آخر تحديث: November 1, 2026

🗺️ خريطة طريق لأربع سنوات · السنة 2, الخريف

عن هذه الدورة

يتضمن هذا المقرر المجاني 10 وحدات و6 مختبرات. هذه الأعداد الحقيقية وليست منهجًا أطول جرى اختصاره.

التحقق هو رقم أو نتيجة برمجية في صفحة مقرر يعيد سكربت حسابها قبل النشر. يجب أن يطابق الرقم المعروض الرقم المعاد حسابه.

هذا مخطط دورة مجانية للتعلّم الذاتي كتبته Saving Planets. وهو ليس مقررًا جامعيًا، ولا يمنح ساعات معتمدة، ولا تشارك فيه أي مؤسسة تعليمية.

يتبع نطاقه مقررًا فصليًا في الاستاتيكا الهندسية للسنة الثانية. وهو مبني على موضوعات وعمق MIT 2.001 (نصف الاستاتيكا من Mechanics and Materials I، على MIT OpenCourseWare) وPurdue ME 270 وGeorgia Tech COE 2001، وعلى الكتاب المفتوح المجاني Engineering Statics: Open and Interactive وOpenStax University Physics Volume 1 (Chapter 12)، اللذين نحيل إليهما في كل موضع. لا يتبنى أي من هؤلاء المؤلفين أو المؤسسات هذه الصفحة.

ما نضيفه: كل وحدة مرتبطة بعمل حقيقي في الطاقة النظيفة أو البنية التحتية أو الفضاء مع مصدر عام موثق (توربينات الرياح، وطاقة الرياح البحرية العائمة، والجسور، وسد هوفر، والمحطة الفضائية، والانهيارات الأرضية، ومواد البناء)، وكل رقم في الصفحة يعاد حسابه بسكربت تحقق قبل النشر، ولكل مختبر محاكاة مجانية أو نسخة منزلية زهيدة الكلفة.

تابعها بالترتيب. في كل وحدة أهداف وأفكار أساسية ومعادلات وأمثلة خطوة بخطوة وتمارين بإجابات كاملة وأخطاء شائعة وبطاقات تعليمية واختبار قصير. يُحفظ تقدّمك في هذا المتصفح فقط.

كيف تساعد هذه الدورة في إنقاذ الكوكب

تقوم الطاقة النظيفة والبنية التحتية المرنة على الاستاتيكا. فبرج توربين الرياح يجب أن يقاوم عزم الانقلاب الذي تحدثه الرياح على دواره، والمنصة البحرية العائمة تثبتها خطوط إرساء في حالة اتزان، والسد يحوّل ضغط الماء إلى قوى يستطيع خرسانته تحملها، وكل جسر يُفحص بجمع القوى والعزوم.

والاستاتيكا أيضًا وسيلتنا للبناء بوزن أخف وهدر أقل: فالجملون أو الإطار الجيد التصميم يستخدم صلبًا وخرسانة وخشبًا أقل للمهمة نفسها، والمنشآت التي تدوم أطول تُبقي المواد بعيدًا عن المكبات. وتنتهي كل وحدة بقسم قصير موثق. والقيم التي لا تأتي من مصدر موسومة بأنها قيم نموذجية.

للمعلمين

يمكنك تدريس هذا المقرر، أو أن يتابعه الطالب وحده. إنه مجاني. Saving Planets لا تمنح درجة ولا ساعات معتمدة.

- هذه الصفحة هي المقرر كاملًا: 10 وحدات و6 مختبرات (ENGR 211).

- خطّط لخمسة عشر أسبوعًا، نحو 6 إلى 9 ساعات في الأسبوع، بما في ذلك أسابيع المختبر.
- اتبع جدول الخمسة عشر أسبوعًا. اقرأ الوحدة، حلّ التمارين على الورق، ثم افتح الإجابة. في أسبوع المختبر، نفّذ المختبر أو نسخته المنزلية.
- التحقق هو رقم أو نتيجة برمجية في الصفحة يعيد سكربت حسابها قبل النشر. يجب أن يطابق الرقم الظاهر الرقم المعاد حسابه.
- استخدم طباعة هذه الصفحة، أو نزّل دليل الدراسة PDF. ورقة القوانين قرب النهاية.
- اسأل: كيف تساعد هذه الوحدة الناس والكوكب؟ في كل وحدة مربع أخضر فيه حقيقة مع مصدرها.
- انسخ نموذج دليل المعلم واكتب اسم صفك والوقت المتاح والأسئلة التي ستطرحها. افتح نموذج دليل المعلم

قبل أن تبدأ

المتطلبات السابقة

- الفيزياء I: القوى، وقوانين نيوتن، والعزم، ومخططات الجسم الحر.
- التفاضل والتكامل I وII: المشتقات والتكاملات (للأحمال الموزعة والمراكز الهندسية ومخططات العزم).
- المتجهات: المركبات، والضرب النقطي والاتجاهي (تُراجع في الوحدة 1).
- التفاضل والتكامل III والجبر الخطي يساعدان في مسائل 3D لكنهما غير مطلوبين.

كيف تذاكر

- ارسم مخطط الجسم الحر أولًا، في كل مرة. معظم أخطاء الاستاتيكا قوة ناقصة أو زائدة في المخطط.
- اختر محاور ونقطة عزوم تزيل أكبر عدد ممكن من المجاهيل.
- حل بالرموز أولًا، ثم عوّض بالأرقام بوحدات SI، وتحقق من الوحدات والإشارات في النهاية.
- عُدّ المجاهيل والمعادلات المستقلة قبل الحل، لتعرف هل يمكن حل المسألة بالاستاتيكا وحدها.
- تحقق من الإجابة بمعادلة لم تستخدمها (مثل نقطة عزوم ثانية).
- حل كل تمرين على الورق قبل فتح الإجابة، وأعد الاختبارات القصيرة بعد بضعة أيام.

ماذا تحتاج

- حاسوب أو جهاز لوحي لمحاكاة PhET المجانية (تعمل في المتصفح).
- ميزان أمتعة رقمي أو ميزان مطبخ، وخيط، وبضع كتل معروفة (تصلح زجاجات الماء أو أكياس الأرز المكتوب عليها الكتلة).
- مسطرة 30 cm، وقلم رصاص، وقطع نقدية أو حلقات معدنية، وتطبيق منقلة أو مقياس ميل في الهاتف.
- أعواد خشبية أو ورق مقوى صلب، ومسدس غراء أو غراء أبيض، ودبابيس.
- لوح من الكرتون المموج، ومقص، ودبوس تثبيت، وخيط في طرفه ثقل صغير (خيط شاقول).
- كتاب مجلد، وصندوق صغير، وكوب أملس أو عمود مستدير لاختبار احتكاك الحبل.

جدول مقترح من 15 أسبوعًا

نحو 6 إلى 9 ساعات أسبوعيًا: قراءة وتمارين، وفي أسابيع المختبر، المختبر.

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
1	القوى والمتجهات في 2D و3D	الوحدات، والقوى كمتجهات، والمركبات في 2D، والمحصلات	Engineering Statics Ch. 1–2

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
2	القوى والمتجهات في 2D و3D	المتجهات 3D، ومتجهات الموضع ومتجهات الوحدة، والضرب النقطي؛ المختبر A	Ch. 2
3	اتزان الجسيم	مخططات الجسم الحر، واتزان الجسيم في 2D و3D، والنوابض؛ المختبر B	Ch. 3; OpenStax UP1 12.1
4	العزوم والمزدوجات والأنظمة المكافئة	العزوم في 2D و3D، والضرب الاتجاهي، وفارينيون	Ch. 4.1–4.4
5	العزوم والمزدوجات والأنظمة المكافئة	العزم حول محور، والمزدوجات، والأنظمة المكافئة، والأحمال الموزعة؛ المختبر C	Ch. 4.5–4.8
6	اتزان الجسم الجاسئ في 2D	الركائز، واتزان الجسم الجاسئ في 2D، والتحديد الاستاتيكي	Ch. 5.1–5.4; UP1 12.2
7	اتزان الجسم الجاسئ في 3D	اتزان الجسم الجاسئ في 3D؛ تدريب لامتحان منتصف الفصل	Ch. 5.5–5.6
8	الجملونات: طريقة العقد وطريقة المقاطع	الجملونات: العقد، والأعضاء عديمة القوة، والمقاطع؛ المختبر D	Ch. 6.1–6.4
9	الإطارات والآلات	الإطارات والآلات	Ch. 6.5–6.6
10	المراكز الهندسية والأحمال الموزعة وضغط الموائع وعزوم القصور الذاتي للمساحة	المراكز الهندسية ومراكز الثقل، والأجزاء المركبة؛ المختبر E	Ch. 7
11	المراكز الهندسية والأحمال الموزعة وضغط الموائع وعزوم القصور الذاتي للمساحة	الأحمال الموزعة، وضغط الموائع، وعزوم القصور الذاتي للمساحة	Ch. 7, Ch. 10; UP1 14.1
12	القوى الداخلية: مخططات القص وعزم الانحناء، والكابلات	القوى الداخلية، ومخططات القص والعزم	Ch. 8.1–8.2
13	القوى الداخلية: مخططات القص وعزم الانحناء، والكابلات	علاقات الحمل–القص–العزم، والكابلات	Ch. 8.3
14	الاحتكاك	الاحتكاك الجاف، والأسافين، والسلالم، واحتكاك السيور؛ المختبر F	Ch. 9; UP1 6.2
15	المراجعة	مراجعة ومجموعة تمارين نهائية	كل الوحدات

تقدّمك

ضع علامة على الوحدات والمختبرات عند إنهائها، وخص الاختبارات. يُحفظ التقدم ونتائج الاختبارات في هذا المتصفح فقط، ولا تُرسل إلينا أبدًا.

الوحدات

القوى والمتجهات في 2D و3D

ما الاستاتيكا، والوحدات، والقوى كمتجهات، والمركبات، والمحصلات، ومتجهات الوحدة ومتجهات الموضع في 3D، والضرب النقطي للزوايا والإسقاطات.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حلّل قوة إلى مركبات في 2D و3D.
- اجمع القوى لإيجاد محصلة واتجاهها.
- اكتب قوة على امتداد خط من نقطتين.
- استخدم الضرب النقطي لإيجاد الزوايا والإسقاطات.

المفاهيم الأساسية

- تدرس الاستاتيكا الأجسام التي تسارعها صفر، فتتوازن القوى عليها: ΣF = 0 وΣM = 0.
- للقوة مقدار واتجاه ونقطة (أو خط) تأثير. وتقاس في SI بالنيوتن؛ 1 kg يزن 9.81 N.
- في 2D، القوة F بزاوية θ عن المحور x لها المركبتان F cos θ وF sin θ. وتُجمع المحصلات مركبة بمركبة.
- في 3D، اكتب F = F û، حيث û متجه وحدة. وعلى امتداد خط من A إلى B، û = (r_B − r_A)/|r_B − r_A|.
- الضرب النقطي A·B = |A||B| cos θ يعطي الزاوية بين متجهين ومركبة القوة على امتداد أي خط.

المعادلات الأساسية

$$F_x = F\cos\theta, \quad F_y = F\sin\theta$$

F_x=Fθ, F_y=Fθ

المركبات في 2D

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}, \quad \theta = \tan^{-1}(R_y/R_x)$$

R=√_x^2+R_y^2, θ=^-1(R_y/R_x)

المحصلة

$$\vec{F} = F\,\hat{u}_{AB} = F\,\frac{\vec{r}_B - \vec{r}_A}{|\vec{r}_B - \vec{r}_A|}$$

F=F u_AB=F (r_B- r_A)/(| r_B- r_A|)

القوة على امتداد خط

$$\vec{A}\cdot\vec{B} = |\vec{A}||\vec{B}|\cos\theta$$

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 1.1 قوة 500 N تؤثر بزاوية 30° فوق المحور +x. أوجد مركبتيها.

1. $F_x = 500 \cos 30° = 433$ N.
2. $F_y = 500 \sin 30° = 250$ N.

الإجابة: $\mathbf{F} = (433, 250)$ N.

مثال 1.2 اجمع $F_1 = 300$ N على امتداد +x و$F_2 = 400$ N بزاوية 120° عن +x.

1. $\mathbf{F_2} = (400\cos 120°, 400\sin 120°) = (-200, 346.4)$ N.
2. $\mathbf{R} = (100, 346.4)$ N، إذن $|R| = \sqrt{100^2 + 346.4^2}$.
3. $\theta = \tan^{-1}(346.4/100)$.

الإجابة: 360.6 N بزاوية 73.9° عن +x.

مثال 1.3 كابل يشد بقوة 1.2 kN من A(0, 0, 0) نحو B(2, 3, 6) m. اكتب القوة كمتجه.

1. $\mathbf{r_{AB}} = (2, 3, 6)$ m، وطوله $\sqrt{4 + 9 + 36} = 7$ m.
2. $\hat{u} = (2/7, 3/7, 6/7)$.
3. $\mathbf{F} = 1200\,\hat{u}$.

الإجابة: $\mathbf{F} = (343, 514, 1029)$ N.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد الزاوية بين $A = (3, 4, 0)$ و$B = (4, 0, 3)$.

   $A\cdot B = 12$، $|A| = |B| = 5$، $\cos\theta = 0.48$، $\theta = 61.3°$.

2. أوجد مركبة $F = (100, 200, -50)$ N على امتداد $\hat{u} = (0.6, 0.8, 0)$.

   $F\cdot\hat{u} = 60 + 160 = 220$ N.

3. أوجد زوايا الاتجاه لـ $F = (200, -300, 600)$ N.

$|F| = 700\ \text{N}$؛ $\alpha = \cos^{-1}(2/7) = 73.4°$، $\beta = \cos^{-1}(-3/7) = 115.4°$، $\gamma = \cos^{-1}(6/7) = 31.0°$.

4. قيم نموذجية: قوة 50 kN على منشأ تؤثر بزاوية 20° فوق الأفقي. أوجد جزأيها الأفقي والرأسي.

$F_x = 50\cos 20° = 47.0\ \text{kN}$؛ $F_y = 50\sin 20° = 17.1\ \text{kN}$.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: القوى تُجمع كالأعداد: 300 N + 400 N = 700 N.

في الحقيقة: تُجمع كمتجهات؛ 300 N و400 N متعامدتان تعطيان 500 N.

خرافة: متجه الوحدة له وحدة النيوتن.

في الحقيقة: متجه الوحدة بلا أبعاد وطوله 1؛ والمقدار هو الذي يحمل الوحدات.

خرافة: الكتلة والوزن شيء واحد.

في الحقيقة: الكتلة بالكيلوغرام؛ والوزن قوة، mg، بالنيوتن.

بطاقات تعليمية

الاستاتيكا

الأجسام الساكنة أو ذات السرعة الثابتة: $\Sigma F = 0$، $\Sigma M = 0$.

المركبات

$F_x = F\cos\theta$، $F_y = F\sin\theta$.

متجه الوحدة

$\hat{u} = \mathbf{r}/|\mathbf{r}|$، طوله 1.

القوة على امتداد خط

$\mathbf{F} = F\,(\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A)/|\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A|$.

الضرب القياسي

$\mathbf{A}\cdot\mathbf{B} = |\mathbf{A}||\mathbf{B}|\cos\theta$.

الوزن

$W = mg$، 9.81 N لكل kg.

اختبار ذاتي

1. محصلة 3 kN شرقًا و4 kN شمالًا هي...

7 kN

5 kN

1 kN

12 kN

.5 kN. √(3² + 4²) = 5

2. طول متجه الوحدة...

0

1

F

يعتمد على الوحدات

.1 بالتعريف

3. الضرب النقطي لمتجهين متعامدين يساوي...

1

0

|A||B|

سالبة

.0. cos 90° = 0

4. وحدة SI للقوة هي...

الكيلوغرام

النيوتن

الباسكال

الجول

.النيوتن. 1 N = 1 kg·m/s²

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

شفرة توربين الرياح درس في متجهات القوة. توضح وزارة الطاقة الأمريكية أن الرياح المارة على الشفرة تولد رفعًا وسحبًا معًا، وأن الرفع أقوى من السحب، فيدور الدوار. ويحلل المهندسون هذه القوى إلى مركبات على امتداد الدوار وعموديًا عليه لتحديد أبعاد الشفرات والمحور والبرج.

على Saving Planets: الفيزياء I

المصادر: وزارة الطاقة الأمريكية: كيف تعمل توربينات الرياح؟ (بالإنجليزية) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · Engineering Statics, Chapter 2: Forces and other vectors (https://engineeringstatics.org/Chapter_02.html)

مصادر تعلّم مجانية

- Engineering Statics, Ch. 2 Forces and other vectors (https://engineeringstatics.org/Chapter_02.html): فصل من كتاب مجاني.
- OpenStax UP1, 2.1 Scalars and vectors (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/2-1-scalars-and-vectors): أساسيات المتجهات.
- PhET: Vector Addition (https://phet.colorado.edu/en/simulations/vector-addition): تفاعلي.

أنهيت هذه الوحدة

اتزان الجسيم

مخططات الجسم الحر، واتزان القوى المتلاقية في 2D و3D، والكابلات والبكرات والنوابض.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- ارسم مخطط جسم حر كاملًا لجسيم.
- حل اتزانًا في 2D لمجهولين.
- حل اتزانًا في 3D مع كتابة قوى الكابلات كمتجهات.
- نمذج النوابض بـ F = kδ.

المفاهيم الأساسية

- الجسيم جسم صغير بما يكفي لتؤثر كل القوى عند نقطة واحدة، لذا لا يهم إلا ΣF = 0 (معادلتان في 2D، وثلاث في 3D).
- مخطط الجسم الحر يعزل الجسم ويبين كل قوة خارجية عليه، مع الاتجاهات المعروفة والمجاهيل المسماة.
- الكابل أو الحبل لا يستطيع إلا الشد، على امتداد خطه. وعلى بكرة مثالية يكون الشد متساويًا على الجانبين.
- النابض الخطي يشد أو يدفع بقوة F = kδ، حيث δ التغير عن طوله غير المشدود.
- إن حصلت على شد سالب فالاتجاه المفترض كان خاطئًا؛ والكابل لا يدفع، فلا بد من تغيير الترتيب.

المعادلات الأساسية

$$\sum F_x = 0, \quad \sum F_y = 0$$

F_x=0, F_y=0

اتزان الجسيم في 2D

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \;\Rightarrow\; \sum F_x = \sum F_y = \sum F_z = 0$$

F= 0\ \ F_x= F_y= F_z=0

اتزان الجسيم في 3D

$$F = k\,\delta$$

النابض الخطي

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 2.1 كتلة 100 kg معلقة بكابلين، كل منهما بزاوية 30° فوق الأفقي. أوجد الشد.

1. W = 100 × 9.81 = 981 N.

2. رأسيًا: $2T \sin 30° = 981$.

الإجابة: $T = 981$ N في كل كابل.

مثال 2.2 كتلة 50 kg معلقة بالكابل B بزاوية 30° والكابل C بزاوية 45° فوق الأفقي، على جانبين متقابلين. أوجد الشدين.

1. $W = 490.5$ N.
2. أفقيًا: $T_B \cos 30° = T_C \cos 45°$.
3. رأسيًا: $T_B \sin 30° + T_C \sin 45° = 490.5$، إذن $T_B\,(0.5 + 0.866) = 490.5$.

الإجابة: $T_B = 359.1$ N, $T_C = 439.8$ N.

مثال 2.3 نابض ثابته $k = 2000$ N/m يحمل كتلة 20 kg ساكنة. كم يستطيل؟

1. $k\delta = mg = 196.2$ N.
2. $\delta = 196.2/2000$.

الإجابة: 0.0981 m (98.1 mm).

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. كتلة 10 kg على مستوى أملس مائل بزاوية 25°، يثبتها كابل موازٍ للمنحدر. أوجد الشد والقوة العمودية.

   $T = mg \sin 25° = 41.5$ N؛ $N = mg \cos 25° = 88.9$ N.

2. حمل 600 N معلق بثلاثة كابلات إلى النقاط (2, 0, 4) و(4 ,1.732, −1) و(4 ,−1.732, −1). أوجد شد كل منها.

   طول كل كابل $\sqrt{20} = 4.47$ m وحصته الرأسية $4/4.47 = 0.894$؛ وبالتماثل $3T(0.894) = 600$، إذن $T = 223.6$ N.

3. حمّالتان، كل منهما بزاوية 60° فوق الأفقي، ترفعان حملًا كتلته 2000 kg. أوجد شد الحمّالة.

   $T = 19620/(2 \sin 60°) = 11327$ N ≈ 11.3 kN.

4. لماذا يزداد شد الحمّالات كلما صارت زاويتها أكثر تسطحًا؟

   $T = W/(2 \sin \theta)$؛ حين $\theta \to 0$، $\sin \theta \to 0$ ويزداد T بلا حد.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الشد في الكابل يساوي الوزن الذي يحمله.
في الحقيقة: فقط حين يكون الكابل رأسيًا؛ وبزاوية يجب أن يكون أكبر.

خرافة: القوى التي يؤثر بها الجسم على ركائزه توضع في مخطط جسمه الحر.
في الحقيقة: توضع في مخطط الجسم الحر القوى المؤثرة على الجسم فقط.

خرافة: الجسم الأثقل على حبل بكرة يجعل الشد مختلفًا على كل جانب.
في الحقيقة: البكرة المثالية عديمة الاحتكاك تبقي الشد متساويًا على الجانبين.

بطاقات تعليمية

الجسيم

تلتقي كل القوى عند نقطة واحدة؛ $\Sigma F = 0$ فقط.

مخطط الجسم الحر

الجسم المعزول مع كل قوة خارجية مؤثرة عليه.

الكابل

يشد على امتداد خطه فقط.

البكرة المثالية

الشد نفسه على الجانبين.

النابض

$F = k\delta$.

الإجابة السالبة

كان الاتجاه المفترض خاطئًا.

اختبار ذاتي

1. في 3D، كم معادلة مستقلة يعطي جسيم في حالة اتزان؟

1

2

3

6

3. $\Sigma F_x = \Sigma F_y = \Sigma F_z = 0$.

2. يستطيع الكابل أن...

يدفع

يشد

يدفع أو يشد

تلتوي

يشد. الكابلات تعمل بالشد فقط.

3. كابلان يحملان ثقلًا بزاوية 30° لكل منهما. تسطيحهما إلى 15° يجعل الشد...

أصغر

كما هي

أكبر

صفر

أكبر. $T = W/(2 \sin \theta)$.

4. الخطوة الأولى في أي مسألة استاتيكا هي...

التعويض بالأرقام

رسم مخطط الجسم الحر

أخذ العزوم

التخمين

رسم مخطط الجسم الحر. مخطط الجسم الحر يبين ما يجب جمعه.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تشير وزارة الطاقة الأمريكية إلى أن جزءًا كبيرًا من إمكانات طاقة الرياح البحرية يقع فوق مياه أعمق من أن تناسب الأساسات الثابتة المثبتة في قاع البحر، لذا تحتاج التوربينات هناك إلى منصات عائمة. وتبقى المنصة العائمة في مكانها لأن خطوط إرسائها وطفوها ووزنها تتوازن، وهذا اتزان جسيم وجسم جاسئ على مقياس هائل.

على Saving Planets: الفيزياء I

المصادر: · U.S. DOE: Floating Offshore Wind Shot (https://www.energy.gov/eere/wind/floating-offshore-wind-shot)
Engineering Statics, Chapter 3: Equilibrium of particles (https://engineeringstatics.org/Chapter_03.html)

مصادر تعلّم مجانية

- Engineering Statics, Ch. 3 Equilibrium of particles (https://engineeringstatics.org/Chapter_03.html): فصل من كتاب مجاني.
- OpenStax UP1, 12.1 Conditions for static equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-1-conditions-for-static-equilibrium): منظور الفيزياء.
- PhET: Forces and Motion: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/forces-and-motion-basics): قوى متوازنة.
- PhET: Hooke’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/hookes-law): النوابض.

☐ **أنهيت هذه الوحدة**

العزوم والمزدوجات والأنظمة المكافئة

عزم القوة في 2D و3D، والضرب الاتجاهي، ونظرية فارينيون، والعزم حول محور، والمزدوجات، وأنظمة القوى المكافئة، ومحصلات الأحمال الموزعة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- أوجد عزم قوة حول نقطة في 2D (قياسي) وفي 3D (ضرب اتجاهي).
- أوجد عزم قوة حول محور.
- تعامل مع المزدوجات واستبدل نظام قوى بقوة ومزدوجة مكافئتين.
- استبدل حملًا موزعًا بمحصلته.

المفاهيم الأساسية

- عزم القوة حول نقطة O هو M_O = r × F، حيث r يمتد من O إلى أي نقطة على خط عمل القوة. وفي 2D مقداره F مضروبًا في البعد العمودي d.
- نظرية فارينيون: عزم القوة يساوي مجموع عزوم مركباتها، إذن M_z = xF_y − yF_x.
- العزم حول محور هو مركبة M_O على امتداد ذلك المحور: M_a = û_a·(r × F).
- المزدوجة قوتان متساويتان متعاكستان متوازيتان. عزمها Fd واحد حول كل نقطة، فهي متجه حر.
- يمكن استبدال أي نظام قوى بقوة واحدة ومزدوجة واحدة عند أي نقطة. والحمل الموزع w(x) يكافئ قوة تساوي مساحته، تؤثر عند مركزه الهندسي.

المعادلات الأساسية

$$M_O = Fd, \quad \vec{M}_O = \vec{r} \times \vec{F}$$

M_O=Fd, M_O= r× F

عزم القوة

$$M_z = xF_y - yF_x$$

M_z=xF_y-yF_x

فارينيون في 2D

$$M_a = \hat{u}_a \cdot (\vec{r} \times \vec{F})$$

M_a= u_a·(r× F)

العزم حول محور

$$F_R = \int w\,dx, \quad \bar{x} = \frac{\int x\,w\,dx}{\int w\,dx}$$

```
F_R= w dx, x=( x w dx)/( w dx)
```

محصلة الحمل الموزع

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 3.1 قوة سحب 200 N تؤثر عند طرف مفتاح ربط طوله 0.40 m، بزاوية 60° مع المقبض. أوجد العزم حول المسمار.

1. الجزء العمودي من القوة: 200 sin 60°.
2. M = 0.40 × 200 sin 60°.

الإجابة: 69.3 N·m.

مثال 3.2 أوجد M_O حيث r = (2, 1, 0) m وF = (0, 0, 500) N.

1. r × F = (1 × 500 − 0, 0 − 2 × 500, 0).
2. |M| = √(500² + 1000²).

الإجابة: M_O = (500, −1000, 0) N·m، ومقداره 1118 N·m.

مثال 3.3 عارضة تحمل حملًا منتظمًا 4 kN/m على 5 m، وفي موضع آخر حملًا مثلثيًا يتزايد من 0 إلى 6 kN/m على 3 m. أوجد كل محصلة.

1. المنتظم: المساحة 5 × 4 عند المنتصف.
2. المثلث: المساحة 3 × 6 × ½ عند ثلثي المسافة من الطرف الصفري.

الإجابة: 20 kN عند 2.5 m؛ و9 kN عند 2 m من الطرف الصفري.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. قوتان مقدار كل منهما 150 N تكوّنان مزدوجة، والمسافة بين خطيهما 0.25 m. أوجد عزم المزدوجة.

   M = Fd = 37.5 N·m، وهو نفسه حول أي نقطة.

2. القوة F = (300, 400) N تؤثر عند (1.5, 2) m. أوجد M حول نقطة الأصل.

   M_z = xF_y − yF_x = 800 − 450 = 350 N·m، عكس عقارب الساعة.

3. قيم توضيحية: تدفع الرياح دوّار توربين بقوة 400 kN عند محور يرتفع 100 m عن الأرض. أوجد عزم الانقلاب عند القاعدة.

M = 400 kN × 100 m = 40 MN·m (قيم توضيحية).

4. استبدل 2 kN عند x = 3 m و4 kN عند x = 6 m (كلتاهما إلى أسفل) بقوة واحدة.

F_R = 6 kN عند x̄ = (2 × 3 + 4 × 6)/6 = 5 m.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: العزم = القوة × المسافة إلى نقطة التأثير.
في الحقيقة: استخدم البعد العمودي عن خط العمل.

خرافة: المزدوجة تميل إلى تحريك الجسم جانبيًا.
في الحقيقة: محصلة قوى المزدوجة صفر؛ فهي تُحدث دورانًا فقط.

خرافة: r × F = F × r.
في الحقيقة: يتغير إشارة الضرب الاتجاهي عند عكس الترتيب.

بطاقات تعليمية

العزم

M_O = r × F؛ ومقداره Fd.

فارينيون

عزم القوة = مجموع عزوم مركباتها.

العزم حول محور

M_a = û·(r × F).

المزدوجة

قوى متساوية متعاكسة متوازية؛ عزمها Fd في كل مكان.

النظام المكافئ

قوة واحدة مع مزدوجة واحدة عند أي نقطة.

الحمل الموزع

المحصلة = المساحة، تؤثر عند المركز الهندسي.

اختبار ذاتي

1. تحريك قوة على امتداد خطها يغيّر عزمها حول O بـ...

مضاعفته

لا شيء

عكسه

جعله صفرًا

لا شيء. البعد العمودي لا يتغير.

2. عزم المزدوجة حول نقاط مختلفة...

مختلف

كما هي

صفر

غير معرّفة

كما هي. المزدوجة متجه حر.

3. الحمل المنتظم w على طول L محصلته...

w

wL عند L/2

wL عند L

$wL^2/2$

wL عند L/2. المساحة عند المركز الهندسي.

4. وحدة العزم في النظام SI هي...

N

N·m

N/m

Pa

N·m. القوة × المسافة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

الأبراج الطويلة تعني عزومًا كبيرة. تقول وزارة الطاقة الأمريكية إن توربينات الرياح البحرية تميل إلى أن تكون ضخمة وأطول من تمثال الحرية، وإن التوربينات الأكبر أكثر جدوى من حيث التكلفة. ودفع الرياح على دوّار مرتفع كثيرًا فوق القاعدة يولّد عزم انقلاب كبيرًا، وعلى البرج أو الأساس أو المنصة العائمة أن يوفر عزمًا مساويًا ومعاكسًا. وحساب عزم كالمثال في التمارين هو نقطة البداية لكل تصميم برج.

على Saving Planets: الفيزياء I

المصادر: وزارة الطاقة الأمريكية: كيف تعمل توربينات الرياح؟ (بالإنجليزية) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · Engineering Statics, Chapter 4: Moments and static equivalence (https://engineeringstatics.org/Chapter_04.html)

مصادر تعلّم مجانية

- Engineering Statics, Ch. 4 Moments and static equivalence (https://engineeringstatics.org/Chapter_04.html): فصل من كتاب مجاني.
- OpenStax UP1, 10.6 Torque (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-6-torque): العزوم في الفيزياء.
- PhET: Balancing Act (https://phet.colorado.edu/en/simulations/balancing-act): تفاعلي.

شاهد المحاضرة

15.4 Momentum of a System of Point Particles (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/resourc/es/15-3/) (باللغة الإنجليزية)

MIT 8.01SC Classical Mechanics (Fall 2016), MIT OpenCourseWare. الترخيص: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · شروط الاستخدام (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

أنهيت هذه الوحدة

اتزان الجسم الجاسئ في 2D

الركائز وردود أفعالها، ومخططات الجسم الحر للأجسام الجاسئة، ومعادلات الاتزان المستوي الثلاث، والعناصر ثنائية وثلاثية القوى، والتحديد الاستاتيكي.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- استبدل كل ركيزة (مفصل، أسطوانة، تثبيت كامل) بردود الأفعال الصحيحة.
- احسب ردود أفعال الركائز باستخدام ΣF_x = ΣF_y = ΣM = 0.
- تعرّف على العناصر ثنائية القوى.
- حدد ما إذا كان الجسم محددًا استاتيكيًا أو غير محدد أو مرتكزًا ارتكازًا غير سليم.

المفاهيم الأساسية

- يحتاج الجسم الجاسئ إلى ΣF = 0 وΣM = 0 معًا. وفي 2D تكون ثلاث معادلات: ΣF_x = 0 وΣF_y = 0 وΣM_A = 0 حول أي نقطة A.
- الركائز: الأسطوانة تعطي قوة واحدة عمودية على سطحها، والمفصل يعطي مركبتي قوة، والتثبيت الكامل يعطي قوتين ومزدوجة.
- خذ العزوم حول النقطة التي تلتقي عندها أكثر المجاهيل؛ فكثيرًا ما يعطي ذلك مجهولًا واحدًا لكل معادلة.
- العنصر ثنائي القوى (قوى عند نقطتين فقط، بلا عزم) يحمل قوتين متساويتين ومتعاكستين على امتداد الخط الواصل بين النقطتين.
- إذا زادت ردود الأفعال المجهولة على عدد المعادلات كان الجسم غير محدد استاتيكيًا؛ وإذا كانت كلها متوازية أو تمر بنقطة واحدة كان مقيدًا تقييدًا غير سليم.

المعادلات الأساسية

$$\sum F_x = 0, \quad \sum F_y = 0, \quad \sum M_A = 0$$

```
F_x=0, F_y=0, M_A=0
```

اتزان الجسم الجاسئ في 2D

$$\text{unknowns} = 3 \;\Rightarrow\; \text{determinate (if properly supported)}$$

```
unknowns=3\ \ determinate (if properly supported)
```

التحديد الاستاتيكي في 2D

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 4.1 عارضة بسيطة الارتكاز طولها 6 m (مفصل عند A وأسطوانة عند B) تحمل 12 kN على بعد 2 m من A. أوجد ردود الأفعال.

1. ΣM_A = 0: 6R_B = 12 × 2.

.ΣF_y = 0: R_A = 12 − R_B .2

الإجابة: .R_B = 4 kN, R_A = 8 kN

مثال 4.2 كابولي طوله 3 m يحمل 2 kN/m على طوله كله إضافة إلى 5 kN عند طرفه. أوجد ردود أفعال الجدار.

1. المحصلة الموزعة 6 kN عند 1.5 m.
.V = 6 + 5; M = 6 × 1.5 + 5 × 3 .2

الإجابة: V = 11 kN إلى أعلى، وM = 24 kN·m عند الجدار.

مثال 4.3 عارضة طولها 8 m لها مفصل عند x = 0 وأسطوانة عند x = 6 m وحمل منتظم 3 kN/m على طولها كله. أوجد ردود الأفعال.

1. المحصلة 24 kN عند x = 4 m.
.ΣM_A: 6R_B = 24 × 4 .2
.R_A = 24 − R_B .3

الإجابة: .R_B = 16 kN, R_A = 8 kN

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ذراع أفقي طوله 4 m مثبت بمفصل في جدار؛ وكابل من طرفه إلى الجدار يصنع 30° مع الذراع. حمل كتلته 500 kg معلق عند الطرف. أوجد شد الكابل وردود أفعال المفصل (أهمل وزن الذراع).

.A_y = 4905 − 4905 = 0 ؛A_x = T cos 30° = 8496 N ؛T = 9810 N ،ΣM_pin: T sin 30° × 4 = 4905 × 4

2. عارضة لها مفصل وأسطوانتان. هل هي محددة استاتيكيًا؟

أربعة ردود أفعال مجهولة وثلاث معادلات: غير محددة من الدرجة الأولى.

3. قيم توضيحية: بحر جسر طوله 10 m يحمل مجموعة محاور شاحنة 80 kN على بعد 4 m من الركيزة A. أوجد ردود الأفعال.

R_B = 80 × 4/10 = 32 kN؛ R_A = 48 kN (قيم توضيحية).

4. لماذا لا تكون العارضة المرتكزة على ثلاث أسطوانات (كلها رأسية) آمنة؟

لا شيء يقاوم القوة الأفقية: فهي مقيدة تقييدًا غير سليم رغم أن لها ثلاثة ردود أفعال.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: ركيزة المفصل تعطي عزمًا.

في الحقيقة: المفصل يسمح للجسم بالدوران؛ والتثبيت الكامل وحده يعطي مزدوجة.

خرافة: خذ العزوم دائمًا حول المركز.

في الحقيقة: اختر النقطة التي تحذف أكثر المجاهيل.

خرافة: ثلاثة ردود أفعال تعني دائمًا أن الجسم محدد.

في الحقيقة: ليس إذا كانت كلها متوازية أو تلتقي في نقطة واحدة.

بطاقات تعليمية

الأسطوانة

رد فعل واحد عمودي على السطح.

Pin

ردّا فعل من القوى.

التثبيت الكامل

قوتان ومزدوجة (2D).

العنصر ثنائي القوى

قوتان متساويتان ومتعاكستان على امتداد الخط بين طرفيه.

غير محدد استاتيكيًا

مجاهيل أكثر من معادلات الاتزان.

التقييد غير السليم

ردود أفعال كلها متوازية أو متلاقية.

اختبار ذاتي

1. ركيزة الأسطوانة توفر...

قوة واحدة

قوتين

قوة ومزدوجة

لا شيء

قوة واحدة. عمودية على سطح التدحرج.

2. كم رد فعل يوفره التثبيت الكامل في 2D؟

1

2

3

6

3. قوتان ومزدوجة.

3. قوى العنصر ثنائي القوى تؤثر...

في أي اتجاه

على امتداد الخط الواصل بين النقطتين

عموديًا على العنصر

كمزدوجة

على امتداد الخط الواصل بين النقطتين. وإلا لما توازنت العزوم.

4. كم معادلة مستقلة يعطيها جسم جاسئ في 2D؟

2

3

4

6

3. قوتان وعزم واحد.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يبدأ كل تقييم للجسور بردود أفعال الركائز. يُحصي تقرير ASCE عدد 623218 جسرًا في الولايات المتحدة، منها 6.8% في حالة سيئة، و63085 جسرًا خضعت لتحديد الحمولة في 2024، أي أنها تحدّ من وزن المركبات المسموح لها بالعبور. وتعتمد قرارات تحديد الحمولة والإصلاح على معادلات الاتزان نفسها في هذه الوحدة؛ كما أن إبقاء الجسور القائمة في الخدمة مدة أطول يوفّر الخرسانة والفولاذ اللازمين لاستبدالها.

على Saving Planets: الحلول

المصادر: ASCE Report Card for America’s Infrastructure: Bridges (https://infrastructurereportcard.org/cat-item/bridges-infrastructure/) · Engineering Statics, Chapter 5: Rigid body equilibrium (https://engineeringstatics.org/Chapter_05.html)

مصادر تعلّم مجانية

- Engineering Statics, Ch. 5 Rigid body equilibrium (https://engineeringstatics.org/Chapter_05.html): فصل من كتاب مجاني.
- OpenStax UP1, 12.2 Examples of static equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-2-examples-of-static-equilibrium): أمثلة فيزيائية محلولة.
- PhET: Balancing Act (https://phet.colorado.edu/en/simulations/balancing-act): تفاعلي.

أنهيت هذه الوحدة

اتزان الجسم الجاسئ في 3D

الركائز في 3D (المفصل الكروي، والمفصلة، والمحمل، والتثبيت الكامل)، ومعادلات الاتزان الست، والعزوم حول المحاور لعزل المجاهيل، والتحديد الاستاتيكي في 3D.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- نمذجة ركائز 3D بردود الأفعال الصحيحة.
- كتابة معادلات الاتزان الست في 3D وحلها.
- استخدام العزوم حول محاور مختارة جيدًا لإيجاد مجهول واحد في كل مرة.
- عدّ المجاهيل للحكم على التحديد الاستاتيكي في 3D.

المفاهيم الأساسية

- في 3D يعطي الجسم الجاسئ ست معادلات: ΣF_x = ΣF_y = ΣF_z = 0 وΣM_x = ΣM_y = ΣM_z = 0.
- المفصل الكروي يعطي ثلاث قوى؛ والسطح الأملس أو الكابل يعطي واحدة؛ والمفصلة أو المحمل يعطي حتى خمسة ردود أفعال؛ والتثبيت الكامل يعطي ثلاث قوى وثلاث مزدوجات.
- أخذ العزوم حول محور يمر بعدة قوى مجهولة يحذفها كلها من تلك المعادلة.
- اللوح المستوي على ثلاث ركائز رأسية تحت أحمال رأسية يستخدم ثلاث معادلات (ΣF_z، ΣM_x، ΣM_y)؛ وركيزة رابعة تجعله غير محدد.
- في 3D يكون الضرب الاتجاهي r × F الطريقة الموثوقة لإيجاد العزوم؛ استخدم محددًا وحافظ على الترتيب r ثم F.

المعادلات الأساسية

$$\sum \vec{F} = \vec{0}, \quad \sum \vec{M}_O = \vec{0}$$

F= 0, M_O= 0

ست معادلات قياسية في 3D

$$M_x = yF_z - zF_y,\ M_y = zF_x - xF_z,\ M_z = xF_y - yF_x$$

M_x=yF_z-zF_y,\ M_y=zF_x-xF_z,\ M_z=xF_y-yF_x

مركبات العزم

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 5.1 لوح أبعاده 2 m × 1 m يرتكز على ركائز عند (0, 0) و(2, 0) و(0, 1) m. حمل 800 N يؤثر عند (0.8, 0.4) m. أوجد ردود الأفعال الثلاثة.

1. العزوم حول المحور x (الخط y = 0): $R_3 \times 1 = 800 \times 0.4$.

2. العزوم حول المحور y (الخط $x = 0$): $0.8 \times 800 = 2 \times R_2$.
3. ΣF_z: $R_1 = 800 - R_2 - R_3$.

الإجابة: $R_1 = 160$ N, $R_2 = 320$ N, $R_3 = 320$ N.

مثال 5.2 القوة $F = (0, 0, -200)$ N تؤثر عند $(0.5, 0.3, 0)$ m. أوجد عزميها حول المحورين x وy المارّين بنقطة الأصل.

1. $M_x = yF_z - zF_y = 0.3 \times (-200)$.
2. $M_y = zF_x - xF_z = -0.5 \times (-200)$.

الإجابة: $M_x = -60$ N·m, $M_y = +100$ N·m.

مثال 5.3 حامل متماثل ثلاثي الأرجل يحمل 1.5 kN عند مركزه. أوجد القوة في كل رجل.

1. بالتماثل تتساوى ردود الأفعال الرأسية الثلاثة.
2. $3R = 1.5$ kN.

الإجابة: 500 N لكل رجل.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أعد مثال اللوح مع وضع الحمل 800 N عند $(0.5, 0.5)$ m.

   $R_1 = 200$ N, $R_2 = 200$ N, $R_3 = 400$ N.

2. كم رد فعل يعطي المفصل الكروي؟

   ثلاث مركبات قوة ولا مزدوجة.

3. طاولة على أربع أرجل. هل تكفي الاستاتيكا وحدها لإيجاد قوى الأرجل الأربع تحت حمل رأسي؟

   لا: أربعة مجاهيل وثلاث معادلات مفيدة فقط (ΣF_z، ΣM_x، ΣM_y)، فهي غير محددة.

4. أوجد M_z للقوة $F = (100, 50, 0)$ N عند $(0.2, 0.4, 0)$ m.

   $M_z = xF_y - yF_x = 10 - 40 = -30$ N·m.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: مسائل 3D تحتاج دائمًا إلى ستة مجاهيل.
في الحقيقة: بقدر ما تعطيه الركائز فقط؛ والحمل المستوي على لوح يستخدم ثلاث معادلات.

خرافة: العزوم حول محور تستخدم المسافة الكاملة إلى القوة.

في الحقيقة: لا يهم إلا البعد العمودي عن المحور ومركبة القوة غير الموازية له.

خرافة: المفصلة تعطي عزمًا دائمًا.

في الحقيقة: تُنمذج المفصلات المحاذاة جيدًا عادةً بقوى فقط لتجنب ردود الأفعال الزائدة.

بطاقات تعليمية

الاتزان في 3D

ΣF = 0 وΣM = 0: ست معادلات.

المفصل الكروي

ثلاث قوى.

التثبيت الكامل (3D)

ثلاث قوى وثلاث مزدوجات.

العزم حول محور

û·(r × F).

لوح على ثلاث ركائز

محدد للأحمال الرأسية.

طاولة رباعية الأرجل

غير محددة للأحمال الرأسية.

اختبار ذاتي

1. معادلات اتزان الجسم الجاسئ في 3D:

3

4

6

9

6. ثلاث للقوى وثلاث للعزوم.

2. كم رد فعل يعطي الكابل؟

1

2

3

6

1. شد على امتداد الكابل.

3. المحور المار بقوتين مجهولتين يحذفهما من…

ΣF

معادلة العزوم حول ذلك المحور

كل المعادلات

لا شيء

معادلة العزوم حول ذلك المحور. القوى المارة بمحور ليس لها عزم حوله.

4. التثبيت الكامل في 3D يعطي…

3 ردود أفعال

5 ردود أفعال

6 ردود أفعال

1 رد فعل

6 ردود أفعال. ثلاث قوى وثلاث مزدوجات.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

محطة الفضاء الدولية مسألة استاتيكا في 3D بُنيت في المدار. تذكر NASA أن كتلتها 419725 kg، وأن الذراع Canadarm2 بطول 55 قدمًا لها سبعة مفاصل وتُستخدم لنقل وحدات كاملة. وعلى الأرض وأثناء الإطلاق، كان لا بد من فحص كل وحدة ومفصل ونقطة تثبيت للقوى والعزوم في 3D، وتوفر ألواح المحطة الشمسية الثمانية من 75 إلى 90 كيلوواط من الطاقة النظيفة لأبحاثها العلمية، ومنها رصد الأرض.

على Saving Planets: مقدمة في هندسة الطيران والفضاء

المصادر: NASA: International Space Station facts and figures (https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-facts-and-figures/) · Engineering Statics, Chapter 5: Rigid body equilibrium (https://engineeringstatics.org/Chapter_05.

html)

مصادر تعلّم مجانية

- Engineering Statics, Ch. 5 Rigid body equilibrium (3D) (https://engineeringstatics.org/Chapter_05.html): فصل من كتاب مجاني.
- MIT OpenCourseWare 2.001 Mechanics and Materials I (https://ocw.mit.edu/courses/2-001-mechanics-materials-i-fall-2006/): ملاحظات ومسائل MIT.

أنهيت هذه الوحدة

الجملونات: طريقة العقد وطريقة المقاطع

الجملونات المثالية، وعناصر الشد والضغط، وطريقة العقد، والعناصر عديمة القوة، وطريقة المقاطع، وتحديد الجملونات استاتيكيًا.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- اذكر فرضيات الجملون المثالي.
- أوجد قوى العناصر بطريقة العقد.
- اكتشف العناصر عديمة القوة بالنظر.
- أوجد بعض قوى العناصر بسرعة بطريقة المقاطع.

المفاهيم الأساسية

- الجملون المثالي له عناصر مستقيمة موصولة بمفاصل عديمة الاحتكاك ومحمّلة عند العقد فقط، فكل عنصر ثنائي القوى في حالة شد (T) أو ضغط (C).
- طريقة العقد: كل عقدة جسيم له معادلتان؛ ابدأ بعقدة فيها مجهولان على الأكثر.
- العناصر عديمة القوة: عند عقدة غير محمّلة يلتقي فيها عنصران غير متسامتين، يكون كلاهما صفرًا؛ وعند عقدة غير محمّلة فيها عنصران متسامتان وعنصر ثالث، يكون الثالث صفرًا.
- طريقة المقاطع: اقطع ثلاثة عناصر مجهولة القوى على الأكثر، واستخدم معادلات الجسم الجاسئ الثلاث على أحد الجانبين؛ وخذ العزوم عند نقطة التقاء عنصرين مقطوعين.
- الجملون المستوي ذو m عنصرًا وr رد فعل وj عقدة يكون محددًا حين m + r = 2j (ويكون مستقرًا).

المعادلات الأساسية

$$m + r = 2j$$

```
m+r=2j
```

تحديد الجملون المستوي

$$\sum F_x = \sum F_y = 0 \text{ at each joint}$$

```
F_x= F_y=0\ at each joint
```

طريقة العقد

$$F_{\text{chord}} = \frac{M}{h}$$

```
F_chord=M/h
```

قوة الوتر من عزم المقطع وعمق الجملون

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 6.1 جملون مثلثي يغطي 4 m وقمته على ارتفاع 2 m في منتصف البحر؛ ويُعلّق 10 kN عند القمة. أوجد قوى العناصر.

1. ردود الأفعال: 5 kN عند كل ركيزة.
2. عند A: $F_{AC}\sin 45° = 5$، إذن $F_{AC} = 7.07$ kN.
3. أفقيًا عند A: $F_{AB} = F_{AC}\cos 45°$.

الإجابة: AC و(C) 7.07 kN :BC؛ (T) 5 kN :AB.

مثال 6.2 عمق جملون 3 m. عند مقطع ما، عزم الأحمال وردود الأفعال على الجانب الأيسر حول العقدة السفلية 60 kN·m. أوجد قوة الوتر العلوي.

1. العزوم حول العقدة السفلية حيث يلتقي العنصران المقطوعان الآخران.
2. $F \times 3 = 60$.

الإجابة: 20 kN (C) في الوتر العلوي.

مثال 6.3 في جملون جسر، عقدة غير محمّلة تصل عنصرين متسامتين من الوتر السفلي وقائمًا رأسيًا. أوجد قوة القائم.

1. اجمع القوى العمودية على الوتر عند تلك العقدة: القائم وحده له مركبة.

الإجابة: صفر: إنه عنصر عديم القوة تحت هذا التحميل.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. جملون مثلثي يغطي 6 m بزاويتي قاعدة 30°؛ ويُعلّق 12 kN عند القمة. أوجد القوى.

   $R = 6$ kN لكل منهما؛ $F_{AC} = 6/\sin 30° = 12$ kN (C)؛ $F_{AB} = 12\cos 30° = 10.39$ kN (T).

2. جملون مستوٍ له 9 عناصر و6 عقد و3 ردود أفعال. هل هو محدد؟

   $m + r = 12 = 2j$، إذن نعم (إن كان مستقرًا).

3. لماذا نبقي العناصر عديمة القوة إن كانت لا تحمل شيئًا؟

   تدعم عناصر الضغط ضد الانبعاج، وتحمل الأحمال حين يتغير التحميل.

4. تذكر NASA أن طول جملون محطة الفضاء الدولية 94 m وأن طول المحطة من طرف إلى طرف 109 m. ما نسبة الجملون من الطول؟

   $94/109 = 0.86$، أي نحو 86%.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: عناصر الجملون تنحني.

في الحقيقة: في الجملون المثالي تستطيل العناصر أو تقصر فقط (شد أو ضغط خالص).

خرافة: يمكن إزالة العناصر عديمة القوة.

في الحقيقة: فهي تثبّت الجملون وتحمل الأحمال في حالات أخرى.

خرافة: الإجابة السالبة تعني خطأً.

في الحقيقة: إذا افترضت شدًا، فالإجابة السالبة تعني ضغطًا.

بطاقات تعليمية

الجملون المثالي

عقد مفصلية، وأحمال عند العقد، وعناصر مستقيمة.

طريقة العقد

ΣF = 0 عند كل عقدة.

طريقة المقاطع

اقطع 3 ≤ عناصر؛ واستخدم معادلات الجسم الجاسئ.

العنصر عديم القوة

لا يحمل شيئًا تحت التحميل المعطى.

m + r = 2j

تحديد الجملون المستوي.

T وC

الشد يسحب العقد؛ والضغط يدفعها.

اختبار ذاتي

1. كل عنصر في الجملون المثالي هو...

عارضة

عنصر ثنائي القوى

كابل

مزدوجة

عنصر ثنائي القوى. الأحمال عند العقد المفصلية فقط.

2. كم عنصرًا مجهول القوة يمكن أن تقطع طريقة المقاطع على الأكثر؟

1

2

3

6

3. ثلاث معادلات للجسم المستوي.

3. في الجملون المستوي، يتطلب التحديد...

m = j

m + r = 2j

m = 3j

r = 3

m + r = 2j. معادلتان لكل عقدة.

4. العنصر الذي تسحبه عقدتاه يكون في حالة...

ضغط

شد

قص

لي

شد. السحب يطيله.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

العمود الفقري لمحطة الفضاء جملون. تذكر NASA أن طول جملونها 310 أقدام (94 مترًا)، ويحمل ألواحًا شمسية يبلغ امتداد أجنحتها 109 أمتار؛ وتوفر الألواح الثمانية من 75 إلى 90 كيلوواط. يحقق الجملون صلابة كبيرة بقليل من المادة لأن كل عنصر فيه يستطيل أو يقصر فقط، ولهذا أيضًا تحمل الجملونات الجسور وأبراج نقل الكهرباء والأبراج الشبكية لتوربينات الرياح بفولاذ أقل.

على Saving Planets: مقدمة في هندسة الطيران والفضاء

المصادر: NASA: International Space Station facts and figures (https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-facts-and-figures/) · Engineering Statics, Chapter 6: Equilibrium of structures (https://engineeringstatics.org/Chapter_06.html)

مصادر تعلّم مجانية

- Engineering Statics, Ch. 6 Equilibrium of structures (https://engineeringstatics.org/Chapter_06.html): فصل من كتاب جامعي مجاني (الجملونات والإطارات والآلات).
- MIT OpenCourseWare 2.001 Mechanics and Materials I (https://ocw.mit.edu/courses/2-001-mechanics-materials-i-fall-2006/): ملاحظات MIT عن الجملونات.

أنهيت هذه الوحدة

الإطارات والآلات

المنشآت ذات العناصر متعددة القوى: تفكيك الإطارات، وقوى المفاصل على كل عنصر، والفائدة الآلية للآلات، وأنظمة البكرات.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- ميّز الإطار أو الآلة من الجملون.
- فكّك إطارًا وطبّق قانون نيوتن الثالث عند المفاصل المشتركة.
- أوجد قوة الخرج والفائدة الآلية للآلات البسيطة.
- حلّل أنظمة البكرات المثالية.

المفاهيم الأساسية

- تحتوي الإطارات والآلات على عنصر متعدد القوى واحد على الأقل: عنصر تؤثر فيه قوى عند ثلاث نقاط أو أكثر، أو قوى وعزوم، فيمكن أن ينحني.
- فكّك المنشأة. عند كل مفصل مشترك، تكون القوتان على العنصرين متساويتين ومتعاكستين.
- ابحث أولًا عن العناصر ثنائية القوى؛ فاتجاه قوتها معلوم، مما يقلل المجاهيل.
- تحوّل الآلة قوة الدخل إلى قوة خرج؛ والفائدة الآلية MA = F_out/F_in (مثاليًا، دون احتكاك).
- في نظام البكرات المثالي يتوزع الحمل على أجزاء الحبل التي تحمله، فيكون الجهد = الحمل/n.

المعادلات الأساسية

$$MA = \frac{F_{\text{out}}}{F_{\text{in}}} = \frac{d_{\text{in}}}{d_{\text{out}}}$$

```
MA=_outF_in=_ind_out
```

الفائدة الآلية للرافعة (مثاليًا)

$$F_{\text{effort}} = \frac{W}{n}$$

```
F_effort=W/n
```

بكرة مثالية بعدد n من الأجزاء الحاملة

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 7.1 يد تضغط كماشة بقوة 100 N على بعد 120 mm من المحور؛ والفكّان يقبضان على بعد 30 mm من المحور. أوجد قوة القبض.

1. العزوم حول المحور على مقبض واحد: 120 × 100 = 30 × F_jaw.

الإجابة: 400 N (MA = 4).

مثال 7.2 حمل عربة يد مقداره 600 N يقع على بعد 0.4 m من محور العجلة؛ والمقبضان على بعد 1.4 m من المحور. أوجد قوة الرفع.

1. العزوم حول المحور: 0.4 × 600 = 1.4 × F.

الإجابة: 171.4 N.

مثال 7.3 نظام بكرات مثالي فيه 4 أجزاء حبل تحمل حملًا 800 N. أوجد الجهد.

1. يحمل كل جزء الشد نفسه T؛ 4T = 800.

الإجابة: 200 N.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. قاطعة مسامير مركبة لها مرحلتان بفائدتين آليتين 4 و5. تدفع اليدان بقوة 150 N. أوجد قوة القطع.

   MA الكلية 20 =؛ F = 3000 N.

2. بكّارة مثالية لها 6 أجزاء حاملة تحت حمل 1200 N. أوجد قوة السحب.

   200 N.

3. لماذا لا يمكن استخدام طريقة العقد في الإطار؟

   العناصر متعددة القوى تحمل قوى ليست على امتداد العنصر، فلا تعطي العقد وحدها معادلات كافية.

4. رافعة طولها 2 m ونقطة ارتكازها على بعد 0.25 m من الحمل. ما القوة التي ترفع 1000 N؟

   F × 1.75 = 1000 × 0.25, F = 142.9 N.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: كل عنصر في الإطار عنصر ثنائي القوى.
في الحقيقة: واحد على الأقل متعدد القوى؛ وهذا ما يجعله إطارًا.

خرافة: الآلات تولّد الطاقة.
في الحقيقة: الآلات المثالية تبادل القوة بالمسافة؛ والشغل الداخل يساوي الشغل الخارج.

خرافة: قوى المفصل تؤثر في الاتجاه نفسه على العنصرين.

في الحقيقة: متساوية ومتعاكسة، وفق قانون نيوتن الثالث.

بطاقات تعليمية

الإطار

منشأة ثابتة فيها عنصر متعدد القوى.

الآلة

أجزاء متحركة تغيّر القوة.

العنصر متعدد القوى

قوى عند ثلاث نقاط أو أكثر، أو قوى مع عزوم.

المفصل المشترك

قوتان متساويتان ومتعاكستان على كل عنصر.

الفائدة الآلية

F_out/F_in.

نظام البكرات المثالي

الجهد = الحمل/n.

اختبار ذاتي

1. يختلف الإطار عن الجملون لأن فيه...

لا مفاصل

عناصر متعددة القوى

كابلات فقط

لا ركائز

عناصر متعددة القوى. عناصر تؤثر فيها قوى عند ثلاث نقاط أو أكثر.

2. عند المفصل المشترك، تكون القوتان على العنصرين...

متساويتين ومتعاكستين

في الاتجاه نفسه

صفر

مضاعفتين

متساويتين ومتعاكستين. القانون الثالث.

3. الفائدة الآلية المثالية لرافعة ذراع دخلها 0.8 m وذراع خرجها 0.2 m:

0.25

4

1.6

0.8

.4. 0.8/0.2

4. الجهد المثالي مع 3 أجزاء حبل حاملة وحمل 900 N:

900 N

450 N

300 N

2700 N

.300 N. 900/3

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

الإطارات القابلة للتفكيك يمكن إعادة استخدامها. تفيد وكالة حماية البيئة الأمريكية بأن 600 مليون طن من مخلفات البناء والهدم نتجت في الولايات المتحدة في 2018، وُجّه منها ما يزيد قليلًا على 455 مليون طن إلى استخدام لاحق، وأُرسل ما يقل قليلًا عن 145 مليون طن إلى المكبات. وتشجع الوكالة على استرداد مكونات المباني وإعادة استخدامها؛ والإطارات المصممة بوصلات مثبتة بالمسامير أو المفاصل، التي تحللها عنصرًا عنصرًا في هذه الوحدة، أسهل تفكيكًا وإعادة استخدام.

على Saving Planets: الحلول

المصادر: U.S. EPA: Sustainable management of construction and demolition materials (https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-materials) · Engineering Statics, Chapter 6: Equilibrium of structures (https://engineeringstatics.org/Chapter_06.html)

مصادر تعلّم مجانية

- Engineering Statics, Ch. 6 Frames and machines (https://engineeringstatics.org/Chapter_06.html): فصل من كتاب مجاني.
- PhET: Balancing Act (https://phet.colorado.edu/en/simulations/balancing-act): الروافع.

- [ ] **أنهيت هذه الوحدة**

المراكز الهندسية والأحمال الموزعة وضغط الموائع وعزوم القصور الذاتي للمساحة

مركز الثقل والمراكز الهندسية بالتكامل وبالأجزاء المركبة، والأحمال الموزعة، والضغط الهيدروستاتيكي على الأسطح المغمورة، وعزوم القصور الذاتي للمساحات مع نظرية المحاور المتوازية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- أوجد المراكز الهندسية للمساحات المركبة.
- أوجد محصلة الضغط الهيدروستاتيكي وخط عملها على جدار أو بوابة رأسية.
- احسب عزوم القصور الذاتي لمساحات المستطيلات والأشكال المركبة.
- طبّق نظرية المحاور المتوازية.

المفاهيم الأساسية

- مركز الثقل هو موضع تأثير الوزن الكلي. وفي اللوح المنتظم يطابق المركز الهندسي للمساحة: x̄ = ΣxᵢAᵢ/ΣAᵢ.
- الأجزاء المركبة: قسّم الشكل إلى مستطيلات ومثلثات ودوائر؛ وتُحسب الثقوب مساحات سالبة.
- يزداد ضغط الماء خطيًا مع العمق، p = ρgh. وعلى جدار رأسي عرضه b وعمقه h تكون المحصلة ½ρgh²b وتؤثر على ارتفاع h/3 فوق القاع.
- عزم القصور الذاتي للمساحة I = ∫y² dA يقيس بُعد المساحة عن محور؛ وهو يتحكم في صلابة العارضة عند الانحناء (المقرر التالي).
- نظرية المحاور المتوازية: I = I_c + Ad²، حيث I_c حول المحور المار بالمركز الهندسي وd المسافة بين المحورين.

المعادلات الأساسية

$$\bar{x} = \frac{\sum \tilde{x}_i A_i}{\sum A_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum \tilde{y}_i A_i}{\sum A_i}$$

```
x=( x_iA_i)/( A_i), y=( y_iA_i)/( A_i)
```

المركز الهندسي المركب

$$p = \rho g h, \quad F_R = \tfrac{1}{2}\rho g h^2 b$$

```
p=ρ gh, F_R=12ρ g h^2 b
```

الضغط الهيدروستاتيكي على جدار رأسي

$$I_x = \int y^2 \, dA, \quad I_{\text{rect}} = \frac{b h^3}{12}$$

```
I_x= y^2 dA, I_rect=(bh^3)/(12)
```

عزم القصور الذاتي للمساحة

$$I = I_c + Ad^2$$

I=I_c+Ad^2

نظرية المحاور المتوازية

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 8.1 شكل L مكون من قضيب 20 mm × 100 على امتداد المحور x وقضيب 80 mm × 20 قائم على طرفه الأيسر (x من 0 إلى 20 mm، وy من 20 إلى 100 mm). أوجد المركز الهندسي.

1. $A_1 = 2000$ mm² عند (50, 10)؛ $A_2 = 1600$ mm² عند (10, 60).
2. $\bar{x} = (2000 \times 50 + 1600 \times 10)/3600$.
3. $\bar{y} = (2000 \times 10 + 1600 \times 60)/3600$.

الإجابة: (32.2, 32.2) mm.

مثال 8.2 بوابة رأسية عرضها 2 m تحجز ماءً عمقه 3 m. أوجد القوة المحصلة وموضع تأثيرها.

1. $F = \tfrac{1}{2}\rho g h^2 b = \tfrac{1}{2} \times 1000 \times 9.81 \times 3^2 \times 2$.
2. خط العمل: $h/3$ فوق القاع.

الإجابة: 88.3 kN، على ارتفاع 1 m فوق القاع (2 m تحت السطح).

مثال 8.3 أوجد I لمستطيل عرضه 100 mm وعمقه 200 mm حول محوره المار بالمركز الهندسي وحول قاعدته.

1. $I_c = bh^3/12 = 100 \times 200^3/12$.
2. $I_{base} = I_c + A(100)^2$ حيث $A = 20000$ mm².

الإجابة: $I_c = 66.7 \times 10^6$ mm⁴؛ $I_{base} = 266.7 \times 10^6$ mm⁴ ($= bh^3/3$).

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. يذكر مكتب الاستصلاح أن أقصى ضغط للماء عند قاعدة سد هوفر 45000 lb/ft². حوّله إلى باسكال وأوجد عمق الماء الذي يولد هذا الضغط.

   45000 × 47.88 = 2.15 MPa؛ $h = p/(\rho g) = 219.6$ m، أي نحو 721 ft، قريبًا من ارتفاع السد البالغ 726.4 ft.

2. أوجد ارتفاع المركز الهندسي لنصف دائرة نصف قطرها 0.3 m فوق قطرها.

$\bar{y} = 4r/(3\pi) = 0.127$ m.

3. أين المركز الهندسي لمثلث ارتفاعه h؟

على ارتفاع h/3 فوق القاعدة.

4. أوجد I_c لمربع 50 mm × 50.

$bh^3/12 = 50^4/12 = 520{,}833$ mm⁴ (5.21×10^5 mm⁴).

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: المركز الهندسي دائمًا داخل الشكل.
في الحقيقة: ليس في شكل L أو C أو حلقة؛ فقد يقع في الفراغ.

خرافة: يدفع الماء بالشدة نفسها عند كل عمق.
في الحقيقة: يزداد الضغط خطيًا مع العمق.

خرافة: I واحد حول أي محور.
في الحقيقة: يزداد مع مربع المسافة عن المحور (نظرية المحاور المتوازية).

بطاقات تعليمية

المركز الهندسي

الموضع المتوسط الموزون بالمساحة.

مركز الثقل

موضع تأثير الوزن الكلي.

الضغط الهيدروستاتيكي

$p = \rho g h$.

القوة على الجدار

$\frac{1}{2}\rho g h^2 b$ على ارتفاع h/3 فوق القاع.

عزم القصور الذاتي للمساحة

$I = \int y^2\,dA$؛ و$bh^3/12$ للمستطيل.

نظرية المحاور المتوازية

$I = I_c + Ad^2$.

اختبار ذاتي

1. محصلة ضغط الماء على جدار رأسي تؤثر...

عند السطح

في منتصف العمق

على ارتفاع h/3 فوق القاع

عند القاع

على ارتفاع h/3 فوق القاع. المركز الهندسي للحمل المثلثي.

2. يُعامل الثقب في المساحة المركبة على أنه…

مُهمَل

مساحة سالبة

ضعف المساحة

نقطة

مساحة سالبة. اطرحه.

3. مضاعفة عمق المستطيل تضرب I_c في…

2

4

8

16

8. $I \propto h^3$.

4. ضغط الماء عند العمق h هو…

ρg/h

ρgh

ρh²

gh/ρ

ρgh. الهيدروستاتيكا.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

سد هوفر استاتيكا موائع مصنوعة من الخرسانة. يذكر مكتب الاستصلاح الأمريكي أن ارتفاع السد 726.4 قدمًا من صخر الأساس إلى القمة، وأن أقصى ضغط للماء عند قاعدته 45000 رطل لكل قدم مربعة، وأنه سد خرساني قوسي ثقالي يُحمل فيه حمل الماء بفعل الثقل وبفعل القوس الأفقي معًا. ويبيّن التمرين أن 45000 lb/ft^2 تعادل تقريبًا ما ينتجه عمود ماء ارتفاعه 220 m. ويُبقي وزن السد وشكله محصلة ذلك الضغط داخل قاعدته فلا ينزلق ولا ينقلب، بينما يغذي خزانه محطة للطاقة الكهرومائية.

على Saving Planets: الفيزياء 2

المصادر: U.S. Bureau of Reclamation: Hoover Dam frequently asked questions (https://www.usbr.gov/lc/hooverdam/faqs/damfaqs.html) · Engineering Statics, Chapter 7: Centroids and centers of gravity (https://engineeringstatics.org/Chapter_07.html)

مصادر تعلّم مجانية

- Engineering Statics, Ch. 7 Centroids and centers of gravity (https://engineeringstatics.org/Chapter_07.html): فصل من كتاب مجاني.
- Engineering Statics, Ch. 10 Moments of inertia (https://engineeringstatics.org/Chapter_10.html): فصل من كتاب مجاني.
- OpenStax UP1, 9.6 Center of mass (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-6-center-of-mass): منظور الفيزياء.
- OpenStax UP1, 14.1 Fluids, density and pressure https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-1-fluids-density-and-pressure): الضغط مع العمق.
- PhET: Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure): تفاعلي.

شاهد المحاضرة

29.2 Moment of Inertia of a Rod (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/resources/29-1/) (باللغة الإنجليزية)

MIT 8.01SC Classical Mechanics (Fall 2016), MIT OpenCourseWare. الترخيص: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · شروط الاستخدام (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

أنهيت هذه الوحدة

القوى الداخلية: مخططات القص وعزم الانحناء، والكابلات

القوة العمودية الداخلية وقوة القص وعزم الانحناء، واصطلاحات الإشارة، ومخططات القص والعزم من الاتزان ومن علاقات الحمل–القص–العزم، والكابلات تحت الأحمال الموزعة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- أوجد القوى الداخلية عند أي مقطع في عارضة.
- ارسم مخططي القص وعزم الانحناء للأحمال المركزة والموزعة.
- استخدم dV/dx = −w وdM/dx = V للتحقق من المخططات.
- أوجد الشد في كابل قطع مكافئ.

المفاهيم الأساسية

- اقطع العارضة عند x فيحمل الوجه المكشوف قوة عمودية N وقوة قص V وعزم انحناء M، تُوجد من اتزان أي من الجزأين.
- اصطلاح الإشارة المستخدم هنا: القص الموجب يدير الجزء باتجاه عقارب الساعة؛ والعزم الموجب يحني العارضة على شكل ابتسامة (تقعّر لأعلى).
- العلاقات: dV/dx = −w (الحمل لكل وحدة طول، موجب لأسفل) وdM/dx = V. الحمل المركز يُحدث قفزة في V؛ والمزدوجة تُحدث قفزة في M.
- يقع العزم الأقصى حيث V = 0 (أو عند قفزة في V)؛ وهو القيمة التي تحدد مقاس العارضة.
- الكابل تحت حمل أفقي منتظم يتدلى على شكل قطع مكافئ؛ والشد الأفقي H = wL²/(8s) لبحر L وتدلٍّ s، ويكون الشد أكبر ما يكون عند الركائز.

المعادلات الأساسية

$$\frac{dV}{dx} = -w, \quad \frac{dM}{dx} = V$$

```
dV/dx=-w, dM/dx=V
```

علاقات الحمل–القص–العزم

$$M_{\max} = \frac{wL^2}{8}$$

```
M_=(wL^2)/(8)
```

عارضة بسيطة الارتكاز تحت حمل منتظم

$$H = \frac{wL^2}{8s}, \quad T_{\max} = \sqrt{H^2 + \left(\frac{wL}{2}\right)^2}$$

```
H=(wL^2)/(8s), T_=^2+(2)^2
```

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 9.1 عارضة بسيطة الارتكاز طولها 6 m تحمل 4 kN/m. أوجد V(x) وM(x) والعزم الأقصى.

1. ردود الأفعال: 12 kN لكل منهما.
2. $V = 12 - 4x$; $M = 12x - 2x^2$.
3. $V = 0$ عند $x = 3$ m.

الإجابة: $M_{max} = wL^2/8 = 18$ kN·m في منتصف البحر.

مثال 9.2 عارضة الوحدة 4 (6 m، و12 kN على بعد 2 m من A). ارسم V وM.

1. $R_A = 8$ kN, $R_B = 4$ kN.
2. $V = +8$ kN عندما $0 < x < 2$، ثم -4 kN.
3. يتزايد M خطيًا حتى 2×8 عند الحمل، ثم يتناقص إلى 0 عند B.

الإجابة: $M_{max} = 16$ kN·m تحت الحمل.

مثال 9.3 كابل يغطي بحرًا 100 m بتدلٍّ 10 m ويحمل 2 kN/m على امتداد البحر. أوجد الشد الأفقي والشد الأقصى.

1. $H = wL^2/(8s) = 2 \times 100^2/80$.
2. المركبة الرأسية عند كل ركيزة $= wL/2 = 100$ kN.
3. $T_{max} = \sqrt{(250^2 + 100^2)}$.

الإجابة: $H = 250$ kN؛ $T_{max} = 269.3$ kN.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. كابولي طوله 3 m عليه 5 kN عند طرفه. أعطِ V والعزم الأقصى.

   $V = 5$ kN في كل مكان؛ $|M_{max}| = 15$ kN·m عند الجدار (تحدّب لأعلى).

2. ما قيمتا V وM في منتصف بحر العارضة ذات 6 m و4 kN/m؟

   $V = 0$, $M = 18$ kN·m.

3. إذا خُفّض تدلي الكابل إلى النصف ليصبح 5 m، فماذا يحدث لـ H؟

يتضاعف H إلى 500 kN: الكابلات الأكثر تسطحًا تشد أكثر.

4. عارضة بسيطة الارتكاز طولها 5 m تحمل 6 kN/m. أوجد M_max.

.6 × 25/8 = 18.75 kN·m

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: العزم الأقصى دائمًا في منتصف البحر.
في الحقيقة: فقط للأحمال المتماثلة؛ وعمومًا يكون حيث V = 0 أو حيث يقفز V.

خرافة: مخططا القص والعزم لهما الشكل نفسه.
في الحقيقة: M هو تكامل V، فدرجته أعلى بواحدة.

خرافة: الكابل الأشد (الأكثر تسطحًا) يتعرض لشد أقل.
في الحقيقة: التدلي الأقل يعني شدًا أكبر، H = wL²/(8s).

بطاقات تعليمية

القوى الداخلية

N وV وM عند القطع.

dV/dx = −w

الحمل يحدد ميل القص.

dM/dx = V

القص يحدد ميل العزم.

M_max

حيث V = 0 أو يقفز.

wL²/8

العزم الأقصى، حمل منتظم، بحر بسيط.

كابل قطع مكافئ

H = wL²/(8s).

اختبار ذاتي

1. dM/dx يساوي...

w

V

N

V. علاقة العزم–القص.

2. الحمل المركز يُحدث قفزة في…

M

V

كليهما

لا شيء منهما

V. يقفز القص بمقدار الحمل.

3. M_max لعارضة بسيطة الارتكاز تحت حمل منتظم w على طول L:

wL/2

$wL^2/2$

$wL^2/8$

$wL^3/12$

$wL^2/8$. نتيجة كلاسيكية.

4. خفض تدلي الكابل إلى النصف يجعل H…

النصف

كما هي

الضعف

أربعة أضعاف

الضعف. $H \propto 1/s$.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يجب أن تدوم الجسور أطول من أي وقت مضى. يقول تقرير ASCE إنه بمعدل الاستبدال الحالي سيحتاج الجسر المبني اليوم إلى أن يدوم 126 عامًا، وإن نحو 45% من الجسور تجاوزت أعمارها التصميمية البالغة 50 عامًا، وإن الشاحنات الأثقل مما صُممت له جسور كثيرة قد تُجهد عناصرها فوق طاقتها. ومخططات القص والعزم هي وسيلة المهندسين للتحقق من قدرة عارضة قديمة على حمل أحمال اليوم، مما يتيح صون الجسور الجيدة بدلًا من إعادة بنائها.

على Saving Planets: الحلول

المصادر: ASCE Report Card for America’s Infrastructure: Bridges (https://infrastructurereportcard.org/cat-item/bridges-infrastructure/) · Engineering Statics, Chapter 8: Internal forces (https://engineeringstatics.org/Chapter_08.html)

مصادر تعلّم مجانية

- Engineering Statics, Ch. 8 Internal forces (https://engineeringstatics.org/Chapter_08.html): فصل من كتاب مجاني.
- MIT OpenCourseWare 2.001 Mechanics and Materials I (https://ocw.mit.edu/courses/2-001-mechanics-materials-i-fall-2006/): ملاحظات MIT عن العوارض.

شاهد المحاضرة

16.2 Momentum Diagrams (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/resources/16-1/) (باللغة الإنجليزية)

MIT 8.01SC Classical Mechanics (Fall 2016), MIT OpenCourseWare. الترخيص: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · شروط الاستخدام (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

☐ **أنهيت هذه الوحدة**

الاحتكاك

الاحتكاك الجاف (احتكاك كولوم)، والحركة الوشيكة، وزاوية السكون، والانزلاق مقابل الانقلاب، والأسافين، والسلالم، واحتكاك السيور أو الحبال.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حدد ما إذا كان الجسم ينزلق أو يبقى ساكنًا أو ينقلب.
- حل مسائل الحركة الوشيكة باستخدام F = μ_sN.
- استخدم زاوية السكون ومسألة السلم.
- استخدم معادلة احتكاك السير T₂/T₁ = e^{μβ}.

المفاهيم الأساسية

- يتكيف الاحتكاك السكوني مع ما يلزم، حتى حد أقصى F_max = μ_sN. وحين يبدأ الانزلاق يكون الاحتكاك الحركي نحو μ_kN، وعادة أقل قليلًا.
- تبقى الكتلة على المنحدر ساكنة إذا كان tan θ ≤ μ_s؛ وأشد زاوية، tan⁻¹ μ_s، هي زاوية السكون.
- تحقق من الانزلاق والانقلاب كليهما: الصندوق الطويل المدفوع من أعلاه قد ينقلب قبل أن ينزلق.
- تستخدم الأسافين واللوالب الاحتكاك لحمل الأحمال؛ حل كل قطعة كجسم جاسئ مع احتكاك معاكس للحركة الوشيكة.
- الحبل الملفوف حول عمود بزاوية β (بالراديان) يحمل T₂ = T₁ e^{μβ}، فبضع لفات تحمل حملًا كبيرًا بسحب صغير.

المعادلات الأساسية

$$F \le \mu_s N, \quad F_{\max} = \mu_s N$$

Fμ_sN, F_=μ_sN

الاحتكاك السكوني

$$\tan \theta_r = \mu_s$$

θ_r=μ_s

زاوية السكون

$$\frac{T_2}{T_1} = e^{\mu \beta}$$

(T_2)/(T_1)=e^μβ

احتكاك السير (الرحوية)

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 10.1 صندوق كتلته 50 kg على منحدر 20° مع $\mu_s = 0.4$. هل ينزلق؟

1. $\tan 20° = 0.364 < 0.4$، إذن يثبت.
2. الاحتكاك اللازم $= mg \sin 20° = 167.8$ N؛ والمتاح $= 0.4 \times mg \cos 20° = 184.4$ N.

الإجابة: يبقى ساكنًا؛ الاحتكاك اللازم 167.8 N من أصل 184.4 N متاحة.

مثال 10.2 ما القوة الموازية للمنحدر التي تبدأ تحريك الصندوق نفسه إلى أعلى؟

1. يؤثر الاحتكاك الآن إلى أسفل المنحدر بقيمته القصوى.
2. $P = mg \sin 20° + 0.4\, mg \cos 20°$.

الإجابة: 352.2 N.

مثال 10.3 حبل يلتف 1.5 لفة حول عمود ($\beta = 3\pi$) مع $\mu = 0.3$. ما الحمل الذي يمكن أن يحمله سحب 100 N؟

1. $T_2/T_1 = e^{0.3 \times 3\pi} = e^{2.83}$.

الإجابة: النسبة 16.9، أي نحو 1690 N.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد زاوية السكون عندما $\mu_s = 0.6$.

   $\tan^{-1} 0.6 = 31.0°$.

2. سلم طوله 5 m ووزنه 200 N يستند بزاوية 60° مع الأرض إلى جدار أملس. أوجد أصغر μ_s للأرض يثبّته.

   قوة الجدار N_w: $N_w \times 5 \sin 60° = 200 \times 2.5 \cos 60°$، $N_w = 57.7$ N؛ الأرض $N = 200$ N؛ $\mu_{min} = 57.7/200 = 0.289$.

3. صندوق عرضه 0.5 m وارتفاعه 1.5 m ($\mu_s = 0.4$) يُدفع عند حافته العلوية. هل ينزلق أم ينقلب أولًا؟

   ينزلق حين $P > 0.4W$؛ وينقلب حين $P \times 1.5 > W \times 0.25$، أي $P > 0.167W$. ينقلب أولًا.

4. حبل يلتف 2 لفة ($\beta = 4\pi$) مع $\mu = 0.2$. أوجد T_2/T_1.

   $e^{0.8\pi} = 12.3$.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الاحتكاك يساوي دائمًا μN.

في الحقيقة: فقط عند الانزلاق الوشيك أو الفعلي؛ وقبل ذلك يساوي ما يتطلبه الاتزان.

خرافة: يعتمد الاحتكاك على مساحة التلامس.

في الحقيقة: في نموذج كولوم البسيط يعتمد على μ وN فقط.

خرافة: الاحتكاك يعاكس الحركة دائمًا، لذا يتجه إلى أسفل المنحدر.

في الحقيقة: يعاكس الحركة النسبية الوشيكة؛ فعلى كتلة توشك أن تنزلق إلى أسفل يتجه إلى أعلى المنحدر.

بطاقات تعليمية

الاحتكاك السكوني

$F \le \mu_s N$.

الاحتكاك الحركي

$F \approx \mu_k N$، وعادة أصغر قليلًا.

زاوية السكون

$\tan\theta = \mu_s$.

التحقق من الانقلاب

قارن العزوم حول حافة الانقلاب.

معادلة الرحوية

$T_2/T_1 = e^{\mu\beta}$.

الحركة الوشيكة

الاحتكاك عند قيمته القصوى، معاكسًا للحركة التي توشك أن تحدث.

اختبار ذاتي

1. تبقى الكتلة على المنحدر إذا كان...

- $\tan\theta \le \mu_s$
- $\sin\theta \le \mu_s$
- $\theta < 45°$
- $N > W$

$\tan\theta \le \mu_s$. قارن $mg\sin\theta$ مع $\mu_s mg\cos\theta$.

2. قبل الانزلاق يكون الاحتكاك السكوني...

دائمًا μ_sN

ما يتطلبه الاتزان، حتى μ_sN

صفر

μ_kN

ما يتطلبه الاتزان، حتى μ_sN. يتكيف.

3. إضافة لفة حبل حول عمود تضرب نسبة الإمساك في...

μ

2π

e^{2πμ}

1

e^{2πμ}. أُسّي في β.

4. الصندوق الطويل الضيق المدفوع من أعلاه يميل إلى أن...

ينزلق أولًا

ينقلب أولًا

لا يتحرك أبدًا

float

ينقلب أولًا. قاعدة صغيرة ودفع مرتفع.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يثبت المنحدر الترابي للسبب نفسه الذي تثبت به كتلة على سطح مائل: الاحتكاك ومقاومة التربة يعاكسان سحب الجاذبية إلى أسفل المنحدر. ويعمل برنامج USGS لمخاطر الانهيارات الأرضية على الحد من الخسائر طويلة الأمد الناجمة عن الانهيارات بفهم أسباب انهيار التربة، ويشير إلى أن حرائق الغابات قد تزيد قابلية الانهيار في المناطق الجبلية. والحفاظ على المنحدرات مزروعة ومستقرة يحمي الناس ومستجمعات المياه معًا.

على Saving Planets: إزالة الغابات

المصادر: Engineering Statics, Chapter 9: Friction (https://engineeringstatics.org/Chapter_09.html) · USGS Landslide Hazards Program (https://www.usgs.gov/programs/landslide-hazards)

مصادر تعلّم مجانية

- Engineering Statics, Ch. 9 Friction (https://engineeringstatics.org/Chapter_09.html): فصل من كتاب مجاني.
- OpenStax UP1, 6.2 Friction (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-2-friction): منظور الفيزياء.
- PhET: Friction (https://phet.colorado.edu/en/simulations/friction): تفاعلي.
- PhET: The Ramp (https://phet.colorado.edu/en/simulations/the-ramp): القوى على منحدر.

أنهيت هذه الوحدة

مجموعات المسائل

هذه التمارين داخل كل وحدة. حلّها على الورق أولًا، ثم افتح الإجابة.

1. القوى والمتجهات في 2D و3D
   4 مسائل
2. اتزان الجسيم
   4 مسائل
3. العزوم والمزدوجات والأنظمة المكافئة
   4 مسائل
4. اتزان الجسم الجاسئ في 2D
   4 مسائل
5. اتزان الجسم الجاسئ في 3D
   4 مسائل
6. الجملونات: طريقة العقد وطريقة المقاطع
   4 مسائل
7. الإطارات والآلات
   4 مسائل
8. المراكز الهندسية والأحمال الموزعة وضغط الموائع وعزوم القصور الذاتي للمساحة
   4 مسائل
9. القوى الداخلية: مخططات القص وعزم الانحناء، والكابلات
   4 مسائل
10. الاحتكاك
    4 مسائل

المختبر (Statics lab)

المختبر هو الجزء العملي من المقرر. وهو هنا مجاني وللتدريب فقط، دون ساعات معتمدة.

يمكن إجراء كل تجربة في محاكاة PhET مجانية أو بأدوات منزلية رخيصة. اجعل الأحمال صغيرة (بضعة كيلوغرامات على الأكثر)، وأبعد قدميك ويديك عن أسفل الأحمال المعلقة، ولا تقف أبدًا على منشأة اختبار.

مرجع السلامة: OSHA: Hand and power tools (https://www.osha.gov/hand-power-tools)

المختبر A: طاولة القوى والقوة الموازنة

الأسبوع 2

الهدف: اجمع قوتين بالمركبات، وتنبأ بالقوة الواحدة التي توازنهما، واختبر التنبؤ في المحاكاة وبموازين نابضية أو موازين حقائب.

$$\vec{E} = -(\vec{F}_1 + \vec{F}_2)$$

E=-(F_1+ F_2)

القوة الموازنة تساوي المحصلة وتعاكسها

الإجراء

1. افتح PhET Vector Addition. اجعل F_1 = 2.0 N عند 0° وF_2 = 3.0 N عند 90°، واقرأ مقدار المحصلة وزاويتها.
2. تنبأ بالقوة الموازنة (المقدار نفسه، والاتجاه المعاكس) بالمركبات.
3. في المنزل: اربط ثلاثة خيوط بحلقة صغيرة. اسحب اثنين منها بموازين حقائب أو موازين نابضية عند 0° و90° حتى تقرأ 2.0 N و3.0 N (نحو 204 g و306 g)، وقِس سحب الخيط الثالث وزاويته بمنقلة على الهاتف.
4. كرر مع وضع F_2 عند 60° وقارن.

جدول البيانات

القوة	المقدار (N)	الزاوية (°)
F_1	2.00	0
F_2	3.00	90
المحصلة	3.61	56.3
القوة الموازنة	3.61	236.3

قيم محسوبة بالمركبات للقوى المختارة (قيم توضيحية)؛ وعادة تتفق القراءات المنزلية معها في حدود نسبة مئوية قليلة.

مثال حسابي

1. $R = \sqrt{(2^2 + 3^2)} = 3.61$ N عند $\tan^{-1}(3/2) = 56.3°$.
2. القوة الموازنة تتجه في الاتجاه الآخر: 56.3° + 180° = 236.3°.
3. مع F_2 عند 60°: R = (3.5, 2.60) N، ومقدارها 4.36 N عند 36.6°.

السلامة

- اجعل الخيوط قصيرة والسحب لطيفًا؛ فالخيط المنقطع قد يرتد إلى العينين.

بديل منزلي أو افتراضي

- خطوة الحلقة والموازين هي النسخة المنزلية؛ ويصلح أيضًا ميزان مطبخ مع خيط فوق ظهر كرسي.

PhET: Vector Addition (https://phet.colorado.edu/en/simulations/vector-addition)

الصلة بالكوكب: يوازن المهندسون أحمال الرياح على شفرات التوربينات وأبراجها بهذا النوع من جمع المتجهات بالضبط. وزارة الطاقة الأمريكية: كيف تعمل توربينات الرياح؟ (بالإنجليزية) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر B: شد الكابل وزاوية الحمّالة

الأسبوع 3

الهدف: قِس كيف يزداد الشد في خيطين متماثلين يحملان ثقلًا كلما صارا أكثر تسطحًا، وقارن مع T = W/(2 sin θ).

$$T = \frac{W}{2\sin\theta}$$

`T=(W)/(2θ)`

θ مقيسة من الأفقي

الإجراء

1. علّق كتلة 1.0 kg (زجاجة ماء سعة 1 L) من منتصف خيط؛ واربط كل طرف بميزان حقائب يمسكه مساعد أو مثبت بظهري كرسيين.
2. حرّك نقطتي التعليق لضبط زوايا الخيط عند نحو 90° و60° و45° و30° و15° من الأفقي (استخدم منقلة على الهاتف).
3. سجّل قراءتي الميزانين عند كل زاوية وخذ متوسطهما.
4. ارسم T مقابل 1/sin θ؛ ويجب أن يكون الميل W/2 = 4.9 N.

جدول البيانات

θ من الأفقي (°)	T (N) عند 9.81 N
90	4.91
60	5.66
45	6.94
30	9.81
15	18.95

قيم محسوبة من T = W/(2 sin θ) لكتلة 1.0 kg.

مثال حسابي

1. عند 30° يحمل كل خيط الوزن كاملًا، 9.81 N.
2. عند 15° يحمل كل منهما ضعف الوزن تقريبًا: 18.95 N.
3. ميل T مقابل 1/sin θ = W/2 = 4.91 N.

السلامة

- أبقِ الكتلة منخفضة فوق سطح لين وأبعد قدميك عن أسفلها.
- استخدم كتلة خفيفة فقط؛ فعند الزوايا الصغيرة يصبح شد الخيط كبيرًا.

بديل منزلي أو افتراضي

- المختبر كله منزلي؛ وتصلح أيضًا قراءتا ميزان مطبخ مع خيط فوق قضيب أملس.

PhET: Forces and Motion: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/forces-and-motion-basics)

الصلة بالكوكب: تُحدَّد مقاسات خطوط الإرساء في منصات الرياح البحرية العائمة بالهندسة نفسها: زوايا الخط الضحلة تعني شدًا عاليًا. U.S. DOE: Floating Offshore Wind Shot (https://www.energy.gov/eere/wind/floating-offshore-wind-shot)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر C: العزوم وكتلة مجهولة على ميزان

الأسبوع 5

الهدف: استخدم ΣM = 0 على ميزان مسطرة لإيجاد كتلة مجهولة، واختبر قواعد التوازن في PhET.

$$m_1 d_1 = m_2 d_2$$

`m_1d_1=m_2d_2`

تتوازن العزوم حول نقطة الارتكاز

الإجراء

1. في PhET Balancing Act، وازن طوبة معلومة مع جسم غامض واحسب كتلته من المسافات.
2. في المنزل: وازن مسطرة طولها 30 cm على قلم رصاص عند علامة 15 cm.
3. ضع كومة عملات معلومة كتلتها 20 g (زنها بميزان مطبخ) على بعد 4 و6 و8 cm من نقطة الارتكاز، وحرّك الجسم المجهول حتى تتوازن المسطرة؛ وسجّل مسافته في كل مرة.
4. احسب الكتلة المجهولة من كل محاولة وخذ المتوسط.

جدول البيانات

الكتلة المعلومة 20 g عند (cm)	المجهول يتوازن عند (cm)
4.0	6.4
6.0	9.6
8.0	12.8

قيم توضيحية لجسم مجهول كتلته 12.5 g.

مثال حسابي

1. m = 20 × 4.0/6.4 = 12.5 g، وكل صف يعطي القيمة نفسها.
2. نسبة المسافات ثابتة (1.6)، وهي النسبة العكسية للكتلتين.

السلامة

- لا شيء سوى إبعاد العملات الصغيرة عن الأطفال الصغار.

بديل منزلي أو افتراضي

- خطوة المسطرة والعملات هي النسخة المنزلية.

PhET: Balancing Act (https://phet.colorado.edu/en/simulations/balancing-act)

الصلة بالكوكب: توازن العزوم نفسه يحدد حجم أساس توربين الرياح اللازم لمقاومة عزم الانقلاب الناتج عن الرياح. وزارة الطاقة الأمريكية: كيف تعمل توربينات الرياح؟ (بالإنجليزية) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر D: بناء جملون صغير وتحليله

الأسبوع 8

الهدف: ابنِ جملونًا مثلثيًا من أعواد الحِرَف، وتنبأ بقوى العناصر بطريقة العقد، وانظر أي العناصر في شد وأيها في ضغط.

$$F_{AC} = \frac{P/2}{\sin\theta}, \quad F_{AB} = F_{AC}\cos\theta$$

`F_AC=(P/2)/(θ), F_AB=F_ACθ`

جملون مثلثي متماثل بحمل P عند القمة

الإجراء

1. الصق الأعواد على شكل مثلث عرضه 30 cm وارتفاعه 10 cm (زاوية القاعدة 33.7°).
2. ضعه على كتابين وعلّق 5 و10 و20 N (زجاجات ماء سعة 0.5 وا1 وL 2) من القمة.
3. احسب قوى العناصر بطريقة العقد لكل حمل.
4. استبدل العنصر السفلي بخيط: يبقى مشدودًا (شد). جرّب الأمر نفسه مع عنصر مائل وسترى أنه ينثني (ضغط).

جدول البيانات

الحمل P (N)	العناصر المائلة (N، C)	العنصر السفلي (N، T)
5	4.51	3.75
10	9.01	7.50
20	18.0	15.0

قيم محسوبة للهندسة 30 cm × 10 cm (قيم توضيحية).

مثال حسابي

1. θ = $\tan^{-1}(10/15) = 33.7°$.
2. عند 10 N: F_AC = 5/sin 33.7° = 9.01 N (C)؛ F_AB = 9.01 cos 33.7° = 7.50 N (T).
3. تتناسب قوى العناصر خطيًا مع الحمل.

السلامة

- الغراء الساخن يحرق؛ اترك الوصلات تبرد.
- أبعد يديك وقدميك عن أسفل الزجاجات المعلقة.

بديل منزلي أو افتراضي

- المختبر كله منزلي؛ وتصلح أيضًا شرائح من الورق المقوى وشريط لاصق.

Engineering Statics: interactive truss examples (https://engineeringstatics.org/Chapter_06.html)

الصلة بالكوكب: جملون محطة الفضاء البالغ 94 m وكل برج شبكي للرياح أو لخطوط الكهرباء تحمل الأحمال عبر عناصر في شد وضغط مثل هذه. NASA: International Space Station facts and figures (https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-facts-and-figures/)

- [ ] **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر E: إيجاد المركز الهندسي بخيط الشاقول

الأسبوع 10

الهدف: أوجد المركز الهندسي لشكل L من الورق المقوى بتعليقه من نقطتين، وقارن مع حساب المساحات المركبة.

$$\bar{x} = \frac{\sum \tilde{x}_i A_i}{\sum A_i}$$

x=(x_iA_i)/(A_i)

المركز الهندسي المركب

الإجراء

1. قص شكل L من الورق المقوى: قضيب 4 cm × 20 في الأسفل وقضيب 16 cm × 4 قائم على طرفه الأيسر.
2. اغرز دبوسًا قرب إحدى الزوايا، واترك الشكل وخيط الشاقول يتدليان بحرية، وارسم خط الشاقول على الورق.
3. كرر من زاوية ثانية. يتقاطع الخطان عند المركز الهندسي؛ قِس x وy من الزاوية السفلية اليسرى.
4. احسب المركز الهندسي من المستطيلين وقارن.

جدول البيانات

الجزء	المساحة (cm²)	x̃ (cm)	ỹ (cm)
القضيب السفلي	80	10	2
القضيب القائم	64	2	12
شكل L	144	6.44	6.44

قيم محسوبة للأبعاد المذكورة؛ ويجب أن يقع تقاطع خطي الشاقول في حدود بضعة مليمترات.

مثال حسابي

1. x̄ = (80 × 10 + 64 × 2)/144 = 6.44 cm.
2. ȳ = (80 × 2 + 64 × 12)/144 = 6.44 cm.
3. يقع المركز الهندسي خارج الورق المقوى، في منطقة الزاوية الفارغة، وهذا ما يؤكده خطا الشاقول.

السلامة

- اقطع بعيدًا عن يدك؛ واستخدم لوح قص.

بديل منزلي أو افتراضي

- المختبر كله منزلي.

Engineering Statics, Chapter 7: centroids (https://engineeringstatics.org/Chapter_07.html)

الصلة بالكوكب: يجب أن يُبقي السد الثقالي محصلة وزنه وضغط الماء داخل قاعدته؛ وتحديد المراكز الهندسية هو الخطوة الأولى.
U.S. Bureau of Reclamation: Hoover Dam frequently asked questions (https://www.usbr.gov/lc/hooverdam/faqs/damfaqs.html)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر F: قياس الاحتكاك على منحدر وحول عمود

الأسبوع 14

الهدف: قِس معامل الاحتكاك السكوني من زاوية انزلاق علبة على كتاب مائل، وقِس كيف تزداد قدرة الحبل على الإمساك مع عدد اللفات حول كوب.

$$\mu_s = \tan\theta_{\text{slip}}, \quad \frac{T_2}{T_1} = e^{\mu\beta}$$

μ_s=θ_slip, (T_2)/(T_1)=e^μβ

زاوية الانزلاق واحتكاك الرحوية

الإجراء

1. ضع علبة صغيرة على كتاب مجلد وأمِل الكتاب ببطء؛ واقرأ زاوية الانزلاق بمقياس ميل على الهاتف. كرر ثلاث مرات.
2. احسب μ_s = tan θ لكل محاولة وخذ المتوسط.
3. لُفّ خيطًا 0.5 و1 و1.5 لفة حول كوب أملس. علّق ثقلًا صغيرًا في أحد الطرفين وقِس بميزان حقائب السحب اللازم في الطرف الآخر لإمساكه بالكاد.
4. قارن النسبة مع e^{μβ}، حيث β = 2π × عدد اللفات، مستخدمًا μ المستخرجة من محاولة واحدة.

جدول البيانات

المحاولة أو اللفات	القراءة	النتيجة
المحاولة 1	22°	μ_s = 0.404
المحاولة 2	24°	μ_s = 0.445
المحاولة 3	23°	μ_s = 0.424
0.5 لفة، μ = 0.25	—	النسبة 2.19
1 لفة	—	النسبة 4.81
1.5 لفة	—	النسبة 10.55

قيم توضيحية؛ زواياك تعتمد على سطحي العلبة والكتاب، وقيمة μ البالغة 0.25 للخيط على الكوب قيمة توضيحية.

مثال حسابي

1. متوسط μ_s = (0.404 + 0.445 + 0.424)/3 = 0.424.
2. كل نصف لفة إضافية يضرب نسبة الإمساك في e^{0.25π} = 2.19.
3. لفة كاملة: e^{0.5π} = 4.81.

السلامة

- استخدم ثقلًا خفيفًا وأبقه فوق سطح لين.

بديل منزلي أو افتراضي

- المختبر كله منزلي.

PhET: Friction (https://phet.colorado.edu/en/simulations/friction) · PhET: The Ramp (https://phet.colorado.edu/en/simulations/the-ramp)

الصلة بالكوكب: فكرة زاوية الانزلاق هي نقطة البداية للحكم على استقرار المنحدرات، الذي تدرسه USGS للحد من خسائر الانهيارات الأرضية. USGS Landslide Hazards Program (https://www.usgs.gov/programs/landslide-hazards)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

مجموعات تدريب للامتحان

وقّت نفسك: نحو 10 دقائق لكل مسألة. ثم قارن بالحلول الكاملة.

مجموعة تمارين منتصف الفصل (الوحدات 5–1)

1. أوجد محصلة 400 N على امتداد +x و300 N على امتداد +y.

   .θ = tan⁻¹(300/400) ؛R = √(400² + 300²) .1

   الإجابة: 500 N عند 36.9°.

2. كتلة 80 kg معلقة بكابلين، كل منهما بزاوية 40° فوق الأفقي. أوجد الشد.

   .2T sin 40° = 784.8 N .1

   الإجابة: 610.5 N.

3. القوة F = (0, −250) N تؤثر عند (3, 2) m. أوجد عزمها حول نقطة الأصل.

   .M_z = xF_y − yF_x = 3(−250) − 0 .1

   الإجابة: −750 N·m (750 N·m باتجاه عقارب الساعة).

4. عارضة بسيطة الارتكاز طولها 5 m تحمل 10 kN على بعد 1.5 m من A. أوجد ردود الأفعال.

   .ΣM_A: 5R_B = 10 × 1.5 .1

   الإجابة: R_B = 3 kN, R_A = 7 kN.

5. كابولي طوله 2 m يحمل 3 kN/m. أوجد ردود أفعال الجدار.

   .1 المحصلة 6 kN عند 1 m.

الإجابة: V = 6 kN, M = 6 kN·m.

مجموعة التدريب النهائية (كل الوحدات)

1. جملون مثلثي يغطي 8 m وقمته على ارتفاع 3 m في منتصف البحر؛ ويُعلّق 20 kN عند القمة. أوجد قوى العناصر.

   1. R = 10 kN لكل منهما؛ sin θ = 0.6، cos θ = 0.8.
   2. F_AC = 10/0.6; F_AB = F_AC × 0.8.

   الإجابة: العنصران المائلان 16.67 kN (C)؛ والسفلي 13.33 kN (T).

2. مقطع على شكل T له شفة 120 × 20 mm فوق جذع 100 × 20. أوجد ارتفاع المركز الهندسي من الأسفل.

   1. الجذع: 2000 mm² عند 50 mm؛ الشفة: 2400 mm² عند 110 mm.

   الإجابة: 82.7 mm.

3. بوابة رأسية عرضها 3 m تحجز ماءً عمقه 4 m. أوجد المحصلة وارتفاعها فوق القاع.

   1. F = ½ρgh²b.

   الإجابة: 235.4 kN على ارتفاع 1.33 m فوق القاع.

4. عارضة بسيطة الارتكاز طولها 8 m تحمل 5 kN/m. أوجد ردود الأفعال والعزم الأقصى.

   1. R = wL/2; M = wL²/8.

   الإجابة: 20 kN لكل منهما؛ 40 kN·m.

5. صندوق كتلته 30 kg على منحدر 25° مع μ_s = 0.5. هل ينزلق؟

   1. tan 25° = 0.466 < 0.5.
   2. اللازم mg sin 25° مقابل المتاح 0.5 mg cos 25°.

   الإجابة: لا: اللازم 124.4 N والمتاح 133.4 N.

6. حبل يلتف 2 لفة حول عمود مع μ = 0.2. أوجد نسبة الإمساك.

   1. $T_2/T_1 = e^{0.2 \times 4\pi}$.

   الإجابة: 12.3.

ورقة الصيغ

$$F_x = F\cos\theta,\ F_y = F\sin\theta$$

$$\vec{F} = F\,\hat{u}_{AB}$$

$$\vec{A}\cdot\vec{B} = |A||B|\cos\theta$$

$$\sum \vec{F} = \vec{0},\ \sum \vec{M} = \vec{0}$$

$$\vec{M}_O = \vec{r} \times \vec{F},\ M = Fd$$

$$M_a = \hat{u}_a \cdot (\vec{r} \times \vec{F})$$

$$F_R = \int w\,dx \text{ at the centroid}$$

$$m + r = 2j$$

$$\bar{x} = \sum \tilde{x}_i A_i / \sum A_i$$

$$p = \rho g h,\ F_R = \tfrac{1}{2}\rho g h^2 b$$

$$I = bh^3/12,\ I = I_c + Ad^2$$

$$dV/dx = -w,\ dM/dx = V$$

$$M_{\max} = wL^2/8$$

$$H = wL^2/(8s)$$

$$F \le \mu_s N,\ \tan\theta_r = \mu_s$$

$$T_2/T_1 = e^{\mu\beta}$$

الثوابت

الثابت	القيمة
تسارع الجاذبية القياسي، g	9.80665 m/s² (نستخدم 9.81 m/s²)
وزن 1 kg عند الجاذبية القياسية	9.81 N
كثافة الماء العذب (القيمة المقربة المستخدمة هنا)	1000 kg/m³
الوزن النوعي للماء، ρg	9.81 kN/m³
1 قدم	0.3048 m (قيمة دقيقة)
1 رطل-قوة	4.448 N
1 رطل لكل قدم مربعة	47.88 Pa

المصدر: NIST: Standard acceleration of gravity (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?gn)

نصوص ومحاكاة مجانية

استخدم هذه الكتب والمحاضرات والمحاكاة المجانية إلى جانب المقرر.

- Engineering Statics: Open and Interactive (Baker and Haynes) (https://engineeringstatics.org/): كتاب استاتيكا تفاعلي كامل ومجاني.
- MIT OpenCourseWare 2.001 Mechanics and Materials I (https://ocw.mit.edu/courses/2-001-mechanics-materials-i-fall-2006/): ملاحظات محاضرات ومجموعات مسائل مجانية من MIT.
- OpenStax University Physics Volume 1, Chapter 12: Static equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-1-conditions-for-static-equilibrium): منظور فيزيائي مجاني للاتزان.

- PhET: Vector Addition (https://phet.colorado.edu/en/simulations/vector-addition): جمع المتجهات وتحليلها.
- PhET: Balancing Act (https://phet.colorado.edu/en/simulations/balancing-act): العزوم والتوازن.
- PhET: Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure): ضغط الموائع مع العمق.

مسرد المصطلحات

زاوية السكون
أشد زاوية منحدر يبقى عندها الجسم ساكنًا، $\tan^{-1}\mu_s$.

عزم الانحناء
العزم الداخلي عند مقطع عارضة.

المركز الهندسي
المركز الهندسي لمساحة أو حجم.

المزدوجة
قوتان متساويتان متعاكستان متوازيتان؛ عزم خالص.

القوة الموازنة
القوة التي توازن مجموعة من القوى.

التثبيت الكامل
ركيزة تمنع الانتقال والدوران.

الإطار
منشأة فيها عنصر واحد متعدد القوى على الأقل.

مخطط الجسم الحر
رسم لجسم معزول مع كل قوة خارجية مؤثرة عليه.

الفائدة الآلية
قوة الخرج مقسومة على قوة الدخل.

طريقة العقد
تحليل الجملون باستخدام $\Sigma F = 0$ عند كل عقدة.

طريقة المقاطع
تحليل الجملون باتزان الجسم الجاسئ لقطعة مقطوعة.

العزم
الأثر الدوراني للقوة، $r \times F$.

نظرية المحاور المتوازية
$I = I_c + Ad^2$.

ركيزة مفصلية
ركيزة تمنع الانتقال وتسمح بالدوران.

المحصلة
قوة واحدة تكافئ مجموعة من القوى.

ركيزة أسطوانية
ركيزة تعطي قوة واحدة عمودية على سطحها.

قوة القص
القوة الداخلية عبر مقطع عارضة.

غير محدد استاتيكيًا
مجاهيل أكثر من معادلات الاتزان.

الجملون
منشأة من عناصر ثنائية القوى موصولة بمفاصل عند العقد.

العنصر ثنائي القوى
عنصر محمّل عند نقطتين فقط؛ والقوى على امتداد الخط بينهما.

العنصر عديم القوة
عنصر جملون لا يحمل قوة تحت تحميل معين.

معايير التقييم الذاتي

لا تُمنح درجة ولا ساعات معتمدة. استخدم هذا لتقيّم بصدق أين أنت في كل وحدة.

المستوى	كيف يبدو
4 · إتقان	يرسم مخططات جسم حر كاملة، ويحسن اختيار المحاور ونقاط العزوم، ويتحقق من التحديد الاستاتيكي، ويتحقق من الإجابات بمعادلة لم تُستخدم.
3 · متمكن	يحل مسائل التدريب مع أخطاء عرضية في الإشارة أو الوحدات.
2 · قيد التطور	يتبع الأمثلة المحلولة لكنه يُغفل قوى في مخططات الجسم الحر أو يختار نقاط عزوم تترك مجاهيل كثيرة.
1 · مبتدئ	يعوّض بالأرقام في الصيغ دون مخطط جسم حر؛ ويحتاج إلى مراجعة الوحدة.

الأوزان المقترحة إذا أردت درجة

الجزء	الوزن
تمارين	25%
المختبرات	20%
مجموعة تدريب منتصف الفصل	25%
مجموعة التدريب النهائية	30%

استهدف المستوى 3 أو أعلى في كل وحدة قبل الانتقال إلى الدورة التالية.

دورات ذات صلة

- الفيزياء 2 PHYS 210 + PHYS 210L
- الديناميكا ENGR 212

- التفاضل والتكامل 3 MATH 210
- كل الدورات