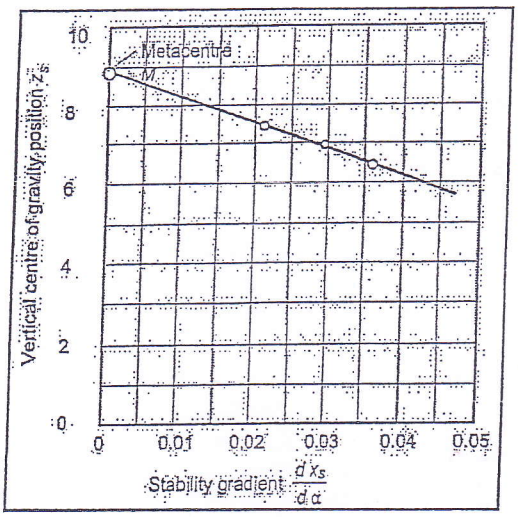
جدول القراءات

Position of Horizontal Sliding Weight ($x = 8$ cm) موقع منزلق الوزن الأفقي				
Height of Vertical Sliding Weight (z)	3 cm	6 cm	9 cm	ارتفاع منزلق الوزن الشاقولي (z)
Angle of Heeling (α) (°)				زاوية التمايل (α) (°)

✓ تحليل القيم والحسابات

يمكن إجراء حسابات التجربة لإيجاد موقع المركز الفوقي باتباع الخطوات التالية:

1. يتم حساب قيمة (x_s) بتعويض قيمة موقع الوزن المنزلق الأفقي ($x = 8$ cm) في المعادلة (1).
2. تحسب قيمة (z_s) من المعادلة (2) لكل مواقع الوزن المنزلق الشاقولي (z) .
3. من خلال قراءة وتحديد قيمة زاوية التميل (α) عملياً، يتم حساب مقدار تدرج الإستقرار ($\frac{dx_s}{d\alpha}$) من المعادلة (3).
4. تُرسم (بيانياً) قيم تدرّج الإستقرارية ($\frac{dx_s}{d\alpha}$) مقابل قيمة (z_s).
5. تحدد نقطة تقاطع المنحني المارّ بالقيم المرسومة مع المحور الشاقولي، والتي تمثل موقع المركز الفوقي (M). كما مبين في المخطط التالي (كمثال):



ويتم إدراج النتائج حسب الجدول الآتي:

جدول النتائج

Horizontal Position of Center of Gravity		$x_s =$ · cm		الموقع الأفقي لمركز الوزن
Height of Vertical Sliding Weight (z)	3 cm	6 cm	9 cm	ارتفاع منزلق الوزن الشاقولي (z)
Angle of Heeling (α) (°)	15	12	22	زاوية التميل (α) (°)
Vertical Position of Center of Gravity (z_s) (cm)				الموقع الشاقولي لمركز الوزن (z_s) (cm)
$\frac{dx_s}{d\alpha}$ (cm/°)				تدرج الاستقرارية (cm/°)
Metacentric Height (cm)	M =			ارتفاع المركز الفوقي (cm)