آخر تحديث: November 1, 2026

🗺️ خريطة طريق لأربع سنوات · السنة 3, الربيع

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 الهياكل الفضائية الجوية للسنة الثالثة. وهو مبني على موضوعات وعمق MIT 16.20 Structural Mechanics وأجزاء الهياكل في MIT 16.01–16.04 Unified Engineering (مجانًا على MIT OpenCourseWare)، وعلى مقررات مثل Purdue AAE 352 وGeorgia Tech AE 3140، مع فصل FAA Pilot’s Handbook عن بناء الطائرات ومحاكاة PhET، ونضع روابطها حيث تفيد. ولا يؤيد أي من هؤلاء المؤلفين أو المؤسسات أو الهيئات هذه الصفحة.

ما نضيفه: كل وحدة مرتبطة بعمل حقيقي مع مصدر عام مذكور (أجنحة مدعّمة من المواد المركبة، وتصنيع المواد المركبة بمعدل عالٍ، والمواد الخفيفة)، وكل رقم في الصفحة يُعاد حسابه بسكربت تحقق قبل النشر، ولكل مختبر محاكاة مجانية أو جدول بيانات أو نسخة منزلية آمنة.

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

تحمل الطائرة هيكلها في كل رحلة، فكل كيلوغرام من الهيكل يكلّف وقودًا طوال عمر الطائرة. والأجنحة وأجسام الطائرات الأخف، التي يتيحها تحليل أفضل ومواد أفضل، من الروافع الرئيسية لطيران أنظف.

تعدّ NASA تقنيات الطائرات الكفؤة إحدى الطرق الرئيسية الثلاث لجعل الطيران مستدامًا. وتنتهي كل وحدة بقسم قصير موثق المصادر. والقيم التي لا تأتي من مصدر موسومة بأنها قيم مثال أو قيم مرجعية.

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 (AERO 330).
- 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

- ميكانيكا المواد: أساسيات الإجهاد والانفعال والانحناء والالتواء والانبعاج.
- الاستاتيكا: مخططات الجسم الحر، ومخططات القص والعزم.
- التفاضل والتكامل II والجبر الخطي: التكاملات والمصفوفات.
- مقرر أداء الطائرات يساعد في معاملات الحمل لكنه ليس مطلوبًا.

كيف تذاكر

- ابدأ كل مسألة بمخطط الجسم الحر ومسار الحمل: أين يدخل الحمل، وكيف يصل إلى المساند؟
- افصل بين الأحمال الحدية والأحمال القصوى، واكتب معامل الأمان صراحة.
- في الجدران الرقيقة، فكّر أولًا بتدفق القص q (N/m)، ثم اقسم على السماكة.
- تحقق من الجساءة والانبعاج، لا من المتانة فقط: فالهياكل الخفيفة تنهار عادة بالانبعاج.
- قارن المواد لكل كيلوغرام (الجساءة والمتانة النوعيتان)، لا لكل متر مكعب.
- حل كل تمرين على الورق قبل فتح الإجابة، وأعد الاختبارات القصيرة بعد بضعة أيام.

ماذا تحتاج

- حاسوب أو جهاز لوحي لمحاكاة PhET Hooke’s Law المجانية.
- مسطرة خشبية أو بلاستيكية، وحافة طاولة، وعملات أو أثقال صغيرة، وشريط لاصق، ومسطرة ثانية للقياس.
- معكرونة سباغيتي جافة، وميزان مطبخ، ومشابك ورق، ونظارات واقية.
- برنامج جداول بيانات لمختبرات المواد وجسم الطائرة والمواد المركبة.

جدول مقترح من 15 أسبوعًا

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

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
1	أحمال الطيران ومعاملات الأمان والمواد	مسارات الأحمال، ومعاملات الحمل، ومعاملات الأمان، والمواد؛ المختبر A	FAA PHAK Ch. 3
2	أحمال القص والانحناء في الجناح	مخططات القص والانحناء في الجناح	MIT 16.01
3	انحناء العوارض رقيقة الجدران	إجهاد الانحناء والمقاطع المثالية؛ المختبر B	MIT 16.20

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
4	انحناء العوارض رقيقة الجدران	تحجيم شفاه العارضة، والانحناء غير المتماثل	MIT 16.20
5	الالتواء وتدفق القص في المقاطع المغلقة	الالتواء وتدفق القص في المقاطع المغلقة	MIT 16.20
6	القص في المقاطع المفتوحة ومركز القص	المقاطع المفتوحة ومركز القص	MIT 16.20
7	انبعاج الأعمدة والمقويات الطولية والألواح	انبعاج الأعمدة؛ تدريب لامتحان منتصف الفصل	MIT 16.20
8	انبعاج الأعمدة والمقويات الطولية والألواح	انبعاج الألواح والألواح المقوّاة؛ المختبر C	MIT 16.20
9	أجسام الطائرات المضغوطة والقشور الرقيقة	أجسام الطائرات المضغوطة؛ المختبر D	FAA PHAK Ch. 3
10	المواد المركبة والصفائح الطبقية	الألياف والمصفوفات وقاعدة الخلائط	MIT 3.032
11	المواد المركبة والصفائح الطبقية	الصفائح الطبقية والتصنيع؛ المختبر E	NASA HiCAM
12	الكلال والكسر وتحمل الضرر	الكلال وقاعدة ماينر	MIT 3.032
13	الكلال والكسر وتحمل الضرر	الكسر وتحمل الضرر؛ المختبر F	MIT 3.032
14	التصميم الخفيف والهياكل المستدامة	الوزن والوقود ومؤشرات المواد	المواد الخفيفة لدى وزارة الطاقة
15	التصميم الخفيف والهياكل المستدامة	دورة الحياة والهياكل المستدامة؛ تدريب للامتحان النهائي	NASA; DOE

تقدّمك

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

الوحدات

أحمال الطيران ومعاملات الأمان والمواد

الأجزاء الهيكلية للطائرة ومسارات أحمالها، ومعاملات الحمل، والأحمال الحدية والقصوى، ومعامل الأمان 1.5، وهامش الأمان، واختيار المواد بحسب الجساءة النوعية والمتانة النوعية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- تتبع مسار الحمل عبر الجناح وجسم الطائرة والذيل.
- حساب الأحمال الحدية والقصوى من معامل الحمل.
- حساب هامش الأمان.
- مقارنة المواد بحسب الجساءة والمتانة النوعيتين.

المفاهيم الأساسية

- ينتقل الرفع على كسوة الجناح إلى المقويات الطولية والأضلاع، ثم إلى العوارض، ثم عبر صندوق الجناح إلى جسم الطائرة. ويُحجَّم كل جزء من الطائرة باتباع مسار الحمل هذا.
- تتغير الأحمال مع معامل الحمل n = L/W. والحمل الحدي هو أكبر حمل متوقع في الخدمة (مثلًا n = 2.5 لكثير من طائرات النقل)؛ ويجب أن يتحمله الهيكل دون تشوه دائم.
- الحمل الأقصى هو الحمل الحدي مضروبًا في معامل أمان، تقليديًا 1.5 في الطيران؛ ويجب أن يتحمله الهيكل دون انهيار، ولو لبضع ثوانٍ فقط.
- هامش الأمان = MS المسموح/الفعلي − 1. الهامش الموجب مقبول؛ ويسعى المصممون إلى هوامش موجبة صغيرة لأن الهامش الزائد يعني وزنًا زائدًا.
- لأن الوزن مهم، تُقارن المواد لكل كيلوغرام: الجساءة النوعية E/ρ والمتانة النوعية σ/ρ. للألومنيوم والتيتانيوم والفولاذ قيمة E/ρ متقاربة جدًا؛ وتتفوق مركبات الكربون عليها جميعًا.

المعادلات الأساسية

$$n = \frac{L}{W}$$

`n=L/W`

معامل الحمل

$$P_{ult} = 1.5\,P_{limit}$$

`P_ult=1.5 P_limit`

الحمل الأقصى

$$MS = \frac{\sigma_{allow}}{\sigma} - 1$$

`MS=σ_allowσ-1`

$$\frac{E}{\rho},\ \frac{\sigma}{\rho}$$

الجساءة والمتانة النوعيتان

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 1.1 تزن طائرة الركاب المثال 588.6 kN ومعامل حملها الحدي 2.5. أوجد الحملين الحدي والأقصى على الجناح.

1. الحدي = 588.6 × 2.5 = 1471.5 kN.
2. الأقصى = 1471.5 × 1.5 =.

الإجابة: الحدي 1471.5 kN؛ والأقصى 2207 kN.

مثال 1.2 جزء من سبيكة 7075 (σ_y = 503 MPa) يتعرض لـ400 MPa عند الحمل الحدي. أوجد هامش الأمان بالنسبة إلى الخضوع.

1. MS = 503/400 − 1.

الإجابة: MS = 0.258 (موجب، إذن مقبول).

مثال 1.3 قارن الجساءة النوعية لألومنيوم 7075 والصفيحة الكربونية المثال.

1. Al: 71.7 × 10^9/2810 = 25.5 MJ/kg.
2. CFRP: 70 × 10^9/1600 = 43.75 MJ/kg.

الإجابة: الصفيحة أكثر جساءة بـ1.71 مرة لكل كيلوغرام.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد المتانة النوعية لألومنيوم 7075.

   503 × 10^6/2810 = 179 kN·m/kg.

2. أوجد المتانة النوعية لـTi-6Al-4V.

   880 × 10^6/4430 = 199 kN·m/kg.

3. أوجد E/ρ لفولاذ 4130.

$205 \times 10^9 / 7850 = 26.1$ MJ/kg، تقريبًا مثل الألومنيوم.

4. ماذا يعني MS = −0.1؟

الجزء لا يستوفي المتطلب؛ أعد تصميمه.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: معامل الأمان الأكبر أفضل دائمًا.
في الحقيقة: إنه يضيف وزنًا واستهلاك وقود طوال العمر.

خرافة: الفولاذ أكثر جساءة، لذا يصنع طائرات أكثر جساءة.
في الحقيقة: لكل كيلوغرام ليس أكثر جساءة من الألومنيوم.

خرافة: الحمل الأقصى هو الحمل المتوقع.
في الحقيقة: الحمل الحدي هو الأقصى المتوقع؛ والحمل الأقصى 1.5 ضعفه.

بطاقات تعليمية

معامل الحمل

$n = L/W$.

الحمل الحدي

أكبر حمل متوقع في الخدمة.

الحمل الأقصى

1.5 × الحدي.

هامش الأمان

$\sigma_{allow}/\sigma - 1$.

الجساءة النوعية

E/ρ.

المتانة النوعية

σ/ρ.

اختبار ذاتي

1. الحمل الأقصى يساوي...

- 1.5 × الحدي
- الحدي
- 2 × الحدي

الحدي 1.5/

× 1.5 الحدي. معامل الأمان في الطيران.

2. الجساءة النوعية هي...

E/ρ

Eρ

σ/E

ρ/E

E/ρ. لكل وحدة كتلة.

3. هامش الأمان الموجب يعني أن...

الجزء مقبول

الجزء ينهار

الجزء خفيف جدًا

لا شيء

الجزء مقبول. المسموح يتجاوز الفعلي.

4. يصل الرفع إلى جسم الطائرة أساسًا عبر...

العوارض وصندوق الجناح

النوافذ

المحركات

عجلات الهبوط

العوارض وصندوق الجناح. مسار الحمل.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يفيد برنامج المواد الخفيفة في وزارة الطاقة الأمريكية بأن خفض وزن السيارات والشاحنات بنسبة 10% قد يحسّن كفاءة الوقود بنسبة 6% إلى 8%، لأن تسريع جسم أخف يتطلب طاقة أقل. وتذكر الوزارة تخفيضات كتلة نموذجية بنسبة 50–70% لمركبات ألياف الكربون، و30–60% للألومنيوم، و40–55% للتيتانيوم عندما تحل محل أجزاء الفولاذ التقليدي.

تكسب الطائرات من توفير الوزن أكثر مما تكسبه السيارات، لأنها يجب أن تحمل وزنها في الجو طوال الرحلة. واختيار المواد بحسب الجساءة والمتانة النوعيتين هو نقطة بداية هذا التوفير.

على Saving Planets: ميكانيكا المواد · الحلول

المصادر: U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks)

مصادر تعلّم مجانية

- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): فصل FAA عن أجزاء هيكل الطائرة.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): ملاحظات MIT عن الهياكل.
- PhET: Hooke’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/hookes-law): الجساءة بشكل تفاعلي.

أنهيت هذه الوحدة

أحمال القص والانحناء في الجناح

الجناح عارضةً ناتئة، وتوزيعات الرفع على امتداد الباع، ومخططات قوة القص وعزم الانحناء، وأحمال الجذر، والتخفيف الناتج عن وزن الجناح والوقود، وكيف يضاعف معامل الحمل كل شيء.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- نمذجة الجناح عارضةً ناتئة.
- رسم مخططي القص وعزم الانحناء لرفع موزع.
- حساب القص وعزم الانحناء عند الجذر.
- شرح تخفيف الانحناء الناتج عن الوقود والمحركات على الجناح.

المفاهيم الأساسية

- يحمل كل نصف جناح نصف الرفع ويعمل كعارضة ناتئة مثبتة عند جسم الطائرة. ويكون القص والعزم في أقصاهما عند الجذر.
- لرفع منتظم w (N/m) على نصف باع s، يكون القص عند الجذر V = ws والعزم عند الجذر M = ws²/2.
- يضع توزيع الرفع الإهليلجي مركز نصف الرفع على بعد 4s/(3π) من الجذر، أقرب قليلًا إلى الداخل من s/2 في الحالة المنتظمة، لذا يكون عزم الجذر أقل.
- يثقل هيكل الجناح والوقود على الجناح عكس اتجاه الرفع. وهذا التخفيف في الانحناء هو سبب حمل طائرات الركاب الوقود في الأجنحة وسبب فائدة المحركات المثبتة على الجناح.
- كل الأحمال تتغير مع معامل الحمل: عند n = 2.5 يكون عزم الجذر 2.5 ضعف قيمته عند g-1.

المعادلات الأساسية

$$V(y) = \int_{y}^{s} w \, dy$$

V(y)=_y^s w dy

القص من حمل موزع

$$M(y) = \int_{y}^{s} V \, dy$$

M(y)=_y^s V dy

العزم من القص

$$M_{root} = \tfrac{1}{2} w s^2$$

M_root=12ws^2

رفع منتظم

$$M_{root} = \frac{L}{2} \cdot \frac{4s}{3\pi}$$

```
M_root=2·4s3π
```

رفع إهليلجي

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 2.1 طائرة الركاب المثال (588.6 kN) نصف باعها 17 m. بافتراض رفع منتظم عند 1 g، أوجد w والقص والعزم عند الجذر لجناح واحد.

1. نصف الرفع = 294.3 kN؛ $w = 294300/17 = 17.31$ kN/m.
2. $V = 294.3$ kN.
3. $M = 17{,}312 \times 17^2/2$.

الإجابة: $w = 17.31$ kN/m; $V = 294.3$ kN; $M = 2.50$ MN·m.

مثال 2.2 أعد حساب العزم للتوزيع الإهليلجي.

1. $M = 294{,}300 \times 4 \times 17/(3\pi)$.

الإجابة: $M = 2.12$ MN·m، أقل بنسبة 15.1%.

مثال 2.3 أوجد عزم الجذر للرفع المنتظم عند الحمل الحدي (n = 2.5) والأقصى (1.5×).

1. الحدي: $2.50 \times 2.5 = 6.25$ MN·m.
2. الأقصى: 6.25×1.5.

الإجابة: الحدي 6.25 MN·m؛ والأقصى 9.38 MN·m.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. نصّف نصف الباع مع الرفع نفسه. ما عزم الجذر؟

   ينخفض إلى النصف ($M = Ls/4$ للرفع المنتظم).

2. أوجد نسبة العزم، الإهليلجي إلى المنتظم.

   $8/(3\pi) = 0.849$.

3. لماذا تستخدم طائرات الركاب وقود الجناح أولًا أو أخيرًا؟

الوقود في الجناح يخفف الانحناء؛ والإبقاء عليه أطول مدة يساعد.

4. القص عند الجذر عند n = 2.5؟

2.5 × 294.3 = 735.8 kN.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: طرف الجناح يحمل أكبر الأحمال.
في الحقيقة: الجذر هو الذي يحملها.

خرافة: وزن الجناح يضاف إلى عزم الانحناء.
في الحقيقة: إنه يخففه.

خرافة: العزم يتغير مع نصف الباع.
في الحقيقة: عند w ثابت يتغير مع s^2.

بطاقات تعليمية

جناح ناتئ

مثبت عند الجذر.

القص عند الجذر

نصف الرفع.

عزم الجذر للرفع المنتظم

$ws^2/2$.

المركز الإهليلجي

$4s/(3\pi)$.

تخفيف الانحناء

وزن الجناح والوقود.

معامل الحمل

يضاعف كل الأحمال.

اختبار ذاتي

1. عزم الجذر لرفع منتظم w على باع s يساوي...

$ws^2/2$

ws

ws^3

w/s

$ws^2/2$. عارضة ناتئة.

2. مركز الرفع الإهليلجي على بعد...

$4s/(3\pi)$

s/2

s

s/3

$4s/(3\pi)$. من الجذر.

3. الوقود في الجناح...

يخفف الانحناء

يزيد الانحناء

لا يفعل شيئًا

يضيف التواءً فقط

يخفف الانحناء. يعمل عكس الرفع.

4. مضاعفة n تضاعف...

كل الأحمال

القص فقط

الوزن فقط

لا شيء

كل الأحمال. خطي.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

قطعة الاختبار SWEET-15 من NASA جناح مركب طوله 15 قدمًا تدعمه دعامة انسيابية، مبني على مفهوم Transonic Truss-Braced Wing من NASA. وتحمل الدعامة جزءًا من حمل الانحناء قرب منتصف الباع، فيمكن أن يكون الجناح طويلًا ورفيعًا دون عزم جذر هائل.

أحنى مهندسو NASA جناح الاختبار عدة أشهر في Flight Loads Laboratory في Armstrong، باستخدام عدد كبير من حساسات الانفعال والحمل، منها حساسات انفعال بالألياف الضوئية. وأكدت البيانات تنبؤات النماذج الحاسوبية وبيّنت أن الجناح تحمّل القوى المتوقعة أثناء الطيران.

على Saving Planets: الاستاتيكا · أداء الطائرات

المصادر: NASA: NASA Pushes New Wing Design to Find Structural Limits (Jul. 17, 2026) (https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/nasa-pushes-new-wing-design-to-find-structural-limits/)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP1, 12.2 Examples of static equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-2-examples-of-static-equilibrium): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات MIT عن العوارض.
- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): الهياكل في MIT.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): فصل FAA عن الأجنحة.

أنهيت هذه الوحدة

انحناء العوارض رقيقة الجدران

إجهاد الانحناء σ = My/I، وتمثيل صندوق الجناح بشفاه وكسوات مثالية، وعزم المساحة الثاني، وقوى الشفاه، والانحناء غير المتماثل، وتحجيم شفاه العوارض للحمل الأقصى.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب إجهاد الانحناء من M وy وI.
- تمثيل عارضة صندوقية بمساحات شفاه مركّزة.
- تحجيم شفاه العوارض لعزم أقصى.
- التعرف على الانحناء غير المتماثل.

المفاهيم الأساسية

- في الانحناء σ = My/I: يزداد الإجهاد خطيًا من المحور المحايد. والمادة البعيدة عن المحور المحايد تقوم بمعظم العمل.
- تُمثَّل صناديق الأجنحة بمساحات شفاه مركّزة (أذرع) تحمل الإجهاد المباشر، تربطها كسوات رقيقة تحمل القص.
- لشفتين مساحة كل منهما A يفصل بينهما عمق h، I = 2A(h/2)² = Ah²/2 وقوة الشفة F = M/h.
- تحتاج صناديق الأجنحة الأعمق إلى شفاه أصغر للعزم نفسه. ولهذا توفر جذور الأجنحة السميكة الوزن، ولهذا تحتاج الأجنحة الرفيعة ذات نسبة الباع العالية إلى مساعدة مثل الدعامات.
- إذا لم يكن المقطع متماثلًا، أو لم يكن العزم حول محور رئيسي، فإن الانحناء حول محور يسبب انحرافًا حول المحور الآخر (انحناء غير متماثل).

المعادلات الأساسية

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

σ=My/I

إجهاد الانحناء

$$I = \sum A_i y_i^2$$

I= A_iy_i^2

مقطع مثالي بالأذرع

$$F = \frac{M}{h}$$

F=M/h

قوة الشفة

$$A = \frac{M}{\sigma_{allow} h}$$

A=σ_allowh

مساحة الشفة المطلوبة

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 3.1 عزم الجذر الأقصى 9.38 MN·m وعمق صندوق الجناح 0.6 m. أوجد قوة الشفة.

1. $F = 9.38 \times 10^6 / 0.6$.

الإجابة: $F = 15.6$ MN.

مثال 3.2 حجّم كل شفة لإجهاد مسموح 400 MPa.

1. $A = 9.38 \times 10^6 / (400 \times 10^6 \times 0.6)$.

الإجابة: $A = 0.0391$ m² (391 cm²) لكل شفة.

مثال 3.3 أوجد I لشفتين مساحة كل منهما 0.0391 m² يفصل بينهما 0.6 m، وتحقق من σ.

1. $I = 0.0391 \times 0.6^2/2 = 0.00704$ m⁴.
2. $\sigma = 9.38 \times 10^6 \times 0.3 / 0.00704$.

الإجابة: σ = 400 MPa، كما صُمِّم.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ضاعف عمق الصندوق. ما مساحة الشفة المطلوبة؟

   تنخفض إلى النصف.

2. أين يكون إجهاد الانحناء صفرًا؟

   عند المحور المحايد.

3. أوجد I لشفاه مساحتها 0.01 m² عند ±0.25 m.

   $2 \times 0.01 \times 0.25^2 = 0.00125$ m⁴.

4. لماذا توضع شفاه العوارض في الأعلى والأسفل؟

أكبر y يعطي أكبر I لكل كيلوغرام.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الكسوات الرقيقة تحمل معظم الانحناء.
في الحقيقة: في التمثيل المثالي، تحمل الشفاه والمقويات الطولية الإجهاد المباشر؛ وتحمل الكسوات القص.

خرافة: الإجهاد منتظم عبر العارضة.
في الحقيقة: يتغير خطيًا مع y.

خرافة: العارضة الأعمق أثقل.
في الحقيقة: عادة تحتاج إلى مادة أقل في الشفاه.

بطاقات تعليمية

الانحناء

σ = My/I.

تمثيل الأذرع

الشفاه تحمل σ، والكسوات تحمل q.

I بشفتين

Ah²/2.

قوة الشفة

M/h.

العمق

الأعمق أخف.

الانحناء غير المتماثل

انحرافات مقترنة.

اختبار ذاتي

1. إجهاد الانحناء يساوي...

My/I

M/A

VQ/It

Tr/J

My/I. صيغة الانحناء.

2. قوة الشفة لعمق h تساوي...

M/h

Mh

M/h^2

Vh

M/h. مزدوجة.

3. الصناديق الأعمق تحتاج إلى...

شفاه أصغر

شفاه أكبر

كما هي

لا شفاه

شفاه أصغر. $A \propto 1/h$.

4. في الصناديق المثالية، تحمل الكسوات...

قص

الإجهاد المباشر فقط

لا شيء

الالتواء فقط

قص. ألواح قص.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تصف NASA الجناح المدعّم بأنه جناح طويل ورفيع بدعامات هيكلية انسيابية الشكل، قد يخفض الوقود وتكاليف التشغيل لطائرات الركاب المستقبلية. واختبرت NASA وبوينغ نموذج نصف باع للمفهوم في نفق رياح كبير مضغوط في ديسمبر 2025.

الجناح الرفيع له صندوق ضحل، فبحسب F = M/h يجب أن تكون شفاهه ثقيلة. والدعامة تخفض M، مما يسمح للجناح بالبقاء رفيعًا دون أن يثقل.

على Saving Planets: ميكانيكا المواد · الديناميكا الهوائية 1

المصادر: NASA: NASA, Boeing Advance Truss-Braced Wing Research in Test (Apr. 29, 2026) (https://www.nasa.gov/image-article/nasa-boeing-advance-truss-braced-wing-research-in-test/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): ملاحظات MIT عن انحناء العوارض.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات MIT.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): فصل FAA عن العوارض.

أنهيت هذه الوحدة

الالتواء وتدفق القص في المقاطع المغلقة

تدفق القص q، والتواء بريدت–باثو للمقاطع المغلقة رقيقة الجدران، وإجهاد القص في الكسوة، ومعدل الالتواء، والصناديق متعددة الخلايا، ولماذا تُبنى الأجنحة صناديق مغلقة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- استخدام تدفق القص q = τt.
- تطبيق بريدت–باثو: T = 2Aq.
- حساب معدل التواء مقطع مغلق.
- شرح لماذا تقاوم المقاطع المغلقة الالتواء جيدًا.

المفاهيم الأساسية

- في الجدار الرقيق، إجهاد القص مضروبًا في السماكة هو تدفق القص q = τt (N/m). وحول مقطع مغلق يحمل عزم التواء خالصًا يكون q ثابتًا.
- بريدت–باثو: T = 2A_e q، حيث A_e المساحة المحصورة بخط منتصف الجدار.
- معدل الالتواء dθ/dz = (T/(4A_e²G)) ∮ ds/t.
- الصناديق المغلقة أكثر جساءة في الالتواء بكثير من المقاطع المفتوحة من المادة نفسها، ولهذا تُبنى الأجنحة صناديق التواء من العوارض والكسوات.
- ينشأ التواء الجناح من الرفع المؤثر أمام مركز القص أو خلفه، ومن الجنيحات والمحركات. وقلة الجساءة الالتوائية قد تسبب انعكاس الجنيحات أو الرفرفة.

المعادلات الأساسية

$$q = \tau t$$

```
q=τ t
```

تدفق القص

$$T = 2A_e q$$

```
T=2A_eq
```

بريدت–باثو

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{T}{4A_e^2 G} \oint \frac{ds}{t}$$

```
(dθ)/(dz)=(T)/(4A_e^2G)ds/t
```

معدل الالتواء

$$\tau = \frac{T}{2A_e t}$$

τ=(T)/(2A_et)

إجهاد القص في الكسوة

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 4.1 صندوق جناح أبعاده 0.6 m × 2.0 m يحمل عزم التواء 500 kN·m. أوجد تدفق القص.

1. $A_e = 1.2\ \text{m}^2$.
2. $q = 500{,}000/(2 \times 1.2)$.

الإجابة: $q = 208.3\ \text{kN/m}$.

مثال 4.2 أوجد إجهاد القص في كسوات سماكتها 4 mm.

1. $\tau = 208{,}333/0.004$.

الإجابة: $\tau = 52.1\ \text{MPa}$.

مثال 4.3 أوجد معدل الالتواء (G = 27 GPa، جدار منتظم سماكته 4 mm).

1. $\oint ds/t = 5.2/0.004 = 1300$.
2. $d\theta/dz = 500{,}000 \times 1300/(4 \times 1.2^2 \times 27 \times 10^9)$.

الإجابة: $d\theta/dz = 4.18 \times 10^{-3}\ \text{rad/m}$.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أنبوب رقيق نصف قطره 0.1 m وسماكة جداره 2 mm يحمل 10 kN·m. أوجد τ.

   $T/(2\pi r^2 t) = 79.6\ \text{MPa}$.

2. أوجد J لذلك الأنبوب.

   $2\pi r^3 t = 1.257 \times 10^{-5}\ \text{m}^4$.

3. ضاعف المساحة المحصورة مع عزم الالتواء نفسه. ما تدفق القص؟

تنخفض إلى النصف.

4. لماذا يدمّر شقٌّ في أنبوب جساءته الالتوائية؟

يصبح مقطعًا مفتوحًا.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: يتغير تدفق القص حول المقطع المغلق في الالتواء الخالص.
في الحقيقة: إنه ثابت.

خرافة: الكسوات الأسمك هي دائمًا الأكثر فائدة للالتواء.
في الحقيقة: المساحة المحصورة أهم.

خرافة: المقاطع المفتوحة والمغلقة متشابهة في الالتواء.
في الحقيقة: المغلقة أكثر جساءة بأضعاف كثيرة.

بطاقات تعليمية

تدفق القص

.q = τt

بريدت–باثو

.T = 2A_e q

معدل الالتواء

.ds/t/(4A_e²G)∮T

صندوق الالتواء

عوارض وكسوات مغلقة.

أنبوب رقيق

.τ = T/(2πr²t)

الرفرفة

تحتاج إلى جساءة التوائية.

اختبار ذاتي

1. يعطي بريدت–باثو T = ...

2Aq

Aq

qt

q/A

2Aq. مقطع مغلق.

2. تدفق القص هو...

τt

τ/t

σt

T/A

τt. التعريف.

3. تُبنى الأجنحة صناديق مغلقة من أجل...

الجساءة الالتوائية

المظهر

الوقود فقط

الرفع

الجساءة الالتوائية. صندوق الالتواء.

4. في الالتواء الخالص يكون q...

ثابت

صفر

أكبر عند الزوايا

عشوائيًا

ثابت. التوازن.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تفيد NASA بأن SWEET-15 جمع خمس تقنيات متقدمة لتصنيع المواد المركبة وتجميعها، وأن نهج التصنيع، الذي طُوّر في Langley باستخدام روبوت Integrated Structural Assembly of Advanced Composites، يهدف إلى إنتاج هياكل مركبة أخف وأقوى للمركبات الفضائية الجوية.

لا يزال على صندوق الجناح المركب أن يحقق بريدت–باثو: فالوصلات بين الكسوات والعوارض تنقل تدفق القص الذي يمنع الصندوق من الالتواء.

على Saving Planets: ميكانيكا المواد · الديناميكا

المصادر: NASA: NASA Pushes New Wing Design to Find Structural Limits (Jul. 17, 2026) (https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/nasa-pushes-new-wing-design-to-find-structural-limits/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): ملاحظات MIT عن الالتواء.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات MIT.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): فصل FAA عن بنية الجناح.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): قسم من كتاب مدرسي مجاني.

أنهيت هذه الوحدة

القص في المقاطع المفتوحة ومركز القص

إجهاد القص في العوارض τ = VQ/(It)، وتدفق القص في المقاطع المفتوحة رقيقة الجدران، ومركز القص، ولماذا تلتوي المقاطع على شكل C تحت الحمل، وتأخر القص.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- استخدم τ = VQ/(It).
- إيجاد تدفق القص في مقطع مفتوح رقيق الجدران.
- تحديد موضع مركز القص نوعيًا.
- شرح لماذا تسبب الأحمال البعيدة عن مركز القص التواءً.

المفاهيم الأساسية

- يولّد القص العرضي إجهاد قص τ = VQ/(It)، حيث Q العزم الأول للمساحة بعد القطع.
- في المقاطع المفتوحة رقيقة الجدران يبدأ تدفق القص من الصفر عند حافة حرة ويتراكم على طول الجدار: q = VQ/I.
- مركز القص هو النقطة التي يسبب عندها الحمل العرضي انحناءً دون التواء. في العوارض I المتماثلة والصناديق المغلقة يقع على محور التماثل؛ وفي المقطع C يقع خارج الجذع.
- الأحمال المؤثرة بعيدًا عن مركز القص تلوي المقطع. ويضع المصممون العوارض والمقويات الطولية بحيث يقع مركز قص الجناح حيث تؤثر الأحمال الديناميكية الهوائية، أو يوفرون جساءة التوائية كافية.
- تأخر القص: في الشفاه العريضة يكون الإجهاد المباشر أعلى قرب الجذوع وأقل بينها، فلا تكون الشفة كلها فعالة تمامًا.

المعادلات الأساسية

$$\tau = \frac{VQ}{It}$$

τ=VQ/It

إجهاد القص في العارضة

$$q = \frac{VQ}{I}$$

q=VQ/I

تدفق القص

$$Q = \int y \, dA$$

Q= y dA

العزم الأول للمساحة

$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A}$$

τ_max=3V/2A

مستطيل، القيمة القصوى

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 5.1 عارضة مستطيلة مصمتة عرضها 20 mm وعمقها 60 mm تحمل قصًا 6 kN. أوجد أقصى إجهاد قص.

1. A = 1200 mm².
2. τ_max = 1.5 × 6000/1200.

الإجابة: τ_max = 7.5 MPa عند المحور المحايد.

مثال 5.2 سماكة جذع عارضة I هي 4 mm؛ وعند المحور المحايد Q = 50 × 10³ mm³ و I = 20 × 10⁶ mm⁴. أوجد τ عند V = 40 kN.

1. τ = 40,000 × 50,000/(20 × 10⁶ × 4).

الإجابة: τ = 25 MPa.

مثال 5.3 أوجد تدفق القص هناك.

1. q = τt = 25 × 4.

الإجابة: q = 100 N/mm (100 kN/m).

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أين يكون تدفق القص صفرًا في مقطع مفتوح؟

   عند الحواف الحرة.

2. مركز القص لصندوق مغلق متماثل تحت حمل متماثل؟

   على محور التماثل.

3. لماذا يلتوي المقطع C عندما يُحمَّل عبر جذعه؟

مركز القص يقع خارج الجذع.

4. ضاعف V على المستطيل. ما τ_max؟

15 MPa.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: يكون إجهاد القص أكبر عند الألياف الخارجية.
في الحقيقة: يكون أكبر عند المحور المحايد.

خرافة: مركز القص هو المركز الهندسي.
في الحقيقة: فقط في المقاطع المتماثلة تماثلًا مزدوجًا.

خرافة: الشفاه العريضة فعالة تمامًا.
في الحقيقة: تأخر القص يقلل فعاليتها.

بطاقات تعليمية

معادلة القص

τ = VQ/(It).

مقطع مفتوح

يبدأ q من الصفر عند الحواف الحرة.

مركز القص

نقطة الحمل دون التواء.

مقطع C

مركز القص خارج الجذع.

المستطيل

τ_max = 1.5V/A.

تأخر القص

إجهاد غير منتظم في الشفة.

اختبار ذاتي

1. إجهاد القص في العارضة هو...

VQ/(It)

My/I

Tr/J

P/A

VQ/(It). معادلة القص.

2. عند حافة حرة يكون تدفق القص في المقطع المفتوح...

صفر

أقصى ما يمكن

ثابت

سالبة

صفر. شرط حدّي.

3. التحميل عبر مركز القص يسبب...

لا التواء

تلتوي

انبعاجًا

خضوعًا

لا التواء. التعريف.

4. τ_max في المستطيل هو...

1.5V/A

V/A

2V/A

3V/A

1.5V/A. قطع مكافئ.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

انتهى اختبار SWEET-15 لدى NASA باختبار متعمد حتى الانهيار. فقد انهار الجناح عند نحو 127% من حمله الحدي التصميمي، مع ضرر ظاهر قرب الحافة الخلفية للجناح وفي الكسوة العلوية، ما أتاح فهم سلوك الوصلات مع الدعامة الرئيسية والدعامة المساعدة خارج غلاف الطيران.

تشير NASA إلى أنها المرة الأولى التي يخضع فيها تكوين تمثيلي لجناح مركب مدعوم بجملون لهذا النوع من التقييم الإنشائي. ومثل هذه الاختبارات تتحقق تحديدًا من تنبؤات القص والالتواء في الوحدتين 4 و5.

على Saving Planets: ميكانيكا المواد · الاستاتيكا

المصادر: NASA: NASA Pushes New Wing Design to Find Structural Limits (Jul. 17, 2026) (https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/nasa-pushes-new-wing-design-to-find-structural-limits/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): ملاحظات MIT عن تدفق القص.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات MIT.
- OpenStax UP1, 12.2 Examples of static equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-2-examples-of-static-equilibrium): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): قسم من كتاب مدرسي مجاني.

أنهيت هذه الوحدة

انبعاج الأعمدة والمقويات الطولية والألواح

انبعاج أويلر للأعمدة وشروط الأطراف، والنحافة، والمقويات الطولية بوصفها أعمدة، وانبعاج ألواح الكسوة، ومقاومة ما بعد الانبعاج للألواح المقواة، ولماذا تُحدَّد أبعاد الهياكل الخفيفة عادةً بالاستقرار.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب أحمال انبعاج أويلر مع معاملات تثبيت الأطراف.
- حساب إجهاد انبعاج لوح الكسوة.
- شرح لماذا تحمل الألواح المقواة الحمل بعد انبعاج الكسوة.
- تمييز الحالات التي يتحكم فيها الانبعاج لا الخضوع.

المفاهيم الأساسية

- ينبعج العمود النحيف عند P_cr = π²EI/(KL)²، حيث K = 1 للأطراف المفصلية، و0.5 للأطراف المثبتة، و2 للكابول.
- يعتمد الانبعاج على الجساءة E والهندسة لا على المقاومة، لذا لا تفيد المواد عالية المقاومة العمود النحيف.
- تنبعج الصفيحة المستوية الرقيقة تحت الضغط عند σ_cr = kπ²E/(12(1 − ν²)) (t/b)²، مع k = 4 للوح طويل بسيط الارتكاز.
- يُسمح لكسوات الطائرات بالانبعاج تحت القص أو الضغط عند أحمال أقل بكثير من الحمل الأقصى؛ ثم تحمل المقويات الطولية والعوارض الحمل (حقل الشد وسلوك ما بعد الانبعاج).
- لأن الهياكل الخفيفة رقيقة، يحدد الانبعاج عادةً أبعاد الكسوات المضغوطة والمقويات الطولية وجذوع العوارض.

المعادلات الأساسية

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{(K L)^2}$$

P_cr=(π^2EI)/((KL)^2)

انبعاج أويلر

$$\sigma_{cr} = \frac{k \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

σ_cr=(kπ^2E)/(12(1-ν^2))(tb)^2

انبعاج الصفائح

$$\lambda = \frac{K L}{r}$$

=KL/r

النحافة

$$r = \sqrt{I/A}$$

نصف قطر التدويم

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 6.1 مقوٍّ طولي من الألومنيوم ($E = 71.7$ GPa، $I = 2 \times 10^{-8}$ m⁴) يمتد 0.5 m بين الأضلاع، بأطراف مفصلية. أوجد P_{cr}.

1. $P_{cr} = \pi^2 \times 71.7 \times 10^9 \times 2 \times 10^{-8} / 0.5^2$.

الإجابة: $P_{cr} = 56.6$ kN.

مثال 6.2 أعد الحساب بأطراف مثبتة ($K = 0.5$).

1. أربعة أضعاف القيمة المفصلية.

الإجابة: $P_{cr} = 226$ kN.

مثال 6.3 أوجد إجهاد انبعاج لوح كسوة سماكته 2 mm وعرضه 150 mm ($k = 4$، $\nu = 0.33$).

1. $\sigma_{cr} = 4\pi^2 \times 71.7 \times 10^9 / (12 \times 0.891) \times (0.002/0.15)^2$.

الإجابة: $\sigma_{cr} = 47.1$ MPa، أقل بكثير من حد الخضوع 503 MPa.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. نصّف المسافة بين الأضلاع. ما حمل انبعاج المقوي؟

   أربعة أضعاف.

2. ضاعف سماكة الكسوة. ما σ_{cr}؟

   أربعة أضعاف: 188 MPa.

3. هل ترفع سبيكة أقوى لها E نفسه قيمة P_{cr}؟

   No.

4. ما K لسارية علم (كابول)؟

.2

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الانبعاج انهيار في المقاومة.
في الحقيقة: إنه انهيار في الجساءة (الاستقرار).

خرافة: الكسوة المنبعجة تعني جناحًا منهارًا.
في الحقيقة: الألواح المقواة تحمل الحمل بعد انبعاج الكسوة.

خرافة: الأعمدة الأطول تنبعج عند حمل أقل بالتناسب.
في الحقيقة: بنسبة $1/L^2$، أقل بكثير.

بطاقات تعليمية

أويلر

$\pi^2EI/(KL)^2$.

K

مفصلي 1، مثبت 0.5، كابول 2.

اللوح

$k\pi^2E(t/b)^2/(12(1-\nu^2))$.

k

4 لصفيحة طويلة مرتكزة.

ما بعد الانبعاج

المقويات تحمل الحمل.

النحافة

KL/r.

اختبار ذاتي

1. يتناسب حمل أويلر مع...

$1/L^2$

$1/L$

L

L^2

$1/L^2$. π^2EI/L^2.

2. الأطراف المثبتة تضرب P_cr في...

4

2

0.5

1

.4. K = 0.5

3. يتناسب إجهاد انبعاج الصفيحة مع...

$(t/b)^2$

t/b

b/t

t

$(t/b)^2$. معادلة الصفائح.

4. يعتمد الانبعاج على...

E والهندسة

مقاومة الخضوع

الكثافة

اللون

E والهندسة. الاستقرار.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يُدرج مشروع HiCAM لدى NASA حقن الراتنج ضمن التقنيات التي يقيّمها: قولبة سائلة يمكنها صنع هياكل كبيرة متكاملة بعدد أقل من المثبتات، ولدائن حرارية يمكن صهرها ولحامها للوصل السريع.

الألواح المقواة المتكاملة، التي تُصنع فيها المقويات الطولية والكسوة قطعة واحدة، تقاوم الانبعاج دون وزن المثبتات والوصلات. وهذا أحد السبل إلى الهياكل المركبة الأخف التي يسعى إليها HiCAM.

على Saving Planets: ميكانيكا المواد · الجبر الخطي

المصادر: NASA: HiCAM Project Overview (Feb. 15, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mecha nics-fall-2002/): ملاحظات MIT عن الانبعاج.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات MIT.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): فصل FAA عن المقويات الطولية والكسوات.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): قسم من كتاب مدرسي مجاني.

أنهيت هذه الوحدة

أجسام الطائرات المضغوطة والقشور الرقيقة

ضغط المقصورة، والإجهادات المحيطية والمحورية في الأسطوانات الرقيقة، والحواجز الكروية، والضغط والانحناء معًا، والفتحات وتركز الإجهاد حول النوافذ والأبواب، والكلال الناتج عن دورات الضغط.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب الإجهادين المحيطي والمحوري في أسطوانة مضغوطة.
- إيجاد سماكة الكسوة اللازمة لإجهاد معين.
- شرح لماذا تكون النوافذ مستديرة.
- ربط دورات الضغط بالكلال.

المفاهيم الأساسية

- الأسطوانة الرقيقة ذات نصف القطر r والجدار t تحت فرق ضغط Δp لها إجهاد محيطي σ_h = Δp r/t وإجهاد محوري σ_a = Δp r/(2t): فالمحيطي ضعف المحوري.
- للقشرة الكروية σ = Δp r/(2t)، لذا يمكن أن تكون حواجز الضغط المقببة أرق من الأسطوانة.
- ينحني جسم الطائرة أيضًا تحت وزنه وأحمال الذيل، ما يضيف إلى الإجهاد المحوري في الأعلى أو الأسفل.
- تركّز فتحات النوافذ والأبواب الإجهاد؛ وتُبقي الزوايا المستديرة والصفائح المضاعِفة التركز منخفضًا. وقد تركّز الزوايا الحادة الإجهاد بمعامل ثلاثة أو أكثر.
- كل رحلة دورة ضغط واحدة. وعلى مدى عشرات الآلاف من الرحلات تؤدي هذه الدورات إلى تشقق الكلال، وهو موضوع الوحدة 9.

المعادلات الأساسية

$$\sigma_h = \frac{\Delta p\, r}{t}$$

σ_h=(Δ p r)/(t)

الإجهاد الطوقي

$$\sigma_a = \frac{\Delta p\, r}{2t}$$

σ_a=(Δ p r)/(2t)

الإجهاد المحوري

$$\sigma_{sphere} = \frac{\Delta p\, r}{2t}$$

σ_sphere=(Δ p r)/(2t)

القشرة الكروية

$$t = \frac{\Delta p\, r}{\sigma_{allow}}$$

```
t=Δ p rσ_allow
```

السماكة المطلوبة

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 7.1 جسم طائرة نصف قطره 2 m وكسوته 1.6 mm، وفرق ضغط المقصورة 55 kPa (قيمة نموذجية). أوجد الإجهادين المحيطي والمحوري.

1. σ_h = 55,000 × 2/0.0016.
2. σ_a = σ_h/2.

الإجابة: σ_h = 68.75 MPa; σ_a = 34.4 MPa.

مثال 7.2 ما السماكة التي تُبقي الإجهاد المحيطي عند 100 MPa؟

1. t = 55,000 × 2/100 × 10^{6}.

الإجابة: t = 1.1 mm (قبل هوامش الكلال وتحمل الضرر).

مثال 7.3 أوجد الإجهاد في حاجز نصف كروي بنصف القطر نفسه وسماكة 1.6 mm.

1. σ = 55,000 × 2/(2 × 0.0016).

الإجابة: σ = 34.4 MPa.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ضاعف نصف قطر جسم الطائرة بالكسوة نفسها. ما الإجهاد المحيطي؟

   تتضاعف.

2. لماذا تمتد شقوق جسم الطائرة غالبًا طوليًا؟

   الإجهاد المحيطي الذي يفتحها ضعف المحوري.

3. لماذا تكون نوافذ طائرات الركاب مستديرة؟

لخفض تركز الإجهاد.

4. اخفض فرق ضغط المقصورة بنسبة 20%. ما الإجهاد؟

أقل بنسبة 20%.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الإجهادان المحوري والمحيطي متساويان.
في الحقيقة: المحيطي ضعف المحوري.

خرافة: يمكن لجسم طائرة أكبر استخدام الكسوة نفسها.
في الحقيقة: يزداد الإجهاد مع نصف القطر.

خرافة: الضغط مهم في التطواف فقط.
في الحقيقة: كل دورة تضيف ضرر كلال.

بطاقات تعليمية

الإجهاد الطوقي

Δp r/t.

الإجهاد المحوري

Δp r/(2t).

الكرة

Δp r/(2t).

الفتحات

زوايا مستديرة وصفائح مضاعِفة.

دورة الضغط

واحدة لكل رحلة.

السماكة

Δp r/σ.

اختبار ذاتي

1. الإجهاد المحيطي هو...

Δp r/t

Δp r/(2t)

Δp t/r

Δp/t

Δp r/t. أسطوانة رقيقة.

2. نسبة المحيطي إلى المحوري هي...

2

1

0.5

4

2. أسطوانة.

3. النوافذ المستديرة تقلل...

تركز الإجهاد

الوزن فقط

الضغط

السحب

تركز الإجهاد. الهندسة.

4. كل رحلة هي...

دورة ضغط

حدث انبعاج

خضوعًا

لا شيء

دورة ضغط. الكلال.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يعمل مشروع HiCAM لدى NASA نحو عروض تصنيع واسعة النطاق لمقطع أسطواني من جسم طائرة مركب وصندوق جناح في 2028 و2029. وتشير NASA إلى أن المواد المركبة تُستخدم بالفعل في أجزاء كبيرة من الطائرات الحديثة، منها أقسام جسم الطائرة والجناح في طائرات مثل Boeing 787.

يحمل المقطع الأسطواني المركب الإجهادين المحيطي والمحوري نفسيهما اللذين يحملهما المقطع المعدني؛ والمكسب أن المواد المركبة تحملهما بكتلة أقل ولا تتآكل بالطريقة نفسها.

على Saving Planets: ميكانيكا المواد · الديناميكا الحرارية

المصادر: NASA: NASA Hosts 2026 Review on Advanced Composite Manufacturing (Jun. 4, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/nasa-hosts-2026-review-on-advanced-composite-manufacturing/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): ملاحظات MIT عن القشريات.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): فصل FAA عن أجسام الطائرات.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات MIT.

أنهيت هذه الوحدة

المواد المركبة والصفائح الطبقية

الألياف والمصفوفات، والكسر الحجمي للألياف، وقاعدة الخلائط للجساءة والكثافة، والجساءة العرضية، واتجاه الطبقات والصفائح المركبة، والتراصفات شبه المتماثلة الخواص، وتصنيع المواد المركبة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- استخدام قاعدة الخلائط للجساءة الطولية والكثافة.
- تقدير الجساءة العرضية.
- شرح لماذا تستخدم الصفائح المركبة عدة زوايا للطبقات.
- مقارنة الألواح المركبة والمعدنية عند جساءة متساوية.

المفاهيم الأساسية

- الطبقة المركبة ألياف جاسئة (كربون، زجاج) في مصفوفة ألين (إيبوكسي أو لدن حراري). تحمل الألياف الحمل؛ وتربطها المصفوفة معًا وتنقل الحمل.
- على امتداد الألياف تسري قاعدة الخلائط: $E_1 = E_f V_f + E_m V_m$، والكثافة $\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m$.
- عبر الألياف تسري القاعدة العكسية: $1/E_2 = V_f/E_f + V_m/E_m$، لذا تكون الطبقة أقل جساءة عرضيًا بأضعاف كثيرة.
- تُرصّ الصفائح المركبة طبقاتٍ عند 0° و±45° و90° لتكون القطعة جاسئة في كل اتجاه تُحمَّل فيه. ويسلك التراصف شبه المتماثل الخواص في مستواه سلوكًا قريبًا من صفيحة معدنية، لكنه أخف.
- للوح تحت الانحناء عند جساءة متساوية تتناسب الكتلة مع $\rho/E^{(1/3)}$، ولهذا تتفوق المواد منخفضة الكثافة في الكسوات.

المعادلات الأساسية

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m$$

`E_1=E_fV_f+E_mV_m`

قاعدة الخلائط

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$

`(1)/(E_2)=(V_f)/(E_f)+(V_m)/(E_m)`

القاعدة العكسية

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

`ρ=ρ_fV_f+ρ_mV_m`

الكثافة

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}\left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{1/3}$$

`(m_2)/(m_1)=(ρ_2)/(ρ_1)((E_1)/(E_2))^1/3`

كتلة اللوح عند جساءة متساوية

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 8.1 ألياف كربون ($E = 230$ GPa، $\rho = 1800$ kg/m³) في إيبوكسي ($E = 3.5$ GPa، $\rho = 1200$ kg/m³) عند $V_f = 0.6$ (قيم مرجعية). أوجد E_1 وρ.

1. $E_1 = 230 \times 0.6 + 3.5 \times 0.4$.
2. $\rho = 1800 \times 0.6 + 1200 \times 0.4$.

الإجابة: $E_1 = 139.4$ GPa; $\rho = 1560$ kg/m³.

مثال 8.2 أوجد E_2.

1. $1/E_2 = 0.6/230 + 0.4/3.5$.

الإجابة: $E_2 = 8.55$ GPa، أقل من E_1 بمقدار 16.3 مرة.

مثال 8.3 يُستبدل لوح كسوة من 7075 بالصفيحة المركبة النموذجية ($E = 70$ GPa، $\rho = 1600$) عند جساءة انحناء متساوية. ما نسبة الكتلتين؟

1. $m_2/m_1 = (1600/2810) \times (71.7/70)^{(1/3)}$.

الإجابة: $m_2/m_1 = 0.574$: أخف بنسبة 42.6%.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد E_1 عند $V_f = 0.5$.

   $230 \times 0.5 + 3.5 \times 0.5 = 116.8$ GPa.

2. لماذا لا تُجعل كل الطبقات عند 0°؟

   ستكون ضعيفة ومرنة في الاتجاهات الأخرى.

3. أوجد الجساءة النوعية للطبقة أحادية الاتجاه أعلاه.

$139.4 \times 10^9 / 1560 = 89.4$ MJ/kg.

4. ما دور المصفوفة؟

تمسك الألياف وتنقل الحمل.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: المواد المركبة جاسئة في كل الاتجاهات.
في الحقيقة: على امتداد الألياف فقط؛ والتراصفات تعالج ذلك.

خرافة: زيادة الألياف أفضل دائمًا.
في الحقيقة: قلة المصفوفة تترك مناطق جافة.

خرافة: المادة المركبة مجرد معدن خفيف.
في الحقيقة: إنها متباينة الخواص وتنهار بطريقة مختلفة.

بطاقات تعليمية

الليف

يحمل الحمل.

المصفوفة

تمسك وتنقل.

قاعدة الخلائط

$E_f V_f + E_m V_m$.

القاعدة العكسية

$1/E_2 = V_f/E_f + V_m/E_m$.

شبه متماثل الخواص

تراصف 0/±45/90.

مؤشر اللوح

$\rho/E^{(1/3)}$.

اختبار ذاتي

1. يتبع المعامل الطولي...

قاعدة الخلائط

القاعدة العكسية

أويلر

هوك فقط

قاعدة الخلائط. نوابض على التوازي.

2. يتبع المعامل العرضي...

القاعدة العكسية

قاعدة الخلائط

Bredt

Paris

القاعدة العكسية. نوابض على التوالي.

3. تحمل طبقات ±45° أساسًا...

قص

الحمل المحوري فقط

الضغط

الحرارة

قص. اتجاهات القص.

4. تتناسب كتلة اللوح عند جساءة متساوية مع...

ρ/E^(1/3)

ρE

E/ρ

ρ

ρ/E^(1/3). الانحناء.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تقول NASA إن HiCAM يهدف إلى تلبية الطلب على استبدال طائرات النقل الأقدم والأثقل بطائرات مركبة خفيفة تقلل استهلاك الوقود وانبعاثات الكربون. وتعمل NASA مع شركائها في Advanced Composites Consortium على رفع معدل إنتاج الطائرات المركبة.

جمعت مراجعة الربيع HiCAM 2026 لدى NASA، التي عُقدت من 5 إلى 7 مايو في Langley، نحو 150 شخصًا من الاتحاد، وهو شراكة بين القطاعين العام والخاص تضم 22 عضوًا، واختارت التقنيات الأكبر أثرًا في معدل التصنيع لبرنامج الطائرة القادم.

على Saving Planets: الكيمياء العامة I · الحلول

المصادر: · NASA: HiCAM Project Overview (Feb. 15, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/) NASA: NASA Hosts 2026 Review on Advanced Composite Manufacturing (Jun. 4, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/nasa-hosts-2026-review-on-advanced-composite-manufacturing/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/): مقرر MIT عن المواد.
- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): ملاحظات MIT عن المواد المركبة.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): فصل FAA عن البناء بالمواد المركبة.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): قسم من كتاب مدرسي مجاني.

☐ أنهيت هذه الوحدة

الكلال والكسر وتحمل الضرر

منحنيات S-N وحد التحمل، وقاعدة Miner للضرر التراكمي، وتركز الإجهاد، ومعامل شدة الإجهاد، ومتانة الكسر وطول الشق الحرج، ونمو الشقوق وقانون Paris، والتصميم المتحمل للضرر والفحص.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- استخدام قاعدة Miner.
- حساب معامل شدة الإجهاد لشق.
- إيجاد طول الشق الحرج.
- شرح تصميم العمر الآمن، والتصميم الآمن عند العطل، والتصميم المتحمل للضرر.

المفاهيم الأساسية

- يمكن للأحمال المتكررة الأقل بكثير من حد الخضوع أن تُنمي الشقوق حتى تنهار القطعة: هذا هو الكلال. وتعطي منحنيات S-N عدد الدورات حتى الانهيار لكل سعة إجهاد.
- تجمع قاعدة Miner الضرر من مستويات إجهاد مختلفة: D = Σ nᵢ/Nᵢ، ويُتوقع الانهيار عند D = 1.
- للشق الذي طوله a تحت إجهاد σ شدة إجهاد K = σ√(πa) (مضروبة في معامل هندسي). ويحدث الكسر عندما تبلغ K متانة الكسر للمادة K_IC.
- إذن طول الشق الحرج a_c = (K_IC/σ)²/π. وتنمو الشقوق في كل دورة وفق da/dN = C(ΔK)^m (قانون Paris)، لذا تُحدَّد فترات الفحص لاكتشاف الشقوق قبل بلوغ a_c بوقت طويل.
- الطائرات الحديثة متحملة للضرر: فهي مصممة لحمل الحمل الحدي مع وجود شق أو ضرر حتى يكتشفه الفحص التالي.

المعادلات الأساسية

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

```
D=(n_i)/(N_i)
```

قاعدة Miner

$$K = \sigma \sqrt{\pi a}$$

شدة الإجهاد

$$a_c = \frac{1}{\pi}\left(\frac{K_{IC}}{\sigma}\right)^2$$

```
a_c=(1)/(π)(_ICσ)^2
```

طول الشق الحرج

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

da/dN=C(Δ K)^m

قانون Paris

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 9.1 تتعرض قطعة لـ 10^4 دورة عند مستوى فيه $N = 10^5$، و2×10^5 دورة عند مستوى فيه $N = 10^6$. أوجد ضرر Miner.

1. $D = 10^4/10^5 + 2 \times 10^5/10^6$.

الإجابة: $D = 0.30$: استُهلك 30% من العمر.

مثال 9.2 أوجد K لشق طوله 10 mm تحت 100 MPa.

1. $K = 100 \times \sqrt{(\pi \times 0.01)}$.

الإجابة: $K = 17.7$ MPa√m.

مثال 9.3 أوجد طول الشق الحرج عند 100 MPa لسبيكة K_{IC} لها 37 MPa√m (قيمة نموذجية).

1. $a_c = (37/100)^2/\pi$.

الإجابة: $a_c = 43.6$ mm.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ضاعف الإجهاد. ما طول الشق الحرج؟

   الربع: 10.9 mm.

2. ما قيمة D التي تتنبأ بها Miner عند الانهيار؟

   1.

3. لماذا تخضع الطائرات لفحوص مجدولة؟

   لاكتشاف الشقوق قبل أن تبلغ a_c.

4. أوجد K لشق طوله 40 mm عند 50 MPa.

$50\sqrt{(\pi \times 0.04)} = 17.7\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: يتطلب الكلال إجهادًا أعلى من حد الخضوع.
في الحقيقة: يحدث عند إجهادات أقل منه بكثير.

خرافة: الشق يعني أن القطعة ستنهار حتمًا.
في الحقيقة: القطع المتحملة للضرر تحمل الحمل حتى الفحص.

خرافة: قاعدة Miner دقيقة تمامًا.
في الحقيقة: إنها تقدير؛ وترتيب الأحمال مهم.

بطاقات تعليمية

الكلال

الانهيار تحت أحمال متكررة.

منحنى S-N

الدورات حتى الانهيار مقابل الإجهاد.

Miner

$\Sigma\ n/N = 1$.

شدة الإجهاد

$\sigma\sqrt{(\pi a)}$.

الشق الحرج

$(K_IC/\sigma)^2/\pi$.

تحمل الضرر

آمن حتى يُكتشف.

اختبار ذاتي

1. الانهيار وفق Miner عند...

D = 1

D = 0

D = 0.5

D = 2

D = 1. الضرر التراكمي.

2. تتناسب K مع...

σ√a

σa

σ/a

a²

.σ√a. σ√(πa)

3. يتناسب a_c مع...

(K_IC/σ)²

K_IC/σ

σ

K_IC

(K_IC/σ)². الكسر.

4. يصف قانون Paris...

نمو الشقوق

انبعاجًا

خضوعًا

الزحف

نمو الشقوق. da/dN.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تشمل حزمة HiCAM لدى NASA الفحص الآلي: أنظمة روبوتية تكتشف العيوب أثناء البناء، فتقلل فحوص الجودة والإصلاحات المستهلكة للوقت بعد الإنتاج، ونماذج هندسية رقمية تتنبأ بالأداء الإنشائي وعيوب التصنيع قبل التجميع.

اكتشاف العيوب مبكرًا والتنبؤ بكيفية نموها هو جوهر تحمل الضرر. وهذا يتيح للمصممين استخدام هياكل أرق وأخف بثقة.

على Saving Planets: ميكانيكا المواد · الاستاتيكا

المصادر: NASA: HiCAM Project Overview (Feb. 15, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/): مقرر MIT عن الكلال والكسر.
- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): ملاحظات MIT.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): فصل FAA عن البناء.
- OpenStax UP1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): قسم من كتاب مدرسي مجاني.

أنهيت هذه الوحدة

التصميم الخفيف والهياكل المستدامة

توزيعات الوزن، وأثر كرة الثلج لزيادة الوزن، والوزن الإنشائي والوقود عبر معادلة بريغيه، ومؤشرات المواد للتصميم الخفيف، والهياكل متعددة المواد والمتكاملة، وإعادة التدوير والتفكير في دورة الحياة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- تقدير الوقود الموفَّر بإزالة وزن إنشائي.
- شرح أثر كرة الثلج للوزن.
- استخدام مؤشرات المواد لاختيار المواد.
- مناقشة مفاضلات إعادة التدوير ودورة الحياة.

المفاهيم الأساسية

- يمثل الهيكل عادةً ما بين ربع وثلث وزن الإقلاع لطائرة الركاب (نطاق مرجعي)، لذا فالوزن الإنشائي رافعة رئيسية للتأثير في الوقود.
- يتضخم الوزن ككرة الثلج: فالهيكل الإضافي يحتاج رفعًا أكبر ووقودًا أكثر ومحركات أكبر، وهذه تضيف مزيدًا من الهيكل. والتوفير يتضخم بالطريقة نفسها في الاتجاه المعاكس.
- من معادلة بريغيه عند مدى ثابت، الوقود المستهلك W_landing (e^(Rc/(V·L/D)) − 1) =، لذا يتناسب الوقود مع وزن الهبوط؛ وكل كيلوغرام يُوفَّر يقلل الوقود بالتناسب.
- تختار مؤشرات المواد أخف مادة لكل وظيفة: E/ρ للروابط، وE^(1/2)/ρ للعوارض، وE^(1/3)/ρ للألواح تحت الانحناء.
- دورة الحياة مهمة أيضًا: فطاقة التصنيع وقابلية الإصلاح وإعادة تدوير المواد المركبة والسبائك كلها تُحتسب إلى جانب الوقود أثناء الخدمة.

المعادلات الأساسية

$$m_{fuel} = m_{land}\left(e^{Rc/(V\,L/D)} - 1\right)$$

```
m_fuel=m_land(e^Rc/(V L/D)-1)
```

الوقود عند مدى ثابت

$$\Delta m_{fuel} = \Delta m\left(e^{Rc/(V\,L/D)} - 1\right)$$

```
Δ m_fuel=Δ m(e^Rc/(V L/D)-1)
```

الوقود الموفَّر لكل كيلوغرام

$$\frac{E^{1/2}}{\rho}$$

مؤشر العارضة

$$\frac{E^{1/3}}{\rho}$$

مؤشر اللوح

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 10.1 تهبط طائرة نفاثة بوزن 45000 kg بعد رحلة أسّ بريغيه فيها 0.2877 (e^0.2877 = 1.333؛ قيم نموذجية). كم وقودًا أحرقت؟

1. m_fuel = 45000 × (1.3333 − 1).

الإجابة: m_fuel = 15000 kg.

مثال 10.2 توفر القطع المركبة 600 kg من الهيكل. كم وقودًا يُوفَّر في كل رحلة؟

1. Δm_fuel = 600 × 0.3333.

الإجابة: نحو 200 kg في كل رحلة.

مثال 10.3 رتّب الألومنيوم والتيتانيوم والفولاذ والصفيحة المركبة النموذجية حسب مؤشر اللوح E^(1/3)/ρ (على أساس GPa).

1. Al: 71.7^(1/3)/2810 × 1000 = 1.48.
2. Ti: 1.09؛ الفولاذ: 0.75؛ الصفيحة المركبة: 2.58.

الإجابة: الصفيحة المركبة أولًا، ثم الألومنيوم، فالتيتانيوم، فالفولاذ.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. عند 1000 رحلة في السنة، كم وقودًا يوفر 200 kg لكل رحلة؟

   200 طن في السنة.

2. باستخدام 3.16 kg من CO_2 لكل kg من الوقود (قيمة مرجعية)، كم CO_2 يُوفَّر سنويًا؟

   632 طنًا.

3. أي مؤشر ينطبق على عارضة جناح تحت الانحناء؟

   E^(1/2)/ρ (عارضة).

4. لماذا يمكن أن يوفر تخفيف الوزن في تصميم جديد أكثر من كتلته نفسها؟

أثر كرة الثلج.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: المحركات وحدها تحدد استهلاك الوقود.
في الحقيقة: الوزن والسحب مهمان بالقدر نفسه.

خرافة: المواد المركبة أكثر مراعاة للبيئة دائمًا.
في الحقيقة: التصنيع وإعادة التدوير يُحتسبان أيضًا.

خرافة: كل كيلوغرام يُوفَّر يوفر كيلوغرامًا من الوقود.
في الحقيقة: إنه يوفر جزءًا في كل رحلة، على مدى آلاف الرحلات.

بطاقات تعليمية

كرة الثلج

تغيرات الوزن تتراكم.

الوقود والوزن

الوقود ∝ وزن الهبوط.

مؤشر الرابط

E/ρ.

مؤشر العارضة

E^(1/2)/ρ.

مؤشر اللوح

E^(1/3)/ρ.

دورة الحياة

التصنيع، الاستخدام، إعادة التدوير.

اختبار ذاتي

1. يتناسب الوقود عند مدى ثابت مع...

وزن الهبوط

لون الجناح

الارتفاع فقط

لا شيء

وزن الهبوط. بريغيه.

2. مؤشر اللوح هو...

E^(1/3)/ρ

E/ρ

Eρ

σ/E

E^(1/3)/ρ. لوح تحت الانحناء.

3. أثر كرة الثلج للوزن يعني أن...

التوفير يتراكم

لا شيء

الوزن ثابت

الوقود وحده يتغير

التوفير يتراكم. إعادة تحديد الأبعاد.

4. مؤشر العارضة هو...

E^(1/2)/ρ

E/ρ

E^(1/3)/ρ

ρ/E

E^(1/2)/ρ. عارضة تحت الانحناء.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تقدّر DOE أن استخدام مكونات خفيفة ومحركات عالية الكفاءة في ربع أسطول المركبات الأمريكي قد يوفر أكثر من 5 مليارات غالون من الوقود سنويًا بحلول 2030، وتشير إلى أن المواد الخفيفة مهمة خصوصًا للمركبات الكهربائية، إذ تعوّض وزن البطاريات وتزيد المدى.

تشير NASA إلى أن الحاجة إلى طاقة أقل للطيران تعني وقودًا أقل، أو في الطائرات الكهربائية كهرباء أقل تُولَّد في مكان آخر، ما يخفض انبعاثات دورة الحياة طوال مدة استخدام الطائرة. والهيكل الخفيف هو وسيلة المصممين لتحقيق ذلك.

على Saving Planets: أداء الطائرات · الحلول

المصادر: U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks) · NASA: Sustainable Aviation (https://www.nasa.gov/directorates/armd/sustainable-aviation/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/): مقرر MIT عن المواد.
- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): الهياكل في MIT.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات MIT.
- U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks): المواد الخفيفة لدى DOE.

أنهيت هذه الوحدة

مجموعات المسائل

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

1. أحمال الطيران ومعاملات الأمان والمواد
   4 مسائل
2. أحمال القص والانحناء في الجناح
   4 مسائل
3. انحناء العوارض رقيقة الجدران
   4 مسائل
4. الالتواء وتدفق القص في المقاطع المغلقة
   4 مسائل
5. القص في المقاطع المفتوحة ومركز القص
   4 مسائل
6. انبعاج الأعمدة والمقويات الطولية والألواح
   4 مسائل
7. أجسام الطائرات المضغوطة والقشور الرقيقة
   4 مسائل
8. المواد المركبة والصفائح الطبقية
   4 مسائل
9. الكلال والكسر وتحمل الضرر

4 مسائل

10. التصميم الخفيف والهياكل المستدامة

4 مسائل

المختبر (Structures lab)

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

يمكن إجراء كل مختبر بمحاكاة مجانية أو جدول بيانات أو بأدوات منزلية. ارتدِ نظارات السلامة عند ثني أو كسر أي شيء قد ينقصف، وأبقِ الأحمال صغيرة وقريبة من الأرض، وأبقِ منطقة العمل خالية مما قد يسبب التعثر.

مرجع السلامة: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

المختبر A: اختيار المواد حسب الخواص النوعية

الأسبوع 1

الهدف: أنشئ جدول بيانات للجساءة والمقاومة النوعيتين لمواد الطيران والفضاء، ورتّبها للروابط والعوارض والألواح.

$$\frac{E}{\rho},\ \frac{\sigma}{\rho},\ \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

مؤشرات المواد

الإجراء

1. أدخل E وσ وρ لألومنيوم 7075 وTi-6Al-4V وفولاذ 4130 والصفيحة الكربونية النموذجية.
2. احسب E/ρ وσ/ρ.
3. أضف مؤشري العارضة واللوح.
4. رتّب المواد لكل وظيفة.

جدول البيانات

المادة	E/ρ (MJ/kg)	σ/ρ (kN·m/kg)
7075 Al	25.5	179
Ti-6Al-4V	25.7	199
فولاذ 4130	26.1	55.4
صفيحة كربونية	43.75	375

محسوبة من قيم مرجعية ونموذجية.

مثال حسابي

1. Al: $71.7 \times 10^9 / 2810 = 25.5$ MJ/kg.
2. الصفيحة: $600 \times 10^6 / 1600 = 375$ kN·m/kg.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

PhET: Hooke’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/hookes-law) · MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/)

الصلة بالكوكب: تذكر DOE تخفيضات في الكتلة بنسبة 50–70% عند استبدال قطع الفولاذ بمواد مركبة من ألياف الكربون. U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks)

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

المختبر B: انحراف مسطرة كابولية

الأسبوع 3

الهدف: قِس انحراف مسطرة مثبتة عند حافة طاولة تحت وزن صغير وقارنه بنظرية العوارض.

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI}, \quad I = \frac{bt^3}{12}$$

=(PL^3)/(3EI),\ \ I=(bt^3)/(12)

انحراف طرف الكابول

الإجراء

1. استكشف الجساءة في PhET Hooke’s Law.
2. ثبّت مسطرة مسطحة على طاولة بشريط لاصق بحيث يبرز منها 0.25 m.
3. علّق كيسًا من العملات وزنه 100 g (نحو 1 N) عند الطرف؛ وقِس هبوط الطرف بمسطرة ثانية.
4. كرر عند بروز 0.20 m وقارن مع $\delta \propto L^3$.

جدول البيانات

البروز	الحمل	الانحراف المتوقع
0.25 m	1 N	7.72 mm
0.20 m	1 N	3.95 mm

متوقع لمسطرة خشبية 3 mm × 30 mm مع E = 10 GPa (قيم نموذجية)؛ مسطرتك ستختلف.

مثال حسابي

1. $I = 0.03 \times 0.003^3/12 = 6.75 \times 10^{-11}\ m^4$.
2. $\delta = 1 \times 0.25^3/(3 \times 10 \times 10^9 \times 6.75 \times 10^{-11}) = 7.72\ mm$.

السلامة

- أبقِ الأحمال صغيرة؛ فالمسطرة المنكسرة قد تقذف العملات. ارتدِ نظارات السلامة.

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

PhET: Hooke’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/hookes-law)

الصلة بالكوكب: ثنت NASA جناح SWEET-15 لأشهر بينما تتبعت مستشعرات الألياف البصرية الانفعال. NASA: NASA Pushes New Wing Design to Find Structural Limits (Jul. 17, 2026) (https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/nasa-pushes-new-wing-design-to-find-structural-limits/)

- [ ] أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)

المختبر C: انبعاج عمود من السباغيتي

الأسبوع 8

الهدف: حمّل أعواد سباغيتي جافة منفردة من طرفها على ميزان مطبخ وتحقق من قانون أويلر 1/L².

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L^2}, \quad I = \frac{\pi d^4}{64}$$

```
P_cr=(π^2EI)/(L^2),\ \ I=(π d^4)/(64)
```

انبعاج أويلر، أطراف مفصلية

الإجراء

1. اقطع أعوادًا بطول 0.20 m و0.10 m.
2. أوقف عودًا على ميزان مطبخ مُصفَّر واضغط برفق بجسم مسطح حتى ينحني؛ وسجّل أعلى قراءة.
3. كرر خمس مرات لكل طول وخذ المتوسط.
4. قارن النسبة بالمعامل المتوقع 4.

جدول البيانات

الطول	P_cr المتوقع	قراءة الميزان
0.20 m	0.381 N	38.9 g
0.10 m	1.53 N	155.5 g

متوقع لأعواد قطرها 1.8 mm مع E = 3 GPa (قيم نموذجية)؛ المعكرونة الحقيقية تتفاوت.

مثال حسابي

1. $I = \pi \times 0.0018^4/64 = 5.15 \times 10^{-13}$ m⁴.
2. $P_cr(0.20) = \pi^2 \times 3 \times 10^9 \times 5.15 \times 10^{-13}/0.04 = 0.381$ N.

السلامة

- ارتدِ نظارات السلامة؛ فالمعكرونة المكسورة تتطاير.
- اضغط برفق بكتاب، لا بكفك.

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/)

الصلة بالكوكب: يقيّم HiCAM لدى NASA حقن الراتنج لهياكل كبيرة متكاملة بعدد أقل من المثبتات. NASA: HiCAM Project Overview (Feb. 15, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/)

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

المختبر D: جدول بيانات إجهادات الضغط في جسم الطائرة

الأسبوع 9

الهدف: احسب الإجهاد المحيطي لأجسام طائرات بأحجام مختلفة وأوجد الكسوة اللازمة لإجهاد مستهدف.

$$\sigma_h = \frac{\Delta p\, r}{t}$$

```
σ_h=(Δ p r)/(t)
```

الإجهاد الطوقي

الإجراء

1. اجعل Δp = 55 kPa وt = 1.6 mm.
2. احسب σ_h لأنصاف أقطار 1.5 و2.0 و3.0 m.
3. أوجد سماكة الكسوة لإجهاد 100 MPa عند كل نصف قطر.
4. ناقش لماذا تكون كسوات الطائرات عريضة البدن أسمك.

جدول البيانات

نصف القطر	الإجهاد الطوقي
1.5 m	51.6 MPa
2.0 m	68.75 MPa
3.0 m	103.1 MPa

قيم محسوبة بفرق ضغط نموذجي.

مثال حسابي

1. σ_h(3.0) = 55,000 × 3/0.0016 = 103.1 MPa.
2. t ∟ 100 MPa عند 1.65 mm = 3.0 m.

السلامة

- على الحاسوب فقط. لا تضغط أبدًا زجاجات أو علبًا لاختبار ذلك.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf)

الصلة بالكوكب: يخطط HiCAM لدى NASA لعرض مقطع أسطواني مركب من جسم الطائرة في 2028–2029. NASA: NASA Hosts 2026 Review on Advanced Composite Manufacturing (Jun. 4, 2026) (https://www.nasa.gov/directorat)

(/es/armd/aavp/hicam/nasa-hosts-2026-review-on-advanced-composite-manufacturing

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

المختبر E: حاسبة الطبقة المركبة

الأسبوع 11

الهدف: احسب الجساءة الطولية والعرضية لطبقة كربون/إيبوكسي مقابل الكسر الحجمي للألياف.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m, \quad \frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$

```
E_1=E_fV_f+E_mV_m,\ \ (1)/(E_2)=(V_f)/(E_f)+(V_m)/(E_m)
```

الميكانيكا الدقيقة

الإجراء

1. أدخل E_f = 230 GPa وE_m = 3.5 GPa.
2. احسب E_1 وE_2 عند V_f = 0.4 و0.5 و0.6.
3. ارسم كليهما مقابل V_f.
4. اشرح لماذا لا تكاد E_2 تتغير.

جدول البيانات

V_f	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)
0.4	94.1	5.77
0.5	116.8	6.90
0.6	139.4	8.55

محسوبة من قيم مرجعية للألياف والمصفوفة.

مثال حسابي

1. $E_1(0.5) = 230 \times 0.5 + 3.5 \times 0.5 = 116.8$ GPa.
2. $E_2(0.4) = 1/(0.4/230 + 0.6/3.5) = 5.77$ GPa.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/)

الصلة بالكوكب: تقول NASA إن HiCAM يهدف إلى استبدال طائرات النقل الأقدم والأثقل بطائرات مركبة خفيفة. NASA: HiCAM Project Overview (Feb. 15, 2026) (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/)

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

المختبر F: كلال مشابك الورق وقاعدة Miner

الأسبوع 13

الهدف: اثنِ مشابك ورق ذهابًا وإيابًا حتى الانهيار بزاويتي ثني واختبر قاعدة Miner.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

```
D=(n_i)/(N_i)
```

قاعدة Miner

الإجراء

1. افرد عدة مشابك متطابقة.
2. اثنِ أحدها ±90° حتى ينكسر؛ وعُدّ الدورات. كرر عند ±45°.
3. على مشبك جديد، استهلك نصف العمر عند ±90°، ثم اثنِه عند ±45° حتى الانهيار.
4. قارن دورات المرحلة الثانية بتنبؤ Miner.

جدول البيانات

الثني	الدورات حتى الانهيار
±90°	12
±45°	30
6 عند ±90°، ثم ±45°	15 متوقعة

قيم نموذجية؛ مشابكك ستختلف، وترتيب الأحمال يغير النتيجة.

مثال حسابي

1. 6/12 = 0.5 من العمر مستهلك عند ±90°.
2. المتبقي 15 = 30 × 0.5 دورة عند ±45°.

السلامة

- ارتدِ نظارات السلامة؛ فالأطراف المكسورة حادة والسلك يسخن.
- تخلّص من القطع بأمان.

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-03-2-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/)

الصلة بالكوكب: يطوّر HiCAM لدى NASA الفحص الآلي لاكتشاف العيوب أثناء البناء. NASA: HiCAM Project Overview (https://www.nasa.gov/directorates/armd/aavp/hicam/about-hicam/) (Feb. 15, 2026)

☐ **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 1–5)

1. طائرة وزنها 10 kN ومعامل حملها الحدي 3.8. أوجد الحمل الأقصى.

   .1 10 × 3.8 × 1.5.

   الإجابة: 57 kN.

2. أوجد عزم الجذر لرفع منتظم 2 kN/m على نصف باع 5 m.

   .1 $2 \times 5^2/2$.

   الإجابة: 25 kN·m.

3. أوجد قوة الشفة لعزم 25 kN·m على صندوق عمقه 0.1 m.

   .1 25/0.1.

   الإجابة: 250 kN.

4. مقطع مغلق يحصر 0.05 m² ويحمل 20 kN·m. أوجد q.

   .1 20,000/(2 × 0.05).

   الإجابة: 200 kN/m.

5. أوجد τ_max في مقطع مستطيل مساحته 600 mm² تحت 3 kN.

   .1 3000/600 × 1.5.

   الإجابة: 7.5 MPa.

مجموعة التدريب النهائية (كل الوحدات)

1. أوجد حمل أويلر لعمود مفصلي طوله 1 m مع E = 70 GPa و$I = 10^{-8}$ m⁴.

   .1 $1/10^{-8} \times 10^9 \times 70 \times \pi^2$.

   الإجابة: 6909 N.

2. أوجد الإجهاد المحيطي عند r = 1.8 m، وΔp = 60 kPa، وt = 1.5 mm.

1. 60,000 × 1.8/0.0015.

الإجابة: 72 MPa.

3. أوجد E_1 عند $V_f = 0.55$ ($E_f = 230$، $E_m = 3.5$ GPa).

1. 230 × 0.55 + 3.5 × 0.45.

الإجابة: 128.1 GPa.

4. أوجد a_c عند $K_{IC} = 30$ MPa√m وMPa 150.

1. π/(30/150)².

الإجابة: 12.7 mm.

5. أوجد ضرر Miner لـ 2×10^4 من 10^5 و5×10^5 من 10^6 دورة.

1. 0.5 + 0.2.

الإجابة: 0.7.

6. بمعامل وقود 0.25 لكل كيلوغرام، كم وقودًا يوفر 300 kg من الهيكل الموفَّر في كل رحلة؟

1. 0.25 × 300.

الإجابة: 75 kg.

ورقة الصيغ

$$n = L/W,\ P_{ult} = 1.5 P_{lim},\ MS = \sigma_{allow}/\sigma - 1$$

$$M_{root} = w s^2/2,\ M_{ell} = (L/2)(4s/3\pi)$$

$$\sigma = My/I,\ F = M/h$$

$$q = \tau t,\ T = 2A_e q,\ d\theta/dz = T \oint ds/t/(4A_e^2 G)$$

$$\tau = VQ/(It),\ \tau_{max} = 3V/(2A)$$

$$P_{cr} = \pi^2 EI/(KL)^2,\ \sigma_{cr} = k\pi^2 E(t/b)^2/(12(1-\nu^2$$

$$\sigma_h = \Delta p r/t,\ \sigma_a = \Delta p r/(2t)$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m,\ 1/E_2 = V_f/E_f + V_m/E_m$$

$$D = \sum n_i/N_i,\ K = \sigma\sqrt{\pi a},\ a_c = (K_{IC}/\sigma)^2/\pi$$

$$E/\rho,\ E^{1/2}/\rho,\ E^{1/3}/\rho$$

الثوابت

الثابت	القيمة
ألومنيوم 7075-T6 (قيم مرجعية)	E = 71.7 GPa, σ_y = 503 MPa, ρ = 2810 kg/m³, G = 27 GPa, ν = 0.33
تيتانيوم Ti-6Al-4V (قيم مرجعية)	E = 114 GPa, σ_y = 880 MPa, ρ = 4430 kg/m³
فولاذ 4130 (قيم مرجعية)	E = 205 GPa, σ_y = 435 MPa, ρ = 7850 kg/m³
صفيحة كربون/إيبوكسي شبه متماثلة الخواص (قيم نموذجية)	E = 70 GPa، المقاومة 600 MPa، ρ = 1600 kg/m³
طائرة ركاب نموذجية (قيم نموذجية)	W = 588.6 kN، نصف الباع 17 m، معامل الحمل الحدي 2.5، معامل الأمان 1.5
الجاذبية	g = 9.81 m/s²

المصدر: NIST Guide to the SI, Appendix B.9: conversion factors (https://www.nist.gov/pml/special-publication-811/nist-guide-si-appendix-b-conversion-factors/nist-guide-si-appendix-b9)

نصوص ومحاكاة مجانية

استخدم هذه المحاضرات والأدلة والمحاكاة المجانية إلى جانب المقرر.

- MIT OpenCourseWare 16.20 Structural Mechanics (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-20-structural-mechanics-fall-2002/): محاضرات ومسائل مجانية من MIT عن الهياكل.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات مجانية من MIT عن العوارض والمواد.
- MIT OpenCourseWare 3.032 Mechanical Behavior of Materials (Fall 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/3-032-mechanical-behavior-of-materials-fall-2007/): مقرر مجاني من MIT عن الكلال والكسر.
- FAA PHAK Chapter 3: Aircraft Construction (PDF) (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/05_phak_ch3.pdf): فصل مجاني من FAA عن هياكل الطائرات.
- OpenStax University Physics Volume 1, 12.3 Stress, strain and elastic modulus (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/12-3-stress-strain-and-elastic-modulus): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- PhET: Hooke’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/hookes-law): الجساءة بشكل تفاعلي.

مسرد المصطلحات

الانبعاج
عدم استقرار جانبي مفاجئ لعضو مضغوط.

تحمل الضرر
القدرة على حمل الحمل بأمان مع وجود شقوق حتى يكتشفها الفحص.

الكلال
انهيار تحت تحميل متكرر أقل من حد الخضوع.

متانة الكسر

شدة الإجهاد التي ينتشر عندها الشق.

الإجهاد الطوقي
الإجهاد المحيطي في أسطوانة مضغوطة.

الصفيحة المركبة
رصّة من طبقات مركبة بزوايا مختارة.

الحمل الحدي
أكبر حمل متوقع أثناء الخدمة.

معامل الحمل
الرفع مقسومًا على الوزن.

هامش الأمان
المسموح على الفعلي، ناقص واحد.

قاعدة Miner
مجموع ضرر الكلال التراكمي.

Rib
عضو في اتجاه الوتر يشكّل الجناح ويدعم المقويات الطولية.

مركز القص
النقطة التي لا يسبب عندها الحمل العرضي التواءً.

تدفق القص
قوة القص لكل وحدة طول على امتداد جدار رقيق.

العارضة
العارضة الرئيسية للجناح في اتجاه الباع.

الجساءة النوعية
معامل المرونة مقسومًا على الكثافة.

معامل شدة الإجهاد
مقياس للإجهاد قرب رأس الشق.

المقوي الطولي
مقوٍّ في اتجاه الباع مثبت بالكسوة.

صندوق الالتواء
صندوق جناح مغلق يقاوم الالتواء.

الحمل الأقصى
الحمل الحدي مضروبًا في معامل الأمان.

صندوق الجناح
عوارض وكسوات تشكل البنية الرئيسية للجناح.

معايير التقييم الذاتي

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

المستوى	كيف يبدو
4 · إتقان	يتتبع مسار الحمل، ويميز بين الحمل الحدي والأقصى، ويتحقق من المقاومة والجساءة والانبعاج والكلال، ويختار المواد حسب خواصها النوعية.
3 · متمكن	يحل التمارين مع أخطاء عرضية في الوحدات.
2 · قيد التطور	يتبع الأمثلة المحلولة لكنه يتحقق من المقاومة فقط لا من الانبعاج.
1 · مبتدئ	يعوّض الأرقام في المعادلات دون مسار حمل؛ ويحتاج إلى مراجعة الوحدة.

الأوزان المقترحة إذا أردت درجة

الجزء	الوزن
تمارين	20%
المختبرات	25%
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

- أداء الطائرات AERO 320
- ميكانيكا المدارات AERO 340
- الديناميكا الهوائية 1 AERO 310
- كل الدورات