

☆ بسيطة

الفيزياء، البكالوريا، الفرع العلمي

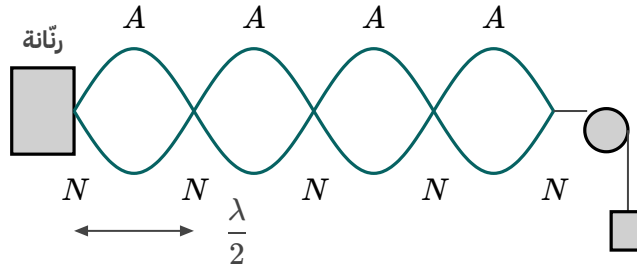
الأمواج المستقرّة العرضيّة: تجربة ملد والدراسة النظرية

موجةٌ واردة وموجةٌ منعكسة على نهايةٍ مقيّدة: فرق الطور، والمطال المحصّل، ومواضع العقد والبطنون
الأمواجُ المُستقرّة . الوحدة 3 . الدرس 1 (1 من 3)

حين يضبط عازف العود أوتاره فهو يغيّر الأمواج التي تستقرّ عليها. موجةٌ تسير على الوتر، تنعكس عند نهايته المقيّدة، فتتداخل مع نفسها: نقاطٌ لا تتحرّك أبداً، ونقاطٌ تهتزّ بأكبر سعة. هذه الأمواج المستقرّة جاءت مسألةً في اثني عشرة ورقة امتحان من ست عشرة بين 2016 و2026، وفي دورة 2026 في دمشق طُلب استنتاج مواضع العقد بعشرين درجة. نتابع مع الكتاب في الصفحات 161 إلى 166.

تجربة ملد

في تجربة الكتاب، الصفحة 162، نثبت طرف وترٍ مرّن بإحدى شعبي رنانة كهربائية تواترها 100 Hz ، ونمرّره على محرّز بكرة، ونعلّق بطرفه المتدليّ كفةً أثقال تشدّه أفقيّاً. حين تعمل الرنانة تسير على الوتر أمواجٌ عرضيّة جيبية. وحين نحرك حامل البكرة حتّى يناسب الطول المهتزّ، تتكوّن مغازل واضحةً بسعةٍ كبيرة.



تجربة ملد: الوتر بين الرنانة والبكرة يهتزّ بأربعة مغازل، العقد N والبطنون A . الكتاب، الصفحة 162. الرسم من عندنا.

نرمز لنقطةٍ من الوتر بـ n ، ولبعدها عن النهاية المقيّدة m بـ $\bar{x}$. تصل إليها الموجة الواردة المتقدّمة بالاتّجاه الموجب للمحور، فيكون مطالها، كما في الكتاب، الصفحة 162:

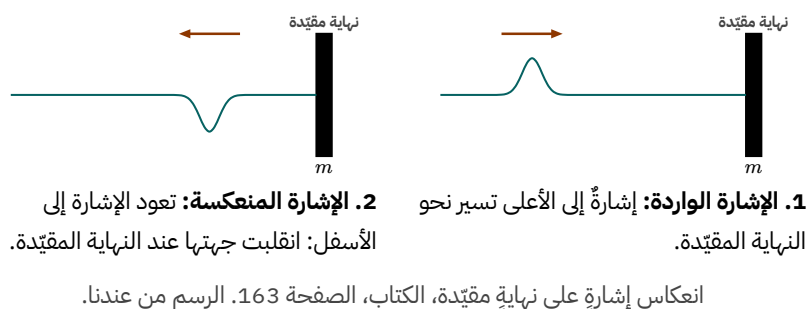
$$\bar{y}_1 = Y_{\max} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} \right)$$

الانعكاس وفرق الطور

وعندما تصل الأمواج إلى النهاية المقيّدة تنعكس، فتتولّد الموجة المنعكسة المتقدّمة بالاتّجاه السالب، ومطالها في النقطة نفسها، الكتاب، الصفحة 163:

$$\bar{y}_2 = Y_{\max} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} + \bar{\varphi}' \right)$$

حيث $\bar{\varphi}'$ فرق الطور الذي تتعرّض له الموجة بسبب الانعكاس. والإشارة تنعكس بسرعة الانتشار نفسها والتواتر نفسه والسعة نفسها، عند إهمال الضياع في الطاقة.



تذكّر: الكتاب، الصفحة 163: «إذا كانت النهاية مقيّدة فإنّ جهة الإشارة المنعكسة تعاكس جهة الإشارة الواردة؛ أي يتولّد بالانعكاس فرق طور $\bar{\varphi}' = \pi \text{ rad}$ (تعاكس بالطور).» وإذا كانت النهاية طليقة، فإنّ جهة الإشارة المنعكسة نفسها للإشارة الواردة؛ أي فرق الطور $\bar{\varphi}' = 0 \text{ rad}$ (توافق بالطور).»

فرق الطور $\bar{\varphi}'$ بين الموجة الواردة والموجة المنعكسة على نهاية مقيّدة، الكتاب، الصفحة 185:

كيف أبدأ؟ هل تنقلب جهة الإشارة عند النهاية المقيّدة؟

(أ) $\bar{\varphi}' = 0$

(ب) $\bar{\varphi}' = \frac{\pi}{2}$

(ج) $\bar{\varphi}' = \pi$

ج. نعم: تعاكس بالطور، الكتاب، الصفحة 163.

ما الموجة المستقرّة

تشكّل الأمواج المستقرّة العرضيّة نتيجة التداخل بين موجة جيبيّة واردة وموجة جيبيّة منعكسة على نهاية مقيّدة، تعاكسها بجهة الانتشار ولها التواتر نفسه والسعة نفسها. فينتج عن تداخلهما نقاط تهتزّ بسعةٍ عظمى تُسمّى بطون الاهتزاز A ، تلتقي

فيها الموجتان على توافقيّ دائم، ونقاطُ تنعدم فيها السعة تُسمّى عقد الاهتزاز N ، تلتقيان فيها على تعاكسيّ دائم. الكتاب، الصفحة 163.

تذكّر: «تكون المسافة الفاصلة بين كلّ عقدتين متتاليتين $\frac{\lambda}{2}$ ، وبشكل الاهتزاز ما بين عقدتين متجاورتين ما يشبه المغزل، وتهتز جميع نقاط المغزل الواحد على توافقيّ بالطور فيما بينها، بينما تهتز نقاط مغزلين متجاورين على تعاكسيّ بالطور فيما بينها.» الكتاب، الصفحة 164.

تذكّر: «الموجة المُستقرّة: هي نمط اهتزاز مُستقرّ تحتوي على عُقدٍ بينها بطون تنشأ نتيجة التداخل بين موجتين مُتساويتين في التواتر والسعة وتنتشران في اتجاهين مُتعاكسين.» الكتاب، الصفحة 164.

في الأمواج المستقرّة العرضيّة، المسافة بين عقدتين متتاليتين، الكتاب، الصفحة 185:

| كيف أبدأ؟ المغزل الواحد بين عقدتين.

(أ) λ

(ب) $\frac{\lambda}{2}$

(ج) $\frac{\lambda}{4}$

ب. نعم: كما في الكتاب، الصفحة 164.

في وترٍ يهتز بعدّة مغازل، كيف يهتز البطن الأوّل والبطن الثالث، الكتاب، الصفحة 187؟

| كيف أبدأ؟ المغزلان المتجاوران على تعاكس. وبين الأوّل والثالث مغزل واحد.

(أ) على توافقيّ بالطور

(ب) على تعاكسيّ بالطور

(ج) بفرق طور $\frac{\pi}{2}$

أ. نعم: الأوّل يعاكس الثاني، والثاني يعاكس الثالث، فالأوّل يوافق الثالث.

الدراسة النظرية

نتبع الكتاب، الصفحتان 164 و165: النقطة n تخضع للموجتين معاً، فمطالها المحصّل مجموع مطالبي الموجتين الواردة والمنعكسة.

$$\bar{y}_n = ?$$

1. الجمع نجمع المطالين:

$$\begin{aligned}\bar{y}_n &= \bar{y}_1 + \bar{y}_2 \\ \bar{y}_n &= Y_{\max} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} \right) \\ &+ Y_{\max} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} + \bar{\varphi}' \right)\end{aligned}$$

2. تحويل المجموع بما أن $\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha - \beta}{2} \cos \frac{\alpha + \beta}{2}$:

$$\bar{y}_n = 2Y_{\max} \cos \left(\frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} + \frac{\bar{\varphi}'}{2} \right) \cos \left(\omega t + \frac{\bar{\varphi}'}{2} \right)$$

3. النهاية المقيّدة نعوض $\bar{\varphi}' = \pi$ ، وبما أن $\cos \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) = -\sin \theta$:

$$\bar{y}_n = 2Y_{\max} \sin \frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} \sin \omega t$$

كل نقطة تهتز جيبيًا بالتواتر نفسه، لكن سعتها تتعلّق بموضعها $\bar{x}$ ، الكتاب، الصفحة 165:

$$Y_{\max/n} = 2Y_{\max} \left| \sin \frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} \right|$$

مواضع العقد والبطون، الكتاب، الصفحتان 165 و166، حيث $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

$$\bar{x}_N, \bar{x}_A = ?$$

1. العقد سعة الاهتزاز معدومة دوماً:

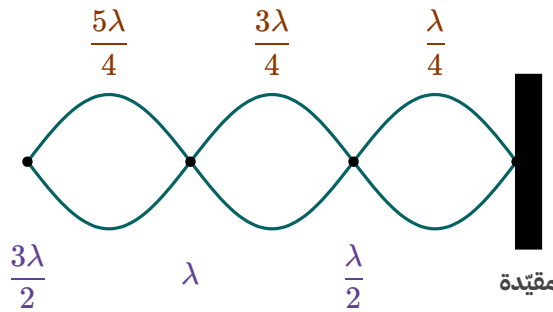
$$\begin{aligned}\sin \frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} &= 0 \\ \frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} &= n\pi \\ \bar{x} &= n \frac{\lambda}{2}\end{aligned}$$

2. البطون سعة الاهتزاز عظمى دوماً، $2Y_{\max}$:

$$\begin{aligned}\left| \sin \frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} \right| &= 1 \\ \frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} &= (2n + 1) \frac{\pi}{2} \\ \bar{x} &= (2n + 1) \frac{\lambda}{4}\end{aligned}$$

العقد على أعداد صحيحة من نصف طول الموجة عن النهاية المقيّدة، والبطون على أعداد فردية من ريعه. والمسافة بين عقدة والبطن الذي يليها:

$$\frac{\lambda}{4}$$



أبعاد العقد، في الأسفل، والبطون، في الأعلى، عن النهاية المقيّدة، الكتاب، الصفحة 165. الرسم من عندنا.

انتبه: n في هاتين العلاقتين عدد صحيح، غير اسم النقطة n . والنهاية المقيّدة نفسها عقدة، وهي $n = 0$. فالعقدة التي تليها على $\frac{\lambda}{2}$ ، والبطن الأول على $\frac{\lambda}{4}$. وبين عقدتين متتاليتين أو بطنين متتاليتين $\frac{\lambda}{2}$ ، لا λ .

مثال من عندنا: موجة مستقرة على وتر طول موجتها 40 cm، وسعة الموجة الواردة 2 mm. أين العقد والبطون في أول 40 cm من النهاية المقيّدة، وما سعة البطن؟

$$\bar{x}_N, \bar{x}_A, 2Y_{\max} = ?$$

$$1. \text{ العقد } : \frac{\lambda}{2} = 20 \text{ cm}$$

$$\bar{x}_N = 0, 20, 40 \text{ cm}$$

$$2. \text{ البطن } : \frac{\lambda}{4} = 10 \text{ cm}$$

$$\bar{x}_A = 10, 30 \text{ cm}$$

3. سعة البطن ضعف سعة الموجة الواردة:

$$2Y_{\max} = 4 \text{ mm}$$

في هذه المسافة مغزلان، ولهما ثلاث عقد وبطنان:

$$40 \text{ cm} = 2 \times \frac{\lambda}{2}$$

ما بعد البطن الثاني عن النهاية المقيّدة، الكتاب، الصفحة 186؟

كيف أبدأ؟ $\frac{\lambda}{4} (2n + 1) = \bar{x}$ ، والبطن الأول $n = 0$.

- (أ) $\frac{\lambda}{2}$
(ب) $\frac{3\lambda}{4}$
(ج) $\frac{5\lambda}{4}$

ب. نعم: $n = 1$ ف $\bar{x} = 3 \frac{\lambda}{4}$.

طول الموجة المستقرّة هو، الكتاب، الصفحة 186:

كيف أبدأ؟ المسافة بين بطنين متتاليين $\frac{\lambda}{2}$.

- (أ) المسافة بين بطنين متتاليين
(ب) المسافة بين بطنٍ والعقدة التي تليه
(ج) ضعف المسافة بين بطنين أو عقدتين متتاليتين
ج. نعم: المسافة بينهما $\frac{\lambda}{2}$ ، فطول الموجة مثلها.

ما سعة اهتزاز نقطة تبعد $\frac{\lambda}{8}$ عن النهاية المقيّدة؟

كيف أبدأ؟ $Y_{\max/n} = 2Y_{\max} \left| \sin \frac{2\pi \bar{x}}{\lambda} \right|$ مع $\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{8} = \frac{\pi}{4}$.

- (أ) $\sqrt{2} Y_{\max}$
(ب) $2Y_{\max}$
(ج) $Y_{\max}$

أ. نعم: $2Y_{\max} \sin \frac{\pi}{4} = \sqrt{2} Y_{\max}$.