

☆ بسيطة

الفيزياء، البكالوريا، الفرع العلمي

نؤاس الفتل

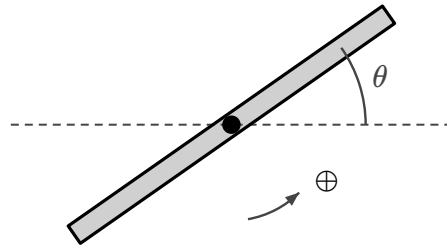
عزم الإرجاع، والحركة الجيبية الدورانية، والدور الخاص وما يتعلّق به
الحركة والتحريك . الوحدة 1 . الدرس 2

في الدرس الأول اهتزاز جسم ذهاباً وإياباً على مستقيم. في هذا الدرس يدور الجسم: ساق معلقة من منتصفها بسلك فتلٍ تدور في مستوى أفقيّ حول السلك ثم تعود. نتابع مع الكتاب في الصفحات 17 إلى 21: من أين يأتي عزم الإرجاع، ولماذا تكون الحركة جيبيةً دورانية، وممّ يتعلّق دورها. وقد جاء نؤاس الفتل المسألة الأولى في خمسٍ من دورات امتحان البكالوريا منذ 2016.

ما نؤاس الفتل؟

يبدأ الكتاب بساعاتٍ تهتزّ فيها كتلةٌ دورانياً بين وضعين متناظرين، ثمّ يعطي أقرب مثالٍ على هذه الحركة: نعلّق ساقاً متجانسةً من منتصفها بسلك فتلٍ فولاذيٍّ شاقوليٍّ ثابت فتله k ، فنحصل على نؤاس الفتل. وعنوان الدرس في الكتاب «نؤاس الفتل غير المُتخامد»: سعة اهتزاز لا تتناقص مع الزمن، وعلى هذا الفرض يقوم الدرس كلّهُ.

وفي التجربة (1) من الصفحة 18 نُدير الساق عن وضع توازنها الأفقيّ بزاوية θ ونتركها دون سرعةٍ ابتدائيةٍ، فتأخذ تهتزّ حول السلك.



نؤاس الفتل من الأعلى: السلك عموديٌّ على الورقة في المنتصف، والساق مُدارةٌ بالزاوية θ عن وضع توازنها المنقّط، و $\oplus$ الجهة الموجبة. الكتاب يرسمه من الجانب، الصفحة 18.

تذكّر: «إنّ الساق المعلقة بسلك الفتل تهتزّ في مستوى أفقيٍّ حول سلك الفتل الشاقوليّ بتأثير عزم مزدوجة الفتل». الكتاب، الصفحة 18.

بأيّ مقدارٍ نصف موضع ساق نّوأس الفتل في لحظةٍ ما؟
| كيف أبدأ؟ الساق لا تنتقل من مكانها، بل تدور حول السلك.

(أ) بالمطال $\bar{\eta}$ ، ويُقدّر بالمتر.

(ب) بالمطال الزاويّ $\bar{\theta}$ ، ويُقدّر بالراديان.

(ج) بطول سلك الفتل.

ب. نعم: الساق تدور، فموضعها زاويةً عن وضع التوازن، وتُقدّر بالراديان.

عزم الإرجاع

تؤثّر في الساق قوّتان خارجيّتان: ثقلها $\vec{w}$ وقوّة توتر السلك $\vec{T}$. حامل كلّ منهما منطبقّ على محور الدوران Δ ، أي على السلك، فعزم كلّ منهما حول هذا المحور معدوم.

وحين نُدير الساق بزاويةٍ $\bar{\theta}$ تنشأ في السلك مزدوجةُ فتلٍ $\vec{\eta}$ تقاوم الفتل وتعمل على إعادة الساق إلى وضع توازنها. عزمها عزمُ إرجاع:

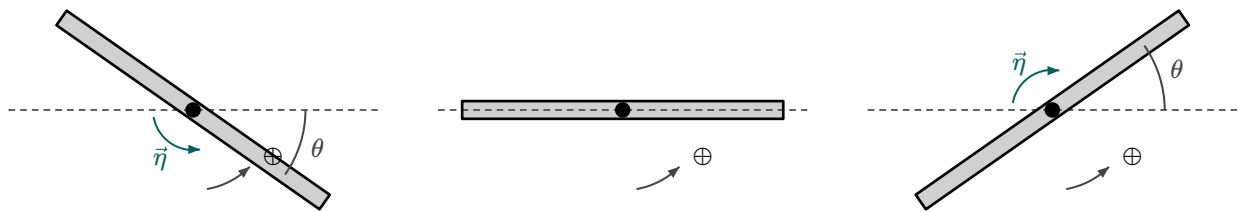
عزم الإرجاع

$\bar{\Gamma}_{\vec{\eta}/\Delta} = -k\bar{\theta}$ يتناسب طردياً مع زاوية الفتل $\bar{\theta}$ ويعاكسها بالإشارة.

$\bar{\Gamma}_{\vec{w}/\Delta} = \bar{\Gamma}_{\vec{T}/\Delta} = 0$ لأنّ حامل كلّ من الثقل وقوّة التوتر منطبقّ على محور الدوران Δ .

الكتاب، الصفحة 18

تابع الساق في ثلاث لحظاتٍ من حركتها، من الأعلى:



3. زاويةٌ سالبة: بعد وضع التوازن تصير $\bar{\theta} < 0$: يعكس عزم الإرجاع إشارته، $\bar{\Gamma} > 0$ ، ويدير الساق من جديدٍ نحو وضع التوازن.

2. وضع التوازن: حين تمرّ الساق بوضع توازنها، $\bar{\theta} = 0$ ، لا يكون السلك مفتولاً فعزم الإرجاع معدوم، وتتابع الساق دورانها في الجهة نفسها.

1. زاويةٌ موجبة: الساق مُدارّة في الجهة الموجبة، $\bar{\theta} > 0$: عزم مزدوجة الفتل $\vec{\eta}$ يديرها في الجهة السالبة نحو وضع التوازن، و $\bar{\Gamma} = -k\bar{\theta} < 0$.

عزم مزدوجة الفتل في ثلاث لحظات، والساق من الأعلى. يعاكس العزم الزاويةً دائماً، فيعيد الساق نحو وضع توازنها.

انتبه: لا تنس الإشارة السالبة في $\bar{\Gamma} = -k\bar{\theta}$. بدونها يدير العزم الساق بعيداً عن وضع توازنها، وسلاالم التصحيح تحاسب على إغفالها.

أي القوى يعيد الساق إلى وضع توازنها؟

| كيف أبدأ؟ قوّة حاملها على محور الدوران لا تدير الجسم حوله.

(أ) الثقل وقوّة توتر السلك.

(ب) الثقل ومزدوجة الفتل معاً.

(ج) مزدوجة الفتل في السلك وحدها.

ج. نعم: الثقل وقوّة التوتر حاملهما على محور الدوران فعزمهما معدوم، ويبقى عزم مزدوجة الفتل $\bar{\Gamma} = -k\bar{\theta}$.

المعادلة التفاضليّة والتابع الزمنيّ

لنعرف نوع الحركة نطبّق على الساق العلاقة الأساسيّة في التحريك الدورانيّ، كما في الكتاب، الصفحتان 18 و19. وإثبات أنّ الحركة جيبيّة انطلاقاً من المعادلة التفاضليّة سؤالٌ يتكرّر في امتحان البكالوريا.

نطبّق العلاقة الأساسيّة في التحريك الدورانيّ (نظرية التسارع الزاويّ) حول محور Δ منطبقٍ على سلك الفتل الشاقوليّ، حيث I_Δ عزم عطالة الساق حول المحور و $\bar{\alpha}$ تسارعها الزاويّ.

$$\sum \bar{\Gamma}_\Delta = I_\Delta \bar{\alpha}$$

1. مجموع العزوم نكتب عزوم القوى الثلاث المؤثّرة في الساق:

$$\bar{\Gamma}_{\vec{w}/\Delta} + \bar{\Gamma}_{\vec{T}/\Delta} + \bar{\Gamma}_{\vec{\eta}/\Delta} = I_\Delta \bar{\alpha}$$

2. العزمان المعدومان عزما الثقل وقوّة التوتر معدومان، وعزم مزدوجة الفتل $-k\bar{\theta}$ ، والتسارع الزاويّ هو المشتقّ الثاني للمطال الزاويّ بالنسبة للزمن:

$$0 + 0 - k\bar{\theta} = I_\Delta (\bar{\theta})''_t$$

3. المعادلة التفاضليّة نقسم الطرفين على I_Δ :

$$(\bar{\theta})''_t = -\frac{k}{I_\Delta} \bar{\theta}$$

4. الحلّ وهي معادلة تفاضليّة من المرتبة الثانية تقبل حلاً جيبيّاً من الشكل:

$$\bar{\theta} = \theta_{\max} \cos(\omega_0 t + \bar{\varphi})$$

5. **التحقّق** نشتقّ مرتين بالنسبة للزمن. المشتقّ الأوّل تابع السرعة الزاويّة $\bar{\omega} = (\bar{\theta})'_t = -\omega_0 \theta_{\max} \sin(\omega_0 t + \bar{\varphi})$ ، والثاني تابع التسارع الزاوي:

$$\begin{aligned} (\bar{\theta})''_t &= -\omega_0^2 \theta_{\max} \cos(\omega_0 t + \bar{\varphi}) \\ (\bar{\theta})''_t &= -\omega_0^2 \bar{\theta} \end{aligned}$$

6. **النبض الخاصّ** بموازنة المعادلتين نجد ما يلي، وهذا ممكّن لأنّ k و I_{Δ} موجبان:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{I_{\Delta}} \implies \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{I_{\Delta}}}$$

حركة نؤاس الفتل جيبيّة دورانيّة، تابعها الزمنيّ من الشكل:

$$\bar{\theta} = \theta_{\max} \cos(\omega_0 t + \bar{\varphi})$$

مقادير التابع الزمنيّ

$\bar{\theta}$ المطال الزاويّ في اللحظة t ، ويُقدّر بالراديان.

$\theta_{\max}$ المطال الزاويّ الأعظمي (السعة الزاويّة)، ويُقدّر بالراديان.

$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{I_{\Delta}}}$ النبض الخاصّ بالحركة، واحدته rad.s^{-1} .

$\bar{\varphi}$ الطور الابتدائيّ للحركة، ويُقدّر بالراديان.

الكتاب، الصفحة 19

والثلاثة الأخيرة $\theta_{\max}$ و ω_0 و $\bar{\varphi}$ ثابتة في أثناء الحركة، فهي ثوابت الحركة، كما سمّي الكتاب نظائرها في الدرس الأوّل، الصفحة 8. أمّا $\bar{\theta}$ فيتغيّر مع الزمن.

انتبه: لا تخلط بين النبض الخاصّ ω_0 والسرعة الزاويّة $\bar{\omega}$. الأوّل ثابت من ثوابت الحركة، والثانية تتغيّر مع الزمن، وأعظم طويلاً لها لحظة المرور بوضع التوازن: $\omega_0 \theta_{\max}$.

نؤاس فتلي عزم عطالته $I_{\Delta} = 5 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ وثابت فتل سلكه $k = 8 \times 10^{-2} \text{ m.N.rad}^{-1}$. ما نبضه الخاص؟

كيف أبدأ؟ ω_0 هو الجذر التربيعي لنسبة ثابت الفتل إلى عزم العطالة.

$$\omega_0 = 4 \text{ rad.s}^{-1} \text{ (أ)}$$

$$\omega_0 = 16 \text{ rad.s}^{-1} \text{ (ب)}$$

$$\omega_0 = 0.25 \text{ rad.s}^{-1} \text{ (ج)}$$

$$\text{أ. نعم: } \omega_0 = \sqrt{\frac{8 \times 10^{-2}}{5 \times 10^{-3}}} = 4 \text{ rad.s}^{-1} \text{ ، أي } \omega_0 = \sqrt{16} = 4 \text{ rad.s}^{-1} .$$

عزم عطالة الكتل النقطيّة

هذه الفقرة إضافةً مثلاً، فليست في هذا الدرس من الكتاب: الدرس يستعمل عزم العطالة I_{Δ} دون أن يقول كيف نحسبه، ومسائله في الصفحتين 23 و 24 تحتاجه لكتلٍ نقطيّةٍ مثبتّةٍ على الساق. أمّا عزم عطالة كتلةٍ نقطيّةٍ واحدةٍ فيأتي في الكتاب لاحقاً، في درس النؤاس الثقلي، الصفحة 29.

كتلةً نقطيّةً m على بعد r من محور الدوران عزم عطالتها حوله $m r^2$. وعزم عطالة جملةٍ حول محورٍ هو مجموع عزوم عطالة أجزائها حول المحور نفسه:

$$I_{\Delta} = \sum m r^2$$

أمّا عزم عطالة الساق نفسها أو القرص فتعطيه المسألة. فإذا ثبتنا كتلتين متساويتين m في طرفي ساقٍ طولها l وعزم عطالتها I ، فكلٌّ منهما على بعد $\frac{l}{2}$ من السلك، وعزم عطالة الجملة:

$$I' = I + 2m \left(\frac{l}{2} \right)^2$$

مثالٌ من عندنا: ساقٌ مهملة الكتلة طولها $l = 50 \text{ cm}$ ، ثبتنا في كلٍّ من طرفيها كتلةً نقطيّةً $m = 80 \text{ g}$ ، وعلّقناها من منتصفها بسلك فتل. احسب عزم عطالة الجملة حول السلك.

$$I_{\Delta} = \sum m r^2$$

1. إلى الواحدات الأساسية نحول $m = 0.08 \text{ kg}$ ، وكلّ كتلة على بعد نصف طول الساق من السلك:

$$r = \frac{l}{2} = 0.25 \text{ m}$$

2. المجموع الساق مهملة الكتلة، فعزم العطالة مجموع عزمي عطالة الكتلتين:

$$I_{\Delta} = 2mr^2 = 2 \times 0.08 \times (0.25)^2$$

$$I_{\Delta} = 1 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$$

الكتلة في طرف الساق على بعد نصف طولها من السلك، لا على بعد طولها كلّ.

$$r = \frac{l}{2}$$

انتبه: ⚠️ خطآن شائعان: أن نأخذ طول الساق كلّ بُعداً للكتلة، والبعد نصفه $\frac{l}{2}$ ؛ وأن ننسى عزم عطالة الساق نفسها حين تُعطى،

$$\text{فعزم عطالة الجملة هو المجموع } I' = I + 2m \left(\frac{l}{2} \right)^2 .$$

ثبتنا في طرفي ساقٍ مهملة الكتلة طولها 40 cm كتلتين نقطيتين، كتلة كلّ منهما 100 g . ما عزم عطالة الجملة حول سلكٍ في منتصف الساق؟

| كيف أبدأ؟ كم تبعد كلّ كتلة عن السلك؟ ثم اجمع عزمي العطالة.

$$\text{أ) } 3.2 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$$

$$\text{ب) } 4 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$$

$$\text{ج) } 8 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$$

ج. نعم: كلّ كتلة على بعد 0.2 m من السلك: $I_{\Delta} = 2 \times 0.1 \times (0.2)^2$ ، أي $I_{\Delta} = 8 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$.

الدور الخاص وما يتعلّق به

من النبض نصل إلى الدور، كما في الكتاب، الصفحة 20:

دور نؤاس الفتل

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad \text{لأن} \quad \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{k}{I_\Delta}}$$

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I_\Delta}{k}} \quad \text{الدور الخاص لنؤاس الفتل.}$$

الكتاب، الصفحة 20

ويصل الكتاب إلى ما يتعلّق به الدور بثلاث تجارب، الصفحتان 19 و20: يغيّر السعة الزاويّة وحدها فلا يتغيّر الدور، ثمّ يثبت على الساق كتلتين نقطيتين متساويتين على بعدين متساويين من السلك فيزداد الدور، ثمّ يجعل طول السلك نصف ما كان عليه فينقص الدور.

تذكّر: «لا تتغيّر قيمة الدور الخاص لنؤاس الفتل بتغيّر السعة الزاويّة للحركة.» الكتاب، الصفحة 19.

ومن العلاقة يستنتج الكتاب في الصفحة 21 أنّ الدور الخاص يتناسب طردياً مع الجذر التربيعي لعزم عطالة جملة النؤاس حول محور الدوران، ويتناسب عكساً مع الجذر التربيعي لثابت فتل السلك.

ملاحظة

$$k = k' \frac{(2r)^4}{l} \quad \text{ثابت يتعلّق بنوع مادّة السلك، و } 2r \text{ قطر السلك، و } l \text{ طوله.}$$

الكتاب، الصفحة 21

وبهذه العلاقة نفهم التجربة (3): من سلكين من المادّة نفسها وبالقطر نفسه، الأطول ثابت فتلّه أصغر، ونصف الطول يعني ضعف ثابت الفتل، فيقلّ الدور. ومثالاً من عندنا يحسب ذلك:

مثالاً من عندنا: نؤاس فتلي دوره الخاص T_{01} . نستبدل بسلكه سلكاً من المادّة نفسها وبالقطر نفسه، طوله ربع طول الأوّل، والساق نفسها. كم يصبح الدور؟

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I_\Delta}{k}}$$

1. ثابت الفتل الجديد الطول في مقام علاقة ثابت الفتل، والمادّة والقطر لم يتغيّرا، فإذا صار الطول ربعه صار ثابت الفتل أربعة أضعافه:

$$l_2 = \frac{l_1}{4} \implies k_2 = 4 k_1$$

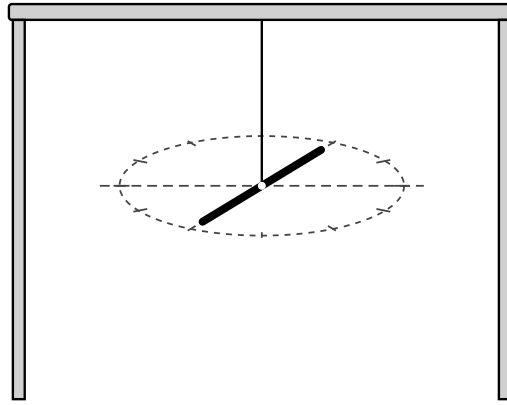
2. الدور الجديد عزم العطالة لم يتغيّر، فالنسبة بين الدورين:

$$\frac{T_{0_2}}{T_{0_1}} = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} = \sqrt{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2}$$

لسلكين من المادّة نفسها وبالقطر نفسه: الأقصر ثابت فتله أكبر، والدور به أصغر؛ وبربع الطول ينقص الدور إلى نصفه.

$$T_{0_2} = \frac{T_{0_1}}{2}$$

وفي المحاكاة أدناه ساق المسألة الثالثة من الكتاب، الصفحة 24: طولها 40 cm وعزم عطالتها $2 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ ، ومعها مقادير التجارب الثلاث: السعة الزاويّة، والكتلتان على الساق، وطول السلك.



نؤاس الفتل في تجارب الكتاب، الصفحتان 19 و20. السعة الزاويّة لا تغيّر الدور الخاصّ، والكتلتان على الساق وطول السلك يغيّران.

انتبه: لا تقلب العلاقة: من سلكين من المادّة نفسها وبالقطر نفسه، الأطول ثابت فتله أصغر، ومع الساق نفسها يكون الدور به أكبر. والسعة الزاويّة لا تغيّر دور نؤاس الفتل.

جعلنا عزم عطالة جملة نؤاس فتلٍ أربعة أضعاف ما كان، والسلك نفسه. كيف يتغيّر دوره الخاصّ؟

| كيف أبدأ؟ الدور يتناسب طردياً مع الجذر التربيعي لعزم العطالة.

(أ) يصبح أربعة أضعاف ما كان.

(ب) يصبح ضعفي ما كان.

(ج) يصبح نصف ما كان.

ب. نعم: الدور يتناسب طردياً مع $\sqrt{I_\Delta}$ ، و $\sqrt{4} = 2$.

التشابه مع النؤاس المرن، ومثالٌ محلول

يقابل الكتاب في الصفحة 21 بين النؤاس المرن ونؤاس الفتل: لكل مقدار في الحركة الجيبية الانسحابية نظير في الحركة الجيبية الدورانية.

التشابه الشكلي

$\bar{\theta} \longleftrightarrow \bar{x}$ المطال في النؤاس المرن، والمطال الزاوي في نؤاس الفتل.

$\bar{\omega} = (\bar{\theta})'_t \longleftrightarrow \bar{v} = (\bar{x})'_t$ السرعة، والسرعة الزاوية.

$\bar{\alpha} = (\bar{\theta})''_t \longleftrightarrow \bar{a} = (\bar{x})''_t$ التسارع، والتسارع الزاوي.

$I_{\Delta} \longleftrightarrow m$ الكتلة، وعزم العطالة.

$\bar{F} \longleftrightarrow \bar{F}$ قوّة الإرجاع بثابت صلابة النابض k ، وعزم الإرجاع بثابت فتل السلك k .

الكتاب، الصفحة 21

الطاقة في نؤاس الفتل

$E_p = \frac{1}{2} k \theta^2$ الطاقة الكامنة المرونية للسلك المفتول.

$E_k = \frac{1}{2} I_{\Delta} \omega^2$ الطاقة الحركية للساق الدوّارة.

$E = \frac{1}{2} k \theta_{\max}^2$ الطاقة الميكانيكية، وهي ثابتة في نؤاس الفتل غير المتخامد: ما تخسره الطاقة الكامنة تكسبه الطاقة الحركية.

الكتاب، الصفحة 21

انتبه: الساق تدور، فطاقاتها الحركية $\frac{1}{2} I_{\Delta} \omega^2$ لا $\frac{1}{2} m v^2$. وثابت الفتل غير ثابت الصلابة وإن حملا الحرف نفسه: الأوّل يجب بعزم على زاوية ووحدته m.N.rad^{-1} ، والثاني يجب بقوّة على استطالة ووحدته N.m^{-1} .

ولا يحلّ الكتاب في هذا الدرس مثلاً واحداً، فهذا مثال من عندنا يجمع الدرس كلّهُ، بالقيمة التقريبية نفسها التي تستعملها مسائل الكتاب والامتحانات: $\pi^2 = 10$.

مثال من عندنا: ساق طولها $l = 60 \text{ cm}$ وعزم عطالتها حول منتصفها $I = 3 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ ، معلّقة من منتصفها بسلك فتل ثابت فتله $k = 0.12 \text{ m.N.rad}^{-1}$ ، وفي كلّ من طرفيها كتلة نقطية $m = 50 \text{ g}$. نُدير الساق بزاوية $\frac{\pi}{6} \text{ rad}$ ونتركها دون سرعة ابتدائية في اللحظة $t = 0$. احسب عزم عطالة الجملة ودورها الخاص، واستنتج التابع الزمني للمطال الزاوي، ثم احسب السرعة الزاوية لحظة المرور الأوّل بوضع التوازن والطاقة الميكانيكية. ثم نزع الكتلتين: كم يصبح الدور؟

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I_{\Delta}}{k}}$$

1. عزم عطالة الجملة كل كتلة على بعد $\frac{l}{2} = 0.3 \text{ m}$ من السلك، و $m = 0.05 \text{ kg}$:

$$I_{\Delta} = I + 2m \left(\frac{l}{2} \right)^2$$

$$I_{\Delta} = 3 \times 10^{-3} + 2 \times 0.05 \times (0.3)^2$$

$$I_{\Delta} = 1.2 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$$

2. الدور الخاص النسبة تحت الجذر $0.1 = \frac{I_{\Delta}}{k} = \frac{1.2 \times 10^{-2}}{0.12}$ ، و $4\pi^2 = 40$:

$$T_0 = 2\pi\sqrt{0.1} = \sqrt{40 \times 0.1} = 2 \text{ s}$$

3. التابع الزمني النبض $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \pi \text{ rad.s}^{-1}$. والساق تبدأ من سعتها الموجبة دون سرعة، ف $\theta_{\max} = \frac{\pi}{6} \text{ rad}$ ، ومن

$$\frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{6} \cos \bar{\varphi} \quad \text{نجد } \bar{\varphi} = 0$$

$$\bar{\theta} = \frac{\pi}{6} \cos(\pi t)$$

4. المرور الأول بوضع التوازن تمر الساق بوضع التوازن أول مرة بعد ربع دور، $t = \frac{T_0}{4} = 0.5 \text{ s}$. نعوض في تابع السرعة الزاوية

$$\bar{\omega} = -\omega_0 \theta_{\max} \sin(\omega_0 t)$$

$$\bar{\omega} = -\pi \times \frac{\pi}{6} \sin \frac{\pi}{2} = -\frac{\pi^2}{6}$$

$$\bar{\omega} = -\frac{10}{6} \approx -1.67 \text{ rad.s}^{-1}$$

5. الطاقة الميكانيكية من السعة الزاوية، وتساويها الطاقة الحركية لحظة المرور بوضع التوازن:

$$E = \frac{1}{2} k \theta_{\max}^2 = \frac{1}{2} \times 0.12 \times \frac{\pi^2}{36}$$

$$E = \frac{1}{60} \approx 1.67 \times 10^{-2} \text{ J}$$

6. بعد نزع الكتلتين يبقى عزم عطالة الساق وحدها، $I = 3 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ ، ربع ماكان، والسلك نفسه:

$$T'_0 = 2\pi\sqrt{\frac{3 \times 10^{-3}}{0.12}}$$

$$T'_0 = \sqrt{40 \times 0.025} = 1 \text{ s}$$

ربع عزم العطالة يعني نصف الدور، لأن الدور يتناسب مع الجذر التربيعي لعزم العطالة.

$$T'_0 = \frac{T_0}{2}$$

أيّ العلاقات تعطي الطاقة الحركيّة لساق نؤاس الفتل؟

| كيف أبدأ؟ الساق لا تنتقل كلّها بسرعةٍ واحدة، بل تدور.

$$E_k = \frac{1}{2} I_{\Delta} \omega^2 \quad (\text{أ})$$

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{ب})$$

$$E_k = \frac{1}{2} k \theta^2 \quad (\text{ج})$$

أ. نعم: الساق تدور، فطاقتها الحركيّة بعزم عطالتها وسرعتها الزاويّة.

المصدر: الفيزياء، الصفحات 17 إلى 21 من الطبعة الرسمية 2025 / 2026.