آخر تحديث: November 1, 2026

🗺️ خريطة طريق لأربع سنوات · السنة 3, الخريف · 🧱 الحاسبة المدمجة

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 الديناميكا الهوائية للسنة الثالثة. وهو مبني على موضوعات وعمق MIT 16.100 Aerodynamics وأجزاء الموائع من MIT Unified Engineering (وكلاهما مجاني على MIT OpenCourseWare)، وعلى مقررات الديناميكا الهوائية للسنة الثالثة مثل Purdue AAE 333 وGeorgia Tech AE 3030، مستخدمًا Beginner’s Guide to Aeronautics ومحاكي FoilSim المجانيين من NASA Glenn، ونضع روابطهما حيث يفيدان. لا يؤيد أيٌّ من هؤلاء المؤلفين أو المؤسسات هذه الصفحة.

ما نضيفه: كل وحدة مرتبطة بعمل حقيقي مع مصدر عام موثق (جنيحات NASA الطرفية، والأجنحة فوق الحرجة والمدعّمة، وتوربينات الرياح، وقواعد انبعاثات الطائرات، والطيران على المريخ)، وكل رقم في الصفحة يُعاد حسابه بنص تحقق برمجي قبل النشر، ولكل مختبر محاكاة مجانية 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

تحدد الديناميكا الهوائية كمية الوقود التي تحرقها الطائرة وكمية الكهرباء التي ينتجها توربين الرياح. كل جزء من السحب يُزال من الجناح هو وقود لا يُحرق وكربون لا يُنبعث، وكل تحسين في نسبة الرفع إلى السحب لشفرة هو طاقة نظيفة أكثر من الرياح نفسها.

المعادلات نفسها تُطير المروحيات على المريخ وتعيد المركبات الفضائية بأمان عبر الغلاف الجوي للأرض. تنتهي كل وحدة بقسم قصير موثق المصادر. 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 (AERO 310).
- 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

- التفاضل والتكامل III: المشتقات الجزئية والتدرج والتباعد والدوران والتكاملات الخطية.
- المعادلات التفاضلية: المعادلات التفاضلية العادية من الرتبتين الأولى والثانية.
- الديناميكا والفيزياء I: قوانين نيوتن والزخم والطاقة؛ وتساعد الفيزياء II في المجالات.
- مقدمة في الهندسة الفضائية تقدم مفردات الرفع والسحب والغلاف الجوي.

كيف تذاكر

- ابدأ كل مسألة بتسمية نظام الجريان: غير انضغاطي أو انضغاطي (عدد ماخ)، غير لزج أو لزج (عدد رينولدز).
- ارسم حجم تحكم أو خط انسياب قبل كتابة أي معادلة، واذكر قانون الحفظ الذي تستخدمه.
- حوّل إلى صيغة لابعدية: اعمل بالمعاملات (C_L وC_D وC_p) ومعاملات التشابه (Re وM)، ثم عد إلى القوى.
- تحقق من الحالات الحدية: عند زاوية هجوم صفرية يكون رفع المقطع المتماثل صفرًا؛ ومع ازدياد نسبة الباع ينخفض السحب المستحث.
- التزم بوحدات SI: Pa وkg/m³ وm/s وN؛ وحوّل العقد والأقدام في البداية.
- حل كل تمرين على الورق قبل فتح الإجابة، وأعد الاختبارات القصيرة بعد بضعة أيام.

ماذا تحتاج

- حاسوب أو جهاز لوحي لـ NASA FoilSim ومحاكاة PhET المجانية للموائع (تعمل في المتصفح).
- ورق طابعة وشريط لاصق ومشابك ورق ومقص ومسطرة للطائرات الورقية الشراعية.
- مرشحات قهوة ورقية (مخروطية أو سلّية) وشريط قياس لاختبارات السحب.
- هاتف فيه ساعة إيقاف وتصوير بالحركة البطيئة.
- برنامج جداول بيانات لمختبرات الغلاف الجوي وقطبية السحب والأداء.

جدول مقترح من 15 أسبوعًا

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

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
1	خواص الموائع والغلاف الجوي القياسي	خواص الموائع، الغاز المثالي، سرعة الصوت، الغلاف الجوي القياسي؛ المختبر A	NASA Glenn atmosphere; MIT Unified

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
2	استاتيكا الموائع ومعادلة برنولي وقياس سرعة الهواء	برنولي، الضغط الديناميكي، فنتوري، بيتو الساكن؛ المختبر B	NASA Glenn; OpenStax UP1 14.6
3	قوانين الحفظ: الكتلة والزخم والطاقة؛ أحجام التحكم ونظرية الزخم	أحجام التحكم: الكتلة والزخم؛ سحب الأثر	MIT 16.100; UP1 14.5
4	قوانين الحفظ: الكتلة والزخم والطاقة؛ أحجام التحكم ونظرية الزخم	المعادلات التفاضلية للحركة؛ نظرية زخم الدوّار	MIT Unified
5	الجريان الجهدي ونظرية كوتا–جوكوفسكي	الدوامية، الدوران، دالة الجهد ودالة الانسياب، الجريانات الأولية	MIT 16.100
6	الجريان الجهدي ونظرية كوتا–جوكوفسكي	الجريان حول أسطوانة، دالمبير، كوتا–جوكوفسكي	MIT 16.100
7	المقاطع الجنيحية ومعاملات الرفع والسحب والعزم	هندسة المقطع الجنيحي، المعاملات، منحنى الرفع، الانهيار؛ تدريب لامتحان منتصف الفصل	NASA Glenn; FoilSim
8	نظرية المقطع الجنيحي الرقيق	نظرية المقطع الرقيق وطرق الألواح؛ المختبر C	MIT 16.100; FoilSim
9	الأجنحة المحدودة والسحب المستحث	الانحراف السفلي للهواء، نظرية خط الرفع، الأجنحة الإهليلجية	MIT 16.100; NASA Glenn
10	الأجنحة المحدودة والسحب المستحث	السحب المستحث، نسبة الباع، الجنيحات الطرفية؛ المختبر D	NASA Glenn
11	الجريان اللزج وعدد رينولدز والطبقات الحدية	عدد رينولدز، الطبقات الحدية، احتكاك السطح، الانفصال؛ المختبر E	NASA Glenn; UP1 14.7
12	الجريان الانضغاطي: العلاقات الأيزنتروبية وموجات الصدمة	الجريان الأيزنتروبي والفوهات	NASA Glenn
13	الجريان الانضغاطي: العلاقات الأيزنتروبية وموجات الصدمة	الصدمات العمودية، عدد ماخ الحرج، المقاطع فوق الحرجة	NASA Glenn; MIT 16.100
14	أداء الطائرات: قطبية السحب والانزلاق والمدى والتحمل	قطبية السحب، الانزلاق، أدنى سحب	MIT Unified
15	أداء الطائرات: قطبية السحب والانزلاق والمدى والتحمل	مدى بريغيه وتحمله؛ المختبر F؛ تدريب للامتحان النهائي	MIT Unified

تقدّمك

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

الوحدات

خواص الموائع والغلاف الجوي القياسي

الهواء كوسط متصل، الضغط والكثافة ودرجة الحرارة واللزوجة، قانون الغاز المثالي، سرعة الصوت، الهيدروستاتيكا في الغلاف الجوي، الغلاف الجوي القياسي وطبقاته، ولماذا تعتمد القوى الهوائية على الكثافة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- استخدم قانون الغاز المثالي لربط p وρ وT.
- احسب سرعة الصوت وعدد ماخ.
- استخدم نموذج الغلاف الجوي القياسي لإيجاد الخواص عند الارتفاع.
- فسّر كيف تغيّر الكثافة الرفع والسحب مع الارتفاع.

المفاهيم الأساسية

- يتصرف الهواء كوسط متصل حين يكون مقياس الجريان أكبر بكثير من المسافة بين الجزيئات. وتحدد حالته الضغط p والكثافة ρ ودرجة الحرارة T، المرتبطة بقانون الغاز المثالي p = ρRT حيث R = 287 J/(kg·K).
- تقيس اللزوجة μ الاحتكاك الداخلي؛ وتكون مهمة قرب الأسطح (الوحدة 8). واللزوجة الحركية ν = μ/ρ.
- سرعة الصوت a = √(γRT) تعتمد على درجة الحرارة فقط لغاز معيّن؛ وعدد ماخ M = V/a.
- الهيدروستاتيكا: dp/dh = −ρg. ينخفض الضغط مع الارتفاع لأن الهواء فوقه أقل. في التروبوسفير القياسي (0–11 km) تنخفض درجة الحرارة خطيًا بمعدل تناقص نحو 6.5 K/km؛ وفي الستراتوسفير السفلي تكون شبه ثابتة.
- تتناسب القوى الهوائية مع الكثافة، لذا يجب على الطائرة في الارتفاع أن تطير أسرع، أو بمعامل رفع أعلى، لتولد الرفع نفسه.

المعادلات الأساسية

$$p = \rho R T$$

p=ρ RT

قانون الغاز المثالي

$$a = \sqrt{\gamma R T}, \;\; M = \frac{V}{a}$$

a=γ RT,\ \ M=V/a

سرعة الصوت وعدد ماخ

$$\frac{dp}{dh} = -\rho g$$

dp/dh=-ρ g

المعادلة الهيدروستاتيكية

$$T = T_0 - \lambda h$$

T=T_0- h

درجة حرارة التروبوسفير (معدل التناقص λ)

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 1.1 أوجد كثافة الهواء عند مستوى سطح البحر حيث $p = 101325\ \text{Pa}$ و$T = 288.15\ \text{K}$.

1. $\rho = p/(RT) = 101{,}325/(287 \times 288.15)$.

الإجابة: $\rho = 1.225\ \text{kg/m}^3$.

مثال 1.2 استخدم نموذج الغلاف الجوي المتري من NASA Glenn لإيجاد T وp وρ عند $11000\ \text{m}$.

1. $T = 15.04 - 0.00649 \times 11{,}000 = -56.35\ ^\circ\text{C}$.
2. $p = 101.29 \times [(T + 273.1)/288.08]^{5.256} = 22.71\ \text{kPa}$.
3. $\rho = p/[0.2869 \times (T + 273.1)]$.

الإجابة: $T = -56.35\ ^\circ\text{C}$، $p = 22.71\ \text{kPa}$، $\rho = 0.3652\ \text{kg/m}^3$، أي نحو 29.8% من الكثافة عند مستوى سطح البحر.

مثال 1.3 أوجد سرعة الصوت عند مستوى سطح البحر ($288.15\ \text{K}$) وعند $11\ \text{km}$ ($216.8\ \text{K}$)، وعدد ماخ لطائرة نفاثة تطير بسرعة $250\ \text{m/s}$ عند $11\ \text{km}$.

1. $a_0 = \sqrt{(1.4 \times 287 \times 288.15)}$.
2. $a = \sqrt{(1.4 \times 287 \times 216.8)}$.
3. $M = 250/a$.

الإجابة: $a_0 = 340.3\ \text{m/s}$, $a = 295.1\ \text{m/s}$, $M = 0.847$.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد ρ عندما $p = 80\ \text{kPa}$ و$T = 270\ \text{K}$.

   $\rho = 80{,}000/(287 \times 270) = 1.032\ \text{kg/m}^3$.

2. حوّل 450 عقدة إلى m/s.

   $450 \times 0.514444 = 231.5\ \text{m/s}$.

3. أوجد ν عند مستوى سطح البحر.

$\nu = 1.789 \times 10^{-5} / 1.225 = 1.460 \times 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}$.

4. ما درجة الحرارة عند 5000 m في نموذج NASA؟

$15.04 - 32.45 = -17.41\ ^\circ\text{C}$.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: ينخفض ضغط الهواء لأن الهواء يصبح أبرد.
في الحقيقة: ينخفض لأن الهواء فوقه أقل؛ ودرجة الحرارة تؤثر في سرعة الانخفاض.

خرافة: تعتمد سرعة الصوت على الضغط.
في الحقيقة: في الغاز المثالي تعتمد على درجة الحرارة فقط.

خرافة: الكثافة واحدة عند كل الارتفاعات في الجريان منخفض السرعة.
في الحقيقة: الجريان منخفض السرعة غير انضغاطي محليًا، لكن الكثافة ما زالت تتغير مع الارتفاع.

بطاقات تعليمية

الغاز المثالي

$p = \rho R T$.

سرعة الصوت

$a = \sqrt{(\gamma R T)}$.

عدد ماخ

$M = V/a$.

الهيدروستاتيكا

$dp/dh = -\rho g$.

معدل الانخفاض الحراري

نحو 6.5 K/km في التروبوسفير.

اللزوجة الحركية

$\nu = \mu/\rho$.

اختبار ذاتي

1. قانون الغاز المثالي هو...

$p = \rho R T$

$p = \rho g h$

$p = \tfrac{1}{2}\rho V^2$

p = RT/ρ

p = ρRT. معادلة الحالة.

2. سرعة الصوت تعتمد على…

الضغط

درجة الحرارة

الكثافة فقط

السرعة

a = √(γRT). درجة الحرارة.

3. في الستراتوسفير السفلي تكون درجة الحرارة القياسية…

ترتفع بسرعة

شبه ثابتة

تنخفض بسرعة

صفر

شبه ثابتة. نموذج NASA: −56.46 °C من 11 إلى 25 km.

4. عند نصف الكثافة، يتطلب الرفع نفسه عند C_L نفسه سرعة أعلى بمعامل…

×2

×√2

×4

×½

$L \propto \rho V^2$. ×√2.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يوضح Beginner’s Guide من NASA Glenn أن الغلاف الجوي طبقة رقيقة جدًا من الهواء، وأن الضغط ينخفض مع الارتفاع لأن الهواء فوقه دائمًا أقل، وأن القوى الهوائية تعتمد مباشرة على كثافة الهواء. ونموذجه للغلاف الجوي القياسي، المستخدم في محاكي FoilSim، فيه تروبوسفير من السطح حتى 11000 m تنخفض فيه درجة الحرارة خطيًا، وستراتوسفير سفلي من 11000 إلى 25000 m عند 56.46 °C− ثابتة، وستراتوسفير علوي فوقه.

تطير طائرات الركاب في رحلة الطيران قرب قمة التروبوسفير، حيث الكثافة نحو 30% فقط من قيمتها عند مستوى سطح البحر، فيكون السحب عند سرعة معيّنة أقل بكثير؛ وهذا سبب رئيسي لأهمية ارتفاع الطيران في استهلاك الوقود. والنموذج نفسه، بقيم المريخ، يفسر لماذا كان على مروحية Ingenuity التابعة لـ NASA أن تدير شفراتها بهذه السرعة: إذ تذكر NASA أن كثافة الغلاف الجوي للمريخ أقل من 1 بالمئة من كثافة الغلاف الجوي للأرض.

على Saving Planets: مقدمة في هندسة الطيران والفضاء · رصد الأرض

المصادر: NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric units) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/atmosmet.html) · NASA Science: Ingenuity Mars Helicopter (https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/ingenuity-mars-helicopter/)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric units) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/atmosmet.html): ملاءمات منحنيات الغلاف الجوي القياسي.
- NASA Glenn: Beginner’s Guide to Aeronautics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/short.html): دليل مجاني من NASA.
- 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 عن خواص الموائع والديناميكا الحرارية.
- PhET: Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure): الضغط الهيدروستاتيكي بشكل تفاعلي.

أنهيت هذه الوحدة

استاتيكا الموائع ومعادلة برنولي وقياس سرعة الهواء

الضغط الساكن والديناميكي والكلي، ومعادلة برنولي وافتراضاتها، وأنبوب فنتوري، وأنابيب بيتو الساكنة وسرعة الهواء (المبيّنة والمكافئة والحقيقية)، والمانومترات، ومعامل الضغط.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- اذكر متى تنطبق معادلة برنولي.
- احسب الضغط الديناميكي وسرعة الهواء من قراءة بيتو الساكن.
- حلّل أنبوب فنتوري بالاستمرارية وبرنولي.
- استخدم معامل الضغط C_p.

المفاهيم الأساسية

- على امتداد خط انسياب في جريان مستقر غير لزج وغير انضغاطي، يكون p + ½ρV² = p₀ ثابتًا: الضغط الساكن زائد الضغط الديناميكي يساوي الضغط الكلي (ضغط الركود).
- الضغط الديناميكي q = ½ρV² يحدد مقياس كل قوة هوائية؛ وتُكتب القوى على شكل المعامل × q × المساحة.
- يقيس أنبوب بيتو الساكن p₀ − p، لذا V = √(2(p₀ − p)/ρ). تفترض مؤشرات السرعة كثافة مستوى سطح البحر وتقرأ السرعة المكافئة؛ والسرعة الحقيقية أعلى في الارتفاع بمعامل √(ρ₀/ρ).
- الاستمرارية A₁V₁ = A₂V₂ مع برنولي تفسر أنبوب فنتوري: حيث تضيق المساحة ترتفع السرعة وينخفض الضغط.
- معامل الضغط C_p = (p − p∞)/q∞ = 1 − (V/V∞)² للجريان غير الانضغاطي؛ و C_p = 1 عند نقطة الركود.

المعادلات الأساسية

$$p + \tfrac{1}{2}\rho V^2 = p_0$$

p+12ρ V^2=p_0

معادلة برنولي

$$q = \tfrac{1}{2}\rho V^2$$

q=12ρ V^2

الضغط الديناميكي

$$V = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}}$$

V=(2(p_0-p))/(ρ)

سرعة الهواء ببيتو الساكن

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} = 1 - \left(\frac{V}{V_\infty}\right)^2$$

C_p=(p-p_∞)/(q_∞)=1-((V)/(V_∞))^2

معامل الضغط

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 2.1 أنبوب بيتو ساكن عند مستوى سطح البحر يقرأ $p_0 - p = 1500$ Pa. أوجد سرعة الهواء.

1. $V = \sqrt{(2 \times 1500 / 1.225)}$.

الإجابة: $V = 49.5$ m/s.

مثال 2.2 أنبوب فنتوري في نفق رياح ينصّف المساحة. قبله $V_1 = 10$ m/s عند مستوى سطح البحر. أوجد V_2 وهبوط الضغط.

1. $V_2 = 2 \times 10 = 20$ m/s (الاستمرارية).
2. $\Delta p = \tfrac{1}{2} \times 1.225 \times (20^2 - 10^2)$.

الإجابة: $V_2 = 20$ m/s, $\Delta p = 183.8$ Pa.

مثال 2.3 طائرة ركاب تطير بسرعة مكافئة 140 m/s عند 11 km ($\rho = 0.3652$ kg/m³). أوجد الضغط الديناميكي والسرعة الحقيقية.

1. $q = \tfrac{1}{2} \times 1.225 \times 140^2$ (السرعة المكافئة تستخدم كثافة مستوى سطح البحر).
2. $V_{true} = 140 \times \sqrt{(1.225 / 0.3652)}$.

الإجابة: $q = 12.0$ kPa، $V_{true} = 256.4$ m/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد q عند 100 m/s عند مستوى سطح البحر.

   6125 Pa.

2. أوجد C_p حيث السرعة المحلية $1.5\,V_\infty$.

   $1 - 2.25 = -1.25$.

3. مانومتر مائي يبيّن 50 mm. أوجد فرق الضغط ($\rho_{water} = 1000\ kg/m^3$).

$1000 \times 9.81 \times 0.05 = 490.5\ Pa$.

4. ما قيمة C_p عند نقطة الركود؟

1.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: تنطبق معادلة برنولي في كل مكان في أي جريان.
في الحقيقة: تحتاج إلى جريان مستقر غير لزج وغير انضغاطي على امتداد خط انسياب (أو جريان لادوراني).

خرافة: يحدث الرفع لأن الهواء يستغرق الزمن نفسه فوق الجناح وتحته.
في الحقيقة: لا توجد قاعدة زمن عبور متساوٍ؛ فالجريان العلوي أسرع من ذلك، والدوران يفسر الرفع (الوحدة 5).

خرافة: السرعة المبيّنة تساوي السرعة الحقيقية.
في الحقيقة: في الارتفاع تكون السرعة الحقيقية أعلى بكثير.

بطاقات تعليمية

برنولي

$p + \frac{1}{2}\rho V^2 = p_0$.

الضغط الديناميكي

$q = \frac{1}{2}\rho V^2$.

بيتو الساكن

$V = \sqrt{(2\Delta p/\rho)}$.

فنتوري

مساحة أصغر، سرعة أعلى، ضغط أقل.

C_p

$(p - p_\infty)/q_\infty$.

السرعة الحقيقية

V_e $\sqrt{(\rho_0/\rho)}$.

اختبار ذاتي

1. الضغط الكلي يساوي...

- $p - q$
- $p + q$
- q فقط

ρRT

p + q. الساكن زائد الديناميكي.

2. أنبوب بيتو يقيس...

الضغط الساكن فقط

الضغط الكلي

درجة الحرارة

الكثافة

الضغط الكلي. يواجه الجريان.

3. مضاعفة سرعة الهواء تضرب q في...

2

4

2√

8

4. $q \propto V^2$.

4. قيمة C_p عند نقطة الركود هي...

0

1

−1

2

1. $V = 0$.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

الضغط الديناميكي هو سبب صعوبة الطيران على المريخ. تذكر NASA أن Ingenuity طارت في غلاف جوي كثافته أقل من 1 بالمئة من كثافة الغلاف الجوي للأرض، بشفرات يقل طولها من الطرف إلى الطرف قليلًا عن 1.2 m وكتلة 1.8 kg. عند 1% من كثافة الأرض، يتطلب الضغط الديناميكي نفسه سرعة تبلغ 10 = √100 أضعاف.

تقول NASA إن Ingenuity أكملت 72 رحلة بين 19 أبريل 2021 و18 يناير 2024، بمجموع 128.8 دقيقة في الجو، وقطعت 17.0 km وبلغت ارتفاعات تصل إلى 24.0 m. وتطلّب ذلك فهم q = ½ρV² أفضل من أي وقت مضى، وهو أيضًا ما يتيح تصميم الطائرات وتوربينات الرياح على الأرض للهواء الأقل كثافة في الارتفاع.

على Saving Planets: الفضاء · حاسبة قدرة الدوّار في التحويم

المصادر: NASA Science: Ingenuity Mars Helicopter (https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/ingenuity-mars-helicopter/) · NASA Glenn: Pitot-static tube (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/pitot.html)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn: معادلة برنولي (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/bern.html): صفحة مجانية من NASA.
- NASA Glenn: Pitot-static tube (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/pitot.html): كيف تُقاس سرعة الهواء.
- OpenStax UP1, 14.6 Bernoulli's equation (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-6-bernoullis-equation): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow): تفاعلي.

شاهد المحاضرة

Fluid Dynamics and Statics and Bernoulli's Equation (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-20) (باللغة الإنجليزية)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. الترخيص: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · شروط الاستخدام (https://oyc.yale.edu/terms). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

☐ **أنهيت هذه الوحدة**

قوانين الحفظ: الكتلة والزخم والطاقة؛ أحجام التحكم ونظرية الزخم

الوصفان اللاغرانجي والأويلري، والمشتقة المادية، والحفظ التكاملي للكتلة والزخم والطاقة لحجم تحكم، والاستمرارية التفاضلية، ومعادلة أويلر، والسحب من مسح الأثر، ونظرية القرص المحرّك للمراوح والدوّارات.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- طبّق الحفظ التكاملي للكتلة والزخم على حجم تحكم.
- اشتق معادلتي الاستمرارية وأويلر بالصيغة التفاضلية.
- أوجد السحب من مقطع سرعة الأثر.
- استخدم نظرية الزخم لتقدير دفع الدوّار وقدرة التحويم.

المفاهيم الأساسية

- الكتلة: ∂/∂t∫ρ dV + ∮ρV·dA = 0. في الجريان المستقر، الكتلة الداخلة = الكتلة الخارجة: ṁ = ρAV ثابت عبر أنبوب الانسياب.
- الزخم: القوة المحصلة على حجم التحكم (قوى الضغط والجسم والسطح) تساوي صافي تدفق الزخم الخارج زائد معدل التغير داخله: ΣF = ∮V(ρV·dA) للجريان المستقر.
- الصيغ التفاضلية: ∂ρ/∂t + ∇·(ρV) = 0؛ وللجريان غير الانضغاطي ∇·V = 0. معادلة أويلر ρ DV/Dt = −∇p + ρg هي قانون نيوتن لجسيم مائع غير لزج؛ وتكاملها على امتداد خط انسياب يعطي برنولي.
- السحب من الأثر: يبطئ الجسم الهواء خلفه؛ ونقص الزخم في الأثر يساوي السحب، D' = ρ∫u(V∞ − u) dy لكل وحدة باع.
- نظرية القرص المحرّك (الزخم): دوّار مساحته A ينتج دفعًا T يستحث سرعة v = √(T/(2ρA)) عند القرص؛ وقدرة التحويم المثالية P = T^(3/2)/√(2ρA). والدوّارات الحقيقية تحتاج أكثر؛ والنسبة هي معامل الجدارة.

المعادلات الأساسية

$$\dot{m} = \rho A V = \text{const}$$

```
m=ρ AV=const
```

حفظ الكتلة في الحالة المستقرة

$$\sum \mathbf{F} = \oint (\rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}) \mathbf{V}$$

```
F=(ρ V· d A) V
```

الزخم في الحالة المستقرة (حجم التحكم)

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

الاستمرارية غير الانضغاطية

$$P_{ideal} = \frac{T^{3/2}}{\sqrt{2\rho A}}$$

```
P_ideal=^3/22ρ A
```

قدرة التحويم المثالية (نظرية الزخم)

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 3.1 يجري هواء كثافته 1.225 kg/m³ بسرعة 20 m/s عبر مجرى مساحته 0.5 m². أوجد معدل التدفق الكتلي والسرعة حيث يضيق المجرى إلى 0.2 m².

1. $\dot{m} = 1.225 \times 0.5 \times 20 = 12.25$ kg/s.
2. $V_2 = 20 \times 0.5/0.2$.

الإجابة: $\dot{m} = 12.25$ kg/s, $V_2 = 50$ m/s.

مثال 3.2 مروحية كتلتها 1000 kg تحوم عند مستوى سطح البحر بدوّار قطره 10 m. أوجد السرعة المستحثة وقدرة التحويم المثالية.

1. $T = 9810$ N; $A = \pi \times 5^2 = 78.54$ m².
2. $v = \sqrt{(9810/(2 \times 1.225 \times 78.54))} = 7.14$ m/s.
3. $P = Tv$.

الإجابة: $v = 7.14$ m/s، $P = 70.0$ kW (مثالية).

مثال 3.3 مسح أثر خلف جسم 2D (مستوى سطح البحر، $V_\infty = 30$ m/s) يجد نقصًا يكافئ $\int u(V_\infty - u)dy = 6$ m³/s². أوجد السحب لكل وحدة باع.

1. $D' = \rho \int u(V_\infty - u)\,dy = 1.225 \times 6$.

الإجابة: $D' = 7.35$ N/m.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. هل $V = (x, -y)$ غير انضغاطي؟

   نعم: $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y = 1 - 1 = 0$.

2. يتضاعف دفع دوّار. بكم تزداد قدرة التحويم المثالية؟

2.83 = 2^1.5 مرة.

3. مضاعفة مساحة الدوّار عند دفع ثابت تغيّر قدرة التحويم المثالية بمعامل...

0.707 = 1/√2 مرة.

4. نفثة ماء (ρ = 1000) بمساحة A = 0.01 m² وسرعة V = 10 m/s تصطدم بجدار وجهًا لوجه. أوجد القوة.

.F = ρAV² = 1000 N

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: حفظ الزخم يتجاهل الضغط.
في الحقيقة: يجب تضمين قوى الضغط على سطح حجم التحكم.

خرافة: الدوّار الأكبر يحتاج قدرة أكبر للتحويم.
في الحقيقة: عند الدفع نفسه، يحتاج القرص الأكبر قدرة مستحثة أقل.

خرافة: الجريان المستقر يعني أن المائع لا يتسارع.
في الحقيقة: يمكن للجسيمات أن تتسارع (تسارع حملي) حتى عندما لا يتغير المجال مع الزمن.

بطاقات تعليمية

معدل التدفق الكتلي

.ṁ = ρAV

الاتصال

∇·V = 0 (غير انضغاطي).

معادلة أويلر

.p + ρg∇ρDV/Dt = −

سحب الأثر

.D' = ρ∫u(V∞ − u)dy

السرعة المستحثة

.v = √(T/2ρA)

قدرة التحويم

.T^(3/2)/√(2ρA)

اختبار ذاتي

1. في الجريان غير الانضغاطي تصبح الاستمرارية...

∇ ·V = 0

∇ ×V = 0

ρ = 0

p = ثابت

∇V = 0. الكثافة ثابتة.

2. السحب المستخرج من مسح الأثر يأتي من...

الطاقة في الأثر

نقص الزخم

درجة الحرارة

الرفع

نقص الزخم. توازن الزخم.

3. تتناسب قدرة التحويم المثالية مع الدفع على شكل...

T

T^1.5

T²

T√

.T^1.5. P = T^(3/2)/√(2pA)

4. معادلة أويلر هي قانون نيوتن لـ...

مائع لزج

جسيم مائع غير لزج

جسم جاسئ

صدمة

جسيم مائع غير لزج. الضغط والجاذبية فقط.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تبيّن نظرية الزخم لماذا كانت Ingenuity إنجازًا. تذكر NASA أن كتلتها 1.8 kg، وأن طول شفراتها من الطرف إلى الطرف نحو 1.2 m، وأن متوسط قدرة طيرانها نحو 350 W، من لوح شمسي يشحن بطاريات ليثيوم أيون لرحلة واحدة مدتها 90 ثانية في كل يوم مريخي. ومع جاذبية المريخ (3.71 m/s²، قيمة من الكتب الدراسية) يكون الدفع اللازم 6.68 N.

بأخذ كثافة مريخية نموذجية 0.0115 kg/m³ (ضمن «أقل من 1 بالمئة» من كثافة الأرض بحسب NASA) وقرص واحد قطره 1.2 m، تعطي نظرية الزخم قدرة تحويم مثالية نحو 107 W؛ وتغطي الـ 350 W التي تذكرها NASA أيضًا فقد الدوّار الحقيقي (سحب المقطع، وفقد الأطراف، والتدفق الداخل غير المنتظم) والصعود والأنظمة على متن المروحية. والمعادلة نفسها تحدد أبعاد دوّارات سيارات الأجرة الجوية الكهربائية والطائرات المسيّرة على الأرض، وهي أساس حاسبة قدرة الدوّار في التحويم في هذا الموقع.

على Saving Planets: حاسبة قدرة الدوّار في التحويم · الديناميكا

المصادر: NASA Science: Ingenuity Mars Helicopter (https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/ingenuity-mars-helicopter/) · 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/)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn: Conservation of mass (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mass.html): صفحة مجانية من NASA.
- OpenStax UP1, 14.5 Fluid dynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-5-fluid-dynamics): معدل التدفق والاستمرارية.
- 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/): أحجام التحكم ونظرية الزخم.
- MIT OpenCourseWare 16.100 Aerodynamics (Fall 2005) (https://ocw.mit.edu/courses/16-100-aerodynamics-fall-2005/): قوانين الحفظ بالصيغة التفاضلية.

شاهد المحاضرة

Work-Energy Theorem and Law of Conservation of Energy (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-5) (باللغة الإنجليزية)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. الترخيص: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · شروط الاستخدام (https://oyc.yale.edu/terms). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

أنهيت هذه الوحدة

الجريان الجهدي ونظرية كوتا–جوكوفسكي

الدوامية والدوران، والجريان اللادوراني، وجهد السرعة ودالة الانسياب، ومعادلة لابلاس والتراكب، والجريان المنتظم، والمنابع والمصارف والثنائيات والدوامات، والجريان حول أسطوانة مع الدوران ودونه، ومفارقة دالمبير، ونظرية الرفع لكوتا–جوكوفسكي.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- اربط الدوامية والدوران والجريان اللادوراني.
- ابنِ الجريانات بتراكب حلول أولية لمعادلة لابلاس.
- أوجد توزيع الضغط على أسطوانة.
- طبّق L' = ρ∞V∞Γ.

المفاهيم الأساسية

- الدوامية ω = ∇ × V تساوي ضعف معدل الدوران المحلي. والدوران Γ = −∮V·ds حول منحنى مغلق يساوي تدفق الدوامية عبره (نظرية ستوكس؛ وتعتمد الديناميكا الهوائية الاتجاه مع عقارب الساعة موجبًا).
- إذا كانت ω = 0 فالجريان لادوراني و= V ∇ϕ. ومع ∇·V = 0 تحقق ϕ معادلة لابلاس ∇²ϕ = 0، وهي خطية، لذا تُجمع الحلول (التراكب). في 2D تحقق دالة الانسياب ψ u = ∂ψ/∂y، v = −∂ψ/∂x، وخطوط ψ الثابتة هي خطوط الانسياب.
- الجريانات الأولية: الجريان المنتظم ϕ = V∞x؛ منبع شدته Λ، V_r = Λ/(2πr)؛ الثنائي، وهو نهاية زوج منبع–مصرف؛ الدوامة النقطية، V_θ = −Γ/(2πr).
- الجريان المنتظم مع ثنائي يعطي الجريان حول أسطوانة نصف قطرها R: سرعة السطح V_θ = −2V∞ sin θ، إذن C_p = 1 − 4 sin²θ. الضغط متماثل، فلا يوجد سحب (مفارقة دالمبير) ولا رفع.
- إضافة دوامة تجعل الجريان غير متماثل وتنتج رفعًا لكل وحدة باع L' = ρ∞V∞Γ، وهي نظرية كوتا–جوكوفسكي. وتصح لأي جسم 2D: الرفع مرتبط دائمًا بالدوران.

المعادلات الأساسية

$$\omega = \nabla \times \mathbf{V}, \;\; \Gamma = -\oint \mathbf{V} \cdot d\mathbf{s}$$

ω=× V,\ \ =- V· d s

الدوامية والدوران

$$\nabla^2 \phi = 0$$

معادلة لابلاس

$$C_p = 1 - 4\sin^2\theta$$

C_p=1-4^2θ

الضغط السطحي على أسطوانة غير رافعة

$$L' = \rho_\infty V_\infty \Gamma$$

L ' =ρ_∞ V_∞

نظرية كوتا–جوكوفسكي

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 4.1 أوجد أقصى سرعة سطحية وأدنى C_p على أسطوانة غير رافعة في تيار سرعته 20 m/s.

1. $|V_\theta| = 2V_\infty|\sin\theta|$ أكبر ما يكون عند $\theta = 90°$.
2. $C_p = 1 - 4 \times 1$.

الإجابة: $V_{max} = 40$ m/s؛ $C_{p,min} = -3$.

مثال 4.2 أسطوانة دوّارة عند مستوى سطح البحر في تيار سرعته 50 m/s دورانها $\Gamma = 20$ m²/s. أوجد الرفع لكل متر من الباع.

1. $L' = 1.225 \times 50 \times 20$.

الإجابة: $L' = 1225$ N/m.

مثال 4.3 أوجد السرعة التي تستحثها دوامة نقطية $\Gamma = 20$ m²/s على مسافة 1 m.

1. $V_\theta = \Gamma/(2\pi r) = 20/(2\pi)$.

الإجابة: 3.183 m/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أين يكون $C_p = 0$ على أسطوانة غير رافعة؟

   $\sin^2\theta = 0.25$، إذن $\theta = 30°$، $150°$، $210°$، $330°$.

2. هل $\phi = x^2 - y^2$ جهد صالح؟

   نعم: $\nabla^2\phi = 2 - 2 = 0$.

3. ما الرفع الذي تولّده الأسطوانة الدوّارة ذات الباع 2 m في المثال المحلول؟

   2450 N.

4. ما السحب الذي يتنبأ به الجريان الجهدي على أسطوانة؟

صفر، وهي مفارقة دالمبير؛ والسحب الحقيقي يأتي من اللزوجة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الجريان الجهدي عديم الفائدة لأنه لا يتنبأ بأي سحب.
في الحقيقة: يتنبأ جيدًا بالرفع والضغط أينما بقيت الطبقة الحدية ملتصقة.

خرافة: الدوران يعني أن الهواء يدور حول الجناح في دوائر.
في الحقيقة: إنه قيمة صافية للتكامل الخطي؛ والجسيمات لا تدور في مدار حول الجناح.

خرافة: التراكب يصلح لأي معادلة جريان.
في الحقيقة: يصلح لأن معادلة لابلاس خطية.

بطاقات تعليمية

الدوامية

$\omega = \nabla \times V$.

الدوران

$\Gamma = -\oint V \cdot ds$.

لابلاس

$\nabla^2 \phi = 0$.

الدوامة النقطية

$V_\theta = \Gamma / 2\pi r$.

c_p للأسطوانة

$1 - 4 \sin^2\theta$.

كوتا–جوكوفسكي

$L' = \rho V \Gamma$.

اختبار ذاتي

1. الجريان اللادوراني يعني...

$\omega = 0$

$\Gamma = 0$ في كل مكان

$\nabla \cdot V = 0$

لا لزوجة

ω = 0. دوامية صفرية.

2. الرفع لكل وحدة باع يساوي...

ρV²Γ

ρVΓ

½ρV²

Γ/ρV

ρVΓ. كوتا–جوكوفسكي.

3. أدنى C_p على أسطوانة غير رافعة هو...

−1

−3

0

−4

−3.1 – 4.

4. الجريان المنتظم مع ثنائي يمثّل...

مقطعًا جنيحيًا

أسطوانة

كرة

دوامة

أسطوانة. أسطوانة غير رافعة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح وزارة الطاقة الأمريكية أن شفرات توربينات الرياح تعمل بطريقة تشبه كثيرًا جناح الطائرة أو شفرة دوّار المروحية: ينخفض ضغط الهواء على أحد جانبي الشفرة، ويولّد فرق الضغط عبر الشفرة رفعًا وسحبًا معًا. ولأن الرفع أقوى من السحب، يدور الدوّار فيدير مولدًا.

تشير الوزارة إلى أن التوربينات البرية تتراوح من 100 كيلوواط إلى عدة ميغاواط، وأن التوربينات البحرية عادة أكبر، وأطول من تمثال الحرية. ويستخدم مصممو الشفرات أفكار الدوران والرفع من هذه الوحدة، مع نظرية عنصر الشفرة والزخم المبنية على الوحدة 3، لتشكيل كل مقطع من الشفرة بحيث يستخلص من الرياح أكبر قدرة ممكنة.

على Saving Planets: الحلول · الفيزياء 2

المصادر: وزارة الطاقة الأمريكية: كيف تعمل توربينات الرياح؟ (بالإنجليزية) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.100 Aerodynamics (Fall 2005) (https://ocw.mit.edu/courses/16-100-aerodynamics-fall-2005/): محاضرات عن الجريان الجهدي.
- NASA Glenn: FoilSim interactive airfoil simulator (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/FoilSim/index.html): شاهد الدوران والرفع.
- NASA Glenn: Lift from flow turning (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/foil2.html): لماذا ينحرف الجريان.
- NASA Glenn: Incorrect lift theory (equal transit) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/foil3.html): مفاهيم خاطئة شائعة.

أنهيت هذه الوحدة

المقاطع الجنيحية ومعاملات الرفع والسحب والعزم

هندسة المقطع الجنيحي وتسميات NACA، وزاوية الهجوم، ومعاملات الرفع والسحب والعزم، ومنحنى الرفع والانهيار، ومركز الضغط والمركز الهوائي، وشرط كوتا، وكيف تولّد توزيعات الضغط الرفع.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- صِف هندسة المقطع الجنيحي: الوتر والتقوس والسماكة.
- احسب القوى من L = qSC_L وD = qSC_D.
- اقرأ منحنى الرفع: الميل وزاوية الرفع الصفري والانهيار.
- أوجد سرعة الانهيار ومعامل الرفع المطلوب.

المفاهيم الأساسية

- للمقطع الجنيحي وتر c من الحافة الأمامية إلى الحافة الخلفية، وخط تقوس متوسط، وتوزيع سماكة. في اسم NACA المكوّن من 4 أرقام مثل 2412، الرقم الأول هو أقصى تقوس (2% من الوتر)، والثاني موضعه (40% من الوتر)، والأخيران السماكة (12%).
- تُحوَّل القوى إلى صيغة لابعدية: C_L = L/(qS)، C_D = D/(qS)، C_M = M/(qSc). ولمقطع 2D تُستخدم الحروف الصغيرة c_l وc_d وc_m لكل وحدة باع.
- منحنى الرفع c_l(α) شبه مستقيم حتى الانهيار، حين تنفصل الطبقة الحدية عن السطح العلوي وينخفض الرفع. المقاطع المتقوسة تولّد رفعًا عند زاوية هجوم صفرية، لذا تكون زاوية الرفع الصفري α_L=0 لها سالبة.
- ينص شرط كوتا على أن الجريان يغادر الحافة الخلفية الحادة بسلاسة؛ وهو يحدد الدوران ومن ثم الرفع.
- يتحرك مركز الضغط مع α؛ أما المركز الهوائي (قرب ربع الوتر عند السرعات المنخفضة) فهو النقطة التي لا يتغير عندها العزم مع α، مما يجعله مفيدًا للاستقرار.

المعادلات الأساسية

$$L = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_L$$

L=12ρ V^2SC_L

معادلة الرفع

$$D = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_D$$

D=12ρ V^2SC_D

معادلة السحب

$$V_{stall} = \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L,max}}}$$

V_stall=2Wρ SC_L,max

$$C_M = \frac{M}{qSc}$$

C_M=M/qSc

معامل العزم

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 5.1 جناح مساحته S = 16 m² يطير بسرعة 60 m/s عند مستوى سطح البحر مع C_L = 0.5. أوجد الرفع.

1. q = ½ × 1.225 × 60² = 2205 Pa.
2. L = 2205 × 16 × 0.5.

الإجابة: L = 17,640 N.

مثال 5.2 طائرة كتلتها 1000 kg ومساحة جناحها S = 16 m² تطير أفقيًا بسرعة 50 m/s عند مستوى سطح البحر. أوجد C_L المطلوب.

1. W = 9810 N; q = 1531.25 Pa.
2. C_L = 9810/(1531.25 × 16).

الإجابة: C_L = 0.400.

مثال 5.3 للطائرة نفسها C_L,max = 1.6. أوجد سرعة الانهيار عند مستوى سطح البحر.

1. V = √(2 × 9810/(1.225 × 16 × 1.6)).

الإجابة: V_stall = 25.0 m/s (نحو 48.6 عقدة).

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ما سماكة NACA 0012؟

   12% من الوتر، متماثل (بلا تقوس).

2. الرفع عند ×1.5 السرعة، مع C_L نفسه؟

2.25 مرة.

3. سرعة انهيار المثال المحلول عند 11 km (ρ = 0.3652)؟

√(1.225/0.3652) × 25.0 = 45.8 m/s.

4. ماذا يحدث للرفع بعد الانهيار؟

ينخفض مع انفصال الجريان؛ ويرتفع السحب بحدة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: زاوية الهجوم الأعلى تعطي دائمًا رفعًا أكبر.
في الحقيقة: حتى الانهيار فقط.

خرافة: المقاطع المتماثلة لا تستطيع توليد الرفع.
في الحقيقة: تولّد الرفع عند زاوية هجوم موجبة.

خرافة: مركز الضغط نقطة ثابتة.
في الحقيقة: يتحرك مع α؛ أما المركز الهوائي فلا.

بطاقات تعليمية

الرفع

$L = qSC_L$.

السحب

$D = qSC_D$.

سرعة الانهيار

$\sqrt{(2W/\rho SC_{Lmax})}$.

NACA ذو 4 أرقام

التقوس، الموضع، السماكة.

شرط كوتا

جريان سلس عند الحافة الخلفية.

المركز الهوائي

عزم مستقل عن α.

اختبار ذاتي

1. يُعرَّف C_L بأنه...

L/q

L/(qS)

qS/L

L/S

L/(qS). الرفع مقسومًا على q مضروبًا في المساحة.

2. أقصى تقوس لـ NACA 2412 هو...

2%

4%

12%

24%

2%. الرقم الأول.

3. يحدث الانهيار بسبب...

موجات الصدمة

انفصال الجريان

الكثافة المنخفضة

Re العالي

انفصال الجريان. تنفصل الطبقة الحدية.

4. شرط كوتا يحدد...

السحب

الدوران

عدد ماخ

السماكة

الدوران. جريان سلس عند مغادرة الحافة الخلفية.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تروي NASA كيف ابتكر مهندسها ريتشارد ويتكومب المقطع الجنيحي فوق الحرج: شبه مسطح من الأعلى، مستدير من الأسفل، أسمك، بحافة أمامية غير حادة. قرب سرعة الصوت، نحو 660 mph عند ارتفاع الطيران، يكوّن الجناح التقليدي موجة صدمة ثابتة تضيف سحبًا؛ وقلّل الشكل الجديد تلك الصدمة إلى أدنى حد.

تذكر NASA أن الأجنحة فوق الحرجة رفعت الكفاءة بما يصل إلى 15%، وتعمل أيضًا بشكل أفضل عند السرعات الأبطأ، وتسمح بجناح أخف. وأصبحت المعيار في الصناعة، وتقول NASA إنها توفر مليارات الدولارات من الوقود كل عام. وتشكيل توزيع الضغط على المقطع، كما في هذه الوحدة، هو الطريقة التي يُخفَّض بها الوقود والانبعاثات.

على Saving Planets: مقدمة في هندسة الطيران والفضاء · الحلول

المصادر: NASA: How a NASA engineer created the modern airplane wing (2016) (https://www.nasa.gov/aeronautics/how-a-nasa-engineer-created-the-modern-airplane-wing/)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn: The lift equation (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/lifteq.html): صفحة مجانية من NASA.
- NASA Glenn: The drag equation (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/drageq.html): صفحة مجانية من NASA.
- NASA Glenn: FoilSim interactive airfoil simulator (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/FoilSim/index.html): استكشف منحنيات الرفع.
- MIT OpenCourseWare 16.100 Aerodynamics (Fall 2005) (https://ocw.mit.edu/courses/16-100-aerodynamics-fall-2005/): محاضرات عن المقاطع الجنيحية.

أنهيت هذه الوحدة

نظرية المقطع الجنيحي الرقيق

الصفائح الدوامية، ونمذجة خط التقوس بصفيحة دوامية، وشرط كوتا، والحل بمتسلسلة فورييه، وميل الرفع 2π لكل راديان، وزاوية الرفع الصفري للمقاطع المتقوسة، والمركز الهوائي عند ربع الوتر، وطرق الألواح.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- نمذج المقطع الجنيحي بصفيحة دوامية على خط تقوسه.
- اشتق c_l = 2πα لمقطع رقيق متماثل.
- أوجد معامل الرفع لمقطع متقوس من α وα_L=0.
- فسّر لماذا يقع المركز الهوائي عند ربع الوتر.

المفاهيم الأساسية

- صفيحة دوامية شدتها γ(s) لكل وحدة طول تُحدث قفزة في السرعة المماسية عبرها. ووضع واحدة على خط التقوس واشتراط أن يكون خط التقوس خط انسياب يعطي معادلة تكاملية لـ γ.
- مع شرط كوتا γ(TE) = 0 ومتسلسلة فورييه في θ (x = c(1 − cos θ)/2)، يعطي الحل c_l = 2π(α − α_L=0): ميل الرفع 2π لكل راديان (نحو 0.11 لكل درجة) لكل مقطع رقيق.
- للمقطع المتماثل α_L=0 = 0 وc_m,c/4 = 0 وc_m,LE = −c_l/4، لذا يقع مركز الضغط عند ربع الوتر. والتقوس يزيح α_L=0 نحو السالب ويضيف c_m,c/4 ثابتًا خافضًا للمقدمة، لكن المركز الهوائي يبقى عند ربع الوتر.
- للمقاطع الحقيقية متوسطة السماكة ميول رفع قريبة من 2π حتى تبدأ الطبقة الحدية بالانفصال؛ ولا تتنبأ نظرية المقطع الرقيق بالانهيار ولا بالسحب.
- تغطي طرق الألواح السطح الحقيقي بألواح كثيرة من المنابع والدوامات وتحل شداتها عدديًا؛ وبها يحسب المصممون الضغط على أي شكل، من الشفرات إلى الأجنحة.

المعادلات الأساسية

$$c_l = 2\pi(\alpha - \alpha_{L=0})$$

```
c_l=2π(α-α_L=0)
```

رفع المقطع الرقيق

$$c_{m,c/4} = 0 \text{ (symmetric)}$$

```
c_m,c/4=0\ (symmetric)
```

العزم عند ربع الوتر

$$c_{m,LE} = -\frac{c_l}{4}$$

```
c_m,LE=-(c_l)/(4)
```

$$x = \tfrac{c}{2}(1 - \cos\theta)$$

x= c2(1-θ)

تحويل غلاورت

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 6.1 أوجد c_l لمقطع رقيق متماثل عند α = 5°.

1. α = 0.08727 rad.
2. c_l = 2π × 0.08727.

الإجابة: c_l = 0.548.

مثال 6.2 مقطع متقوس فيه α_L=0 = −2° (قيمة نموذجية). أوجد c_l عند α = 4°.

1. α − α_L=0 = 6° = 0.10472 rad.
2. c_l = 2π × 0.10472.

الإجابة: c_l = 0.658.

مثال 6.3 للمقطع المتماثل عند α = 5°، أوجد c_m حول الحافة الأمامية ومركز الضغط.

1. c_m,LE = −c_l/4 = −0.548/4.
2. x_cp = −c_m,LE c/c_l = c/4.

الإجابة: c_m,LE = −0.137; x_cp = 0.25c.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ما الزاوية التي تعطي c_l = 0.5 على مقطع رقيق متماثل؟

   0.5/(2π) = 0.0796 rad = 4.56°.

2. ميل الرفع لكل درجة؟

   2π × π/180 = 0.1097 لكل درجة.

3. هل تتنبأ نظرية المقطع الرقيق بالانهيار؟

لا؛ فهي غير لزجة وخطية.

4. أين يقع المركز الهوائي لمقطع رقيق متقوس؟

عند ربع الوتر.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: التقوس يغيّر ميل الرفع.
في الحقيقة: في نظرية المقطع الرقيق يزيح المنحنى؛ ويبقى الميل 2π.

خرافة: مركز الضغط دائمًا عند ربع الوتر.
في الحقيقة: فقط للمقطع المتماثل؛ فللمقاطع المتقوسة مركز ضغط متحرك.

خرافة: 2π لكل درجة.
في الحقيقة: إنها لكل راديان.

بطاقات تعليمية

الصفيحة الدوامية

قفزة في السرعة المماسية.

الرفع

$c_l = 2\pi(\alpha - \alpha_{L0})$.

العزم (متماثل)

$c_{m,c/4} = 0$.

العزم عند الحافة الأمامية

$-c_l/4$.

غلاورت

$x = c(1 - \cos\theta)/2$.

طريقة الألواح

ألواح عددية من المنابع والدوامات.

اختبار ذاتي

1. ميل رفع المقطع الرقيق هو...

2π لكل درجة

2π لكل راديان

π لكل راديان

4π

2π لكل راديان. c_l = 2πα.

2. التقوس يجعل α_L=0...

موجبة

سالبة

صفر

غير معرّفة

سالبة. رفع عند زاوية صفرية.

3. يقع المركز الهوائي للمقطع الرقيق عند...

الحافة الأمامية

ربع الوتر

منتصف الوتر

الحافة الخلفية

ربع الوتر. نتيجة النظرية.

4. تنمذج نظرية المقطع الرقيق المقطع بـ...

منابع فقط

صفيحة دوامية

صدمات

طبقات حدية

صفيحة دوامية. على خط التقوس.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح وزارة الطاقة أن شفرة التوربين، مثل جناح الطائرة، تولّد الرفع من فرق في الضغط، وأن الرفع الأقوى من السحب هو ما يدير الدوّار. ويرى كل مقطع من الشفرة زاوية هجوم محلية تحددها سرعة الرياح وسرعة دورانه، لذا تُلوى الشفرات بحيث يعمل كل مقطع قرب زاوية أفضل نسبة رفع إلى سحب.

تعطي نظرية المقطع الرقيق التقدير الأول لرفع المقطع هذا: $c_l = 2\pi(\alpha - \alpha_{L=0})$. وتحسّنه طرق الألواح وبيانات أنفاق الرياح. وتشير الوزارة إلى أن التوربينات البرية تتراوح من 100 كيلوواط إلى عدة ميغاواط، لذا فإن تحسينًا ببضعة في المئة في نسبة الرفع إلى السحب للمقطع يعني طاقة نظيفة إضافية كثيرة على مدى عمر التوربين.

على Saving Planets: الحلول · الجبر الخطي

المصادر: وزارة الطاقة الأمريكية: كيف تعمل توربينات الرياح؟ (بالإنجليزية) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.100 Aerodynamics (Fall 2005) (https://ocw.mit.edu/courses/16-100-aerodynamics-fall-2005/): محاضرات عن نظرية المقطع الرقيق.
- NASA Glenn: FoilSim interactive airfoil simulator (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/FoilSim/index.html): قارن النظرية بالمحاكي.
- NASA Glenn: Lift from flow turning (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/foil2.html): صفحة مجانية من NASA.
- 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/): الموائع في Unified Engineering.

☐ أنهيت هذه الوحدة

الأجنحة المحدودة والسحب المستحث

دوامات أطراف الجناح والانحراف السفلي للهواء، وزاوية الهجوم المستحثة، ونظرية خط الرفع لبرانتل، وتوزيع الرفع الإهليلجي، وكفاءة الباع، والسحب المستحث C_Di = C_L²/(πeAR)، وميل رفع الجناح المحدود، ونسبة الباع، والجنيحات الطرفية والأجنحة المدعّمة بالدعامات.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- فسّر كيف تولّد دوامات الأطراف الانحراف السفلي والسحب المستحث.
- احسب السحب المستحث باستخدام معامل كفاءة الباع.
- أوجد ميل رفع الجناح المحدود.
- فسّر كيف تقلل نسبة الباع والجنيحات الطرفية السحب المستحث.

المفاهيم الأساسية

- على الجناح المحدود، يلتف الهواء عالي الضغط من الأسفل حول الأطراف نحو الأعلى منخفض الضغط، مكوّنًا دوامات تابعة. وهي تستحث سرعة نحو الأسفل (انحرافًا سفليًا) عند الجناح، فتميل الجريان المحلي بالزاوية المستحثة α_i.
- إمالة متجه الرفع إلى الخلف بمقدار α_i تولّد مركبة سحب: السحب المستحث، وهو ثمن توليد الرفع بباع محدود. ويكون أكبر ما يكون عند السرعة المنخفضة وC_L العالي.
- تنمذج نظرية خط الرفع لبرانتل الجناح كدوامة مقيدة مع صفيحة من الدوامات التابعة. ويعطي توزيع الرفع الإهليلجي انحرافًا سفليًا منتظمًا، α_i = C_L/(πAR)، وأدنى سحب مستحث C_Di = C_L²/(πAR).
- للأجنحة الحقيقية كفاءة باع e < 1: C_Di = C_L²/(πeAR). ونسبة الباع AR = b²/S هي الرافعة الأساسية: مضاعفة AR تنصّف السحب المستحث.
- ميل رفع الجناح المحدود أقل من 2π: a = a₀/(1 + a₀/(πeAR)). والجنيحات الطرفية والأجنحة الطويلة الرفيعة المدعّمة كلاهما يقللان السحب المستحث بإضعاف دوامات الأطراف أو توزيعها.

المعادلات الأساسية

$$AR = \frac{b^2}{S}$$

AR=(b^2)/(S)

نسبة الباع

$$\alpha_i = \frac{C_L}{\pi AR}$$

α_i=(C_L)/(π AR)

الزاوية المستحثة (إهليلجي)

$$C_{D_i} = \frac{C_L^2}{\pi e A R}$$

`C_D_i=(C_L^2)/(π eAR)`

السحب المستحث

$$a = \frac{a_0}{1 + a_0/(\pi e A R)}$$

`a=(a_0)/(1+a_0/(π eAR))`

ميل الرفع للجناح المحدود

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 7.1 جناح فيه AR = 8 وe = 0.9 يطير عند C_L = 0.5. أوجد C_Di.

1. C_Di = 0.25/(π × 0.9 × 8).

الإجابة: C_Di = 0.01105.

مثال 7.2 أوجد ميل رفع ذلك الجناح إذا كان $a_0 = 2\pi$ لكل راديان.

1. a = 2π/(1 + 2π/(π × 0.9 × 8)) = 6.2832/1.2778.

الإجابة: a = 4.917 لكل راديان (0.0858 لكل درجة).

مثال 7.3 أوجد الزاوية المستحثة لجناح إهليلجي (AR = 8) عند C_L = 0.5.

1. α_i = 0.5/(π × 8) rad.

الإجابة: α_i = 0.01989 rad = 1.14°.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. جناح فيه b = 30 m وS = 100 m². أوجد AR.

   900/100 = 9.

2. ارفع AR من 8 إلى 12 مع e وC_L نفسيهما. ما C_Di الجديد؟

0.0.01105 × 8/12 = 0.00737.

3. متى يكون السحب المستحث أكبر ما يكون؟

عند السرعة المنخفضة وـC_L العالي، مثل الإقلاع والصعود.

4. ما قيمة e للجناح الإهليلجي؟

e = 1.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: السحب المستحث يأتي من احتكاك السطح.
في الحقيقة: إنه ميل الرفع إلى الخلف بسبب الانحراف السفلي، وهو أثر غير لزج.

خرافة: للجناح المحدود ميل الرفع نفسه لمقطعه.
في الحقيقة: إنه أقل بسبب الانحراف السفلي.

خرافة: تعمل الجنيحات الطرفية بإضافة مساحة للجناح.
في الحقيقة: إنها تُضعف أساسًا دوامات الأطراف وانحرافها السفلي.

بطاقات تعليمية

الانحراف السفلي للهواء

تستحثه الدوامات التابعة.

نسبة الباع

b^2/S.

السحب المستحث

$C_L^2/(\pi e AR)$.

الزاوية المستحثة

$C_L/(\pi AR)$.

كفاءة الباع

$e \le 1$.

ميل الجناح المحدود

$a_0/(1 + a_0/\pi e AR)$.

اختبار ذاتي

1. معامل السحب المستحث هو...

$C_L/(\pi e AR)$

$C_L^2/(\pi e AR)$

πeAR/C_L²

C_L²AR

C_L²/(πeAR). نتيجة خط الرفع.

2. مضاعفة نسبة الباع تغيّر السحب المستحث بمعامل…

2×

½×

4×

لا شيء

C_Di ∝ ½×. 1/AR.

3. أدنى سحب مستحث يأتي من…

توزيع رفع مستطيل

توزيع رفع إهليلجي

مثلثي

محمّل عند الأطراف

توزيع رفع إهليلجي. انحراف سفلي منتظم.

4. نسبة الباع هي…

S/b

b²/S

c/b

b/c²

b²/S. مربع الباع مقسومًا على المساحة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يروي NASA Armstrong أن الجنيحات الطرفية طارت لأول مرة على طائرة KC-135 في 24 يوليو 1979؛ وعلى مدى 48 رحلة تجريبية رفعت كفاءة الوقود بنسبة 6 إلى 7 بالمئة وخفضت السحب بما يصل إلى 7 بالمئة. وتقول NASA إن الجنيحات الطرفية موجودة الآن على نحو 10000 طائرة نفاثة، ووفّرت أكثر من 10 مليارات غالون من وقود الطائرات وأكثر من 130 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون.

الخطوة التالية تدفع نسبة الباع أبعد. عقد Sustainable Flight Demonstrator الذي منحته NASA في 2023 (425 مليون دولار من NASA على مدى سبع سنوات، ونحو 725 مليون دولار من الشركاء) مخصص لجناح عابر للصوت مدعّم بالدعامات: أجنحة طويلة جدًا ورفيعة تسندها دعامات، وتقول NASA إن ذلك يعني سحبًا أقل، ومع تطورات أخرى، خفضًا يصل إلى 30% في استهلاك الوقود والانبعاثات. هذه هي $C_{Di} = C_L^2/(\pi e AR)$ في التطبيق.

على Saving Planets: الحلول · الاستاتيكا

المصادر: NASA Armstrong: On the winglets of innovation (2023) (https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/on-the-winglets-of-innovation-with-nasa-armstrong-2/) · NASA: NASA issues award for greener, more fuel-efficient airliner of future (Jan. 18, 2023) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-issues-award-for-greener-more-fuel-efficient-airliner-of-future/)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn: Induced drag (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/induced.html): صفحة مجانية من NASA.
- NASA Glenn: Lift to drag ratio (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/ldrat.html): صفحة مجانية من NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.100 Aerodynamics (Fall 2005) (https://ocw.mit.edu/courses/16-100-aerodynamics-fall-2005/): محاضرات عن خط الرفع.
- NASA Glenn: FoilSim interactive airfoil simulator (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/FoilSim/index.html): محاكي.

أنهيت هذه الوحدة

الجريان اللزج وعدد رينولدز والطبقات الحدية

شرط عدم الانزلاق، وعدد رينولدز والتشابه، ومعادلات نافييه–ستوكس بالكلمات، والطبقات الحدية الصفائحية والمضطربة، وحل بلاسيوس للصفيحة المستوية، واحتكاك السطح، والانتقال، والانفصال وسحب الضغط، وتفصيل سحب الطائرة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- احسب عدد رينولدز واستخدمه للتشابه.
- أوجد سماكة الطبقة الحدية وسحب الاحتكاك على صفيحة مستوية.
- ميّز بين الطبقات الحدية الصفائحية والمضطربة.
- فسّر الانفصال وسحب الضغط وتفصيل السحب الكلي.

المفاهيم الأساسية

- يلتصق المائع اللزج بالسطح (عدم الانزلاق)، فتتكوّن طبقة حدية رقيقة ترتفع فيها السرعة من الصفر إلى سرعة الجريان الخارجي. وخارجها تعمل النظرية غير اللزجة من الوحدات 7–4 جيدًا.
- عدد رينولدز Re = ρVL/μ يقارن قوى القصور بالقوى اللزجة. جريانان متشابهان هندسيًا لهما Re نفسه (وعدد ماخ نفسه) لهما المعاملات نفسها؛ ولهذا تنجح اختبارات أنفاق الرياح.
- تضيف معادلات نافييه–ستوكس الإجهادات اللزجة إلى معادلة أويلر. ويعطي تبسيط الطبقة الحدية لبرانتل وحل بلاسيوس، لصفيحة مستوية صفائحية، δ = 5.0x/√Re_x وC_f = 1.328/√Re_L.
- فوق عدد رينولدز للانتقال (نحو 5×10^5 على صفيحة مستوية ملساء) تصبح الطبقة مضطربة: أسمك، باحتكاك أكبر، C_f ≈ 0.074/Re_L^0.2، لكنها أكثر مقاومة للانفصال.
- في تدرج ضغط معاكس قد تنفصل الطبقة الحدية، تاركة أثرًا عريضًا وسحب ضغط. السحب الكلي = احتكاك السطح + سحب الضغط (الشكل) + السحب المستحث + سحب الموجة (الوحدة 9).

المعادلات الأساسية

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

```
Re=(ρ VL)/(μ)
```

عدد رينولدز

$$\delta = \frac{5.0 x}{\sqrt{Re_x}}$$

```
=5.0x_x
```

سماكة الطبقة الحدية الصفائحية

$$C_f = \frac{1.328}{\sqrt{Re_L}}$$

C_f=1.328_L

الاحتكاك الصفائحي (بلاسيوس)

$$C_f = \frac{0.074}{Re_L^{0.2}}$$

C_f=0.074Re_L^0.2

الاحتكاك المضطرب (صفيحة مستوية)

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 8.1 أوجد عدد رينولدز لجناح وتره 1.5 m عند 70 m/s عند مستوى سطح البحر.

1. Re = 1.225 × 70 × 1.5/1.789 × 10⁻⁵.

الإجابة: Re = 7.19 × 10⁶ (مضطرب على معظم الوتر).

مثال 8.2 قارن معاملي الاحتكاك الصفائحي والمضطرب عند Re_L = 10⁶، وسماكة الطبقة الحدية عند x = 1 m.

1. C_f الصفائحي = 1.328/1000؛ C_f المضطرب = 0.074/15.85.
2. δ_lam = 5.0/1000؛ δ_turb = 0.37/15.85.

الإجابة: C_f = 0.00133 vs 0.00467; δ = 5.0 mm vs 23.3 mm.

مثال 8.3 صفيحة مستوية 1 m × 1 m عند 30 m/s عند مستوى سطح البحر تبقى صفائحية (Re = 2.05 × 10⁶، بالافتراض). أوجد سحب الاحتكاك على وجه واحد.

1. q = ½ × 1.225 × 900 = 551.25 Pa.
2. C_f = 1.328/√(2.054 × 10⁶) = 0.000927.
3. D = qSC_f.

الإجابة: D = 0.511 N.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. نموذج بمقياس 1/10 يجب أن يطابق Re في الهواء نفسه. ما السرعة؟

10 أضعاف سرعة الحجم الكامل (وغالبًا يستحيل ذلك، لذا تُستخدم أنفاق مضغوطة أو مبرّدة).

2. هل يزداد C_f أم ينقص مع ارتفاع Re؟

ينقص في الطبقات الصفائحية والمضطربة كلتيهما.

3. لماذا في كرات الغولف نقرات؟

الطبقة الحدية المضطربة تنفصل متأخرة، فتخفض سحب الضغط.

4. اذكر أربع مكونات للسحب.

احتكاك السطح، الضغط، المستحث، الموجة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الجريان المضطرب يعني دائمًا سحبًا أكبر.
في الحقيقة: احتكاك أكبر، لكن غالبًا سحب ضغط أقل إذا تأخر الانفصال.

خرافة: الطبقة الحدية سميكة.
في الحقيقة: إنها من ملليمترات إلى سنتيمترات على الجناح.

خرافة: عدد رينولدز يعتمد على السرعة فقط.
في الحقيقة: يعتمد على الكثافة والسرعة والطول واللزوجة.

بطاقات تعليمية

عدم الانزلاق

سرعة صفرية عند الجدار.

عدد رينولدز

$\rho VL/\mu$.

δ الصفائحية

$5.0x/\sqrt{Re_x}$.

C_f الصفائحي

$1.328/\sqrt{Re_L}$.

C_f المضطرب

$0.074/Re_L^{0.2}$.

الانفصال

تدرج معاكس، أثر، سحب ضغط.

اختبار ذاتي

1. يقارن عدد رينولدز بين...

القصور إلى اللزوجة

الضغط إلى الجاذبية

السرعة إلى الصوت

الرفع إلى السحب

القصور إلى اللزوجة. Re = ρVL/μ.

2. C_f الصفائحي لصفيحة مستوية هو...

0.074/Re^0.2

1.328/√Re

5/√Re

2π

1.328/√Re. بلاسيوس.

3. يُشجِّع الانفصال بـ...

تدرج ضغط مواتٍ

تدرج ضغط معاكس

كثافة عالية

الصدمات فقط

تدرج ضغط معاكس. الضغط المتزايد يبطئ الطبقة.

4. عدم الانزلاق يعني...

أن سرعة الهواء عند الجدار صفر

لا احتكاك

جريان غير لزج

لا ضغط

أن سرعة الهواء عند الجدار صفر. المائع يلتصق بالجدار.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

احتكاك السطح حصة كبيرة من سحب طائرة الركاب في رحلة الطيران، ولهذا يعمل المهندسون بجد على الأسطح الملساء وعلى إبقاء الطبقات الحدية صفائحية مدة أطول. وكل وحدة سحب تُزال هي وقود وكربون لا يُحرقان.

تذكر EPA أن الطائرات المشمولة بمعاييرها لغازات الدفيئة تمثل 10 بالمئة من انبعاثات غازات الدفيئة من النقل في الولايات المتحدة و3 بالمئة من إجمالي انبعاثات البلاد، وأن معاييرها لعام 2020 تتوافق مع معايير CO_2 لمنظمة الطيران المدني الدولي. وهندسة الطبقة الحدية، من الأخاديد الدقيقة إلى أجنحة الجريان الصفائحي، طريق للوفاء بتلك القواعد.

على Saving Planets: الحلول · المعادلات التفاضلية

المصادر: U.S. EPA: Regulations for greenhouse gas emissions from aircraft (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-greenhouse-gas-emissions-aircraft) · NASA Glenn: Boundary layer (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundlay.html)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn: Boundary layer (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundlay.html): صفحة مجانية من NASA.
- NASA Glenn: Reynolds number (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/reynolds.html): صفحة مجانية من NASA.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- MIT OpenCourseWare 16.100 Aerodynamics (Fall 2005) (https://ocw.mit.edu/courses/16-100-aerodynamics-fall-2005/): محاضرات عن الجريان اللزج.

أنهيت هذه الوحدة

الجريان الانضغاطي: العلاقات الأيزنتروبية وموجات الصدمة

متى تهم الانضغاطية، وخواص الركود، والعلاقات الأيزنتروبية، وعلاقة المساحة–السرعة والفوهات، والصدمات العمودية، والصدمات المائلة وموجات التمدد باختصار، وعدد ماخ الحرج، وتباعد السحب، وسحب الموجة، والمقاطع فوق الحرجة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- استخدم العلاقات الأيزنتروبية لإيجاد خواص الركود.
- فسّر علاقة المساحة–السرعة والفوهات المختنقة.
- احسب الخواص عبر صدمة عمودية.
- فسّر عدد ماخ الحرج ولماذا تؤخر المقاطع فوق الحرجة ارتفاع السحب.

المفاهيم الأساسية

- دون نحو M = 0.3 تكون تغيرات الكثافة أقل من 5% ويمكن معاملة الجريان كجريان غير انضغاطي. وفوق ذلك يجب تضمين تغيرات الطاقة والكثافة.
- خواص الركود للجريان الأديباتي الأيزنتروبي: $T_0/T = 1 + (\gamma - 1)M^2/2$، $p_0/p = (T_0/T)^{(\gamma/(\gamma-1))}$، $\rho_0/\rho = (T_0/T)^{(1/(\gamma-1))}$.
- المساحة–السرعة: $dA/A = (M^2 - 1)dV/V$. يتسارع الجريان دون الصوتي في مجرى متقارب؛ ويتسارع الجريان فوق الصوتي في مجرى متباعد. ويحدث الجريان الصوتي عند العنق؛ وA/A^* تحدد عدد ماخ.
- الصدمة العمودية قفزة رقيقة غير عكوسة: يصبح الجريان فوق الصوتي دون صوتي، ويقفز الضغط والكثافة ودرجة الحرارة بينما ينخفض الضغط الكلي. عند $\gamma = 1.4$ و$M_1 = 2$ تكون $M_2 = 0.577$ و$p_2/p_1 = 4.5$.
- على جناح عند سرعة دون صوتية عالية، يبلغ الجريان فوق السطح العلوي $M = 1$ أولًا، عند عدد ماخ الحرج. وبعده تتكوّن صدمة ويرتفع السحب بحدة (تباعد السحب). وتدفع المقاطع فوق الحرجة وسهمية الجناح هذا الارتفاع إلى سرعات أعلى.

المعادلات الأساسية

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2$$

(T_0)/(T)=1+(γ-1)/(2)M^2

درجة حرارة الركود

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

(p_0)/(p)=((T_0)/(T))^γ/(γ-1)

نسبة الضغط الأيزنتروبية

$$M_2^2 = \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2}{\gamma M_1^2 - \frac{\gamma-1}{2}}$$

`M_2^2=1+(γ-1)/(2)M_1^2γ M_1^2-(γ-1)/(2)`

عدد ماخ بعد صدمة عمودية

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1}(M_1^2 - 1)$$

`(p_2)/(p_1)=1+(2γ)/(γ+1)(M_1^2-1)`

نسبة الضغط عبر صدمة عمودية

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 9.1 طائرة ركاب تطير عند M = 0.85. أوجد T_0/T وp_0/p.

1. $T_0/T = 1 + 0.2 \times 0.7225 = 1.1445$.
2. $p_0/p = 1.1445^{3.5}$.

الإجابة: $T_0/T = 1.1445$; $p_0/p = 1.604$.

مثال 9.2 أوجد M_2 وp_2/p_1 وρ_2/ρ_1 وT_2/T_1 عبر صدمة عمودية فيها $M_1 = 2$.

1. $M_2 = \sqrt{(1.8/5.4)}$.
2. $p_2/p_1 = 1 + (2.8/2.4)(3)$.
3. $\rho_2/\rho_1 = 2.4 \times 4/(2 + 0.4 \times 4) = 2.667$.
4. $T_2/T_1 = (p_2/p_1)/(\rho_2/\rho_1)$.

الإجابة: $M_2 = 0.577$, $p_2/p_1 = 4.5$, $\rho_2/\rho_1 = 2.667$, $T_2/T_1 = 1.688$.

مثال 9.3 تقدّر NASA سرعة الصوت عند ارتفاع الطيران بنحو 660 mph. حوّلها إلى m/s وقارنها بقيمة الغلاف الجوي القياسي عند 11 km (295.1 m/s).

1. $660 \times 0.44704 = 295.0$ m/s.

الإجابة: 295.0 m/s، ضمن 0.1% من قيمة الغلاف الجوي القياسي.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد p_0/p عند $M = 2$.

7.82 = 3.5^1.8.

2. أوجد A/A* عند M = 2.

1.688.

3. دون أي عدد ماخ يمكن عادة إهمال تغيرات الكثافة؟

نحو 0.3.

4. عبر صدمة عمودية، هل يرتفع الضغط الكلي أم ينخفض؟

ينخفض (ترتفع الإنتروبيا).

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الصدمة تسرّع الجريان.
في الحقيقة: الصدمة العمودية تجعل الجريان فوق الصوتي دون صوتي.

خرافة: سحب الموجة لا يهم إلا فوق M = 1.
في الحقيقة: يبدأ فوق عدد ماخ الحرج، أي دون M = 1 على الجناح.

خرافة: المجرى المتباعد يبطئ الجريان دائمًا.
في الحقيقة: إنه يسرّع الجريان فوق الصوتي.

بطاقات تعليمية

حد عدم الانضغاط

M < 0.3.

T_0/T

$1 + 0.2M^2$.

p_0/p

$(T_0/T)^{3.5}$.

المساحة–السرعة

$dA/A = (M^2 - 1)dV/V$.

صدمة عمودية M=2

$M_2 = 0.577$, $p_2/p_1 = 4.5$.

ماخ الحرج

M المحلي 1 = على الجناح.

اختبار ذاتي

1. T_0/T عند M = 1 هي...

1.0

1.2

1.4

2.0

.1.2. 1 + 0.2

2. يتسارع الجريان فوق الصوتي في...

مجرى متقارب

مجرى متباعد

مجرى ثابت المقطع

لا مجرى

مجرى متباعد. $dA/A = (M^2 - 1)dV/V$.

3. p_2/p_1 عبر صدمة عمودية عند $M_1 = 2$ هي...

2

4.5

7.8

1.7

4.5. علاقة الصدمة العمودية.

4. المقاطع فوق الحرجة...

ترفع عدد ماخ لتباعد السحب

تلغي الرفع

تضيف تقوسًا عند المقدمة فقط

تعمل عند ماخ 2 فقط

ترفع عدد ماخ لتباعد السحب. صدمة أضعف.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح NASA أنه مع اقتراب طائرات الركاب من سرعة الصوت، نحو 660 mph عند ارتفاع الطيران، تتكوّن موجة صدمة ثابتة على الجناح التقليدي وتضيف سحبًا. وقد قلّل مقطع ويتكومب فوق الحرج، الأكثر تسطحًا من الأعلى والمستدير من الأسفل، تلك الصدمة إلى أدنى حد، فرفع الكفاءة بما يصل إلى 15% بحسب NASA.

هذه قصة ماخ الحرج وتباعد السحب من هذه الوحدة. تقول NASA إن التصميم أصبح المعيار في الصناعة ويوفر مليارات الدولارات من الوقود سنويًا؛ ووقود أقل يُحرق في رحلة الطيران يعني CO_2 أقل من الرحلات التي تشكّل حصة كبيرة من انبعاثات الطيران.

على Saving Planets: مقدمة في هندسة الطيران والفضاء · الطقس الفضائي

المصادر: NASA: How a NASA engineer created the modern airplane wing (2016) (https://www.nasa.gov/aeronautics/how-a-nasa-engineer-created-the-modern-airplane-wing/) · NASA Glenn: Normal shock wave (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/normal.html)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn: Isentropic flow (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/isentrop.html): صفحة مجانية من NASA.
- NASA Glenn: Normal shock wave (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/normal.html): صفحة مجانية من NASA.
- NASA Glenn: Mach number (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mach.html): صفحة مجانية من NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.100 Aerodynamics (Fall 2005) (https://ocw.mit.edu/courses/16-100-aerodynamics-fall-2005/): محاضرات عن الجريان الانضغاطي.

أنهيت هذه الوحدة

أداء الطائرات: قطبية السحب والانزلاق والمدى والتحمل

قطبية السحب C_D = C_D0 + KC_L²، والدفع والقدرة المطلوبان، وسرعة أدنى سحب، وأقصى نسبة رفع إلى سحب، والطيران الانزلاقي، ومعادلتا بريغيه للمدى والتحمل، وكيف تُترجم الكفاءة الهوائية إلى وقود وانبعاثات.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- ابنِ قطبية سحب وأوجد (L/D)max.
- أوجد سرعة أدنى سحب ومسافة الانزلاق.
- استخدام معادلة بريغيه للمدى.
- اربط خفض السحب باستهلاك الوقود.

المفاهيم الأساسية

- قطبية السحب C_D = C_D0 + KC_L² مع K = 1/(πeAR) تجمع سحب الرفع الصفري (الطفيلي) والسحب المستحث.
- في الطيران الأفقي L = W وT = D. ويكون السحب أدنى ما يكون حين يتساوى السحب الطفيلي والمستحث: C_L* = √(C_D0/K)، ما يعطي (L/D)max = 1/(2√(KC_D0)).
- الانزلاق: دون دفع تساوي نسبة الانزلاق L/D، لذا أفضل مسافة انزلاق من ارتفاع h هي h(L/D)max.
- مدى بريغيه لطائرة نفاثة: R = (V/c)(L/D) ln(W_i/W_f)، حيث c استهلاك الوقود النوعي للدفع. ويزداد المدى مباشرة مع L/D، لذا تتضاعف الكفاءة الهوائية مع كفاءة المحرك ونسبة الأوزان.
- لرحلة محددة، رفع L/D يخفض الوقود اللازم؛ ولهذا تخفض الجنيحات الطرفية والمقاطع فوق الحرجة والأجنحة ذات نسبة الباع العالية كلها CO_2.

المعادلات الأساسية

$$C_D = C_{D0} + K C_L^2,\ K = \frac{1}{\pi e A R}$$

C_D=C_D0+KC_L^2,\ K=(1)/(π eAR)

قطبية السحب

$$\left(\frac{L}{D}\right)_{max} = \frac{1}{2\sqrt{K C_{D0}}}$$

(LD)_max=12_D0

أقصى نسبة رفع إلى سحب

$$C_L^* = \sqrt{C_{D0}/K}$$

C_L^*=_D0/K

معامل الرفع لأدنى سحب

$$R = \frac{V}{c}\frac{L}{D}\ln\frac{W_i}{W_f}$$

`R=V/cL/D(W_i)/(W_f)`

مدى بريغيه (نفاثة)

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 10.1 جناح فيه AR = 8 وe = 0.9 وC_D0 = 0.02. أوجد K و(L/D)max و*C_L.

1. K = 1/(π × 0.9 × 8) = 0.04421.
2. (L/D)max = 1/(2√(0.04421 × 0.02)).
3. C_L* = √(0.02/0.04421).

الإجابة: K = 0.04421، (L/D)max = 16.81، C_L* = 0.673.

مثال 10.2 لتلك الطائرة (W = 9810 N، S = 16 m²، مستوى سطح البحر)، أوجد سرعة أدنى سحب وأفضل مسافة انزلاق من 1000 m.

1. V = √(2W/(ρSC_L*)) = √(19,620/(1.225 × 16 × 0.6726)).
2. الانزلاق = 1000 × 16.81.

الإجابة: V = 38.6 m/s؛ مسافة الانزلاق 16.8 km.

مثال 10.3 طائرة نفاثة (قيم نموذجية) تطير بسرعة V = 230 m/s مع c = 1.6 × 10⁻⁴ s⁻¹ وL/D = 17 وW_i/W_f = 1.25. أوجد المدى.

1. R = (230/1.6 × 10⁻⁴) × 17 × ln 1.25.

الإجابة: R = 5453 km.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ارفع L/D من 17 إلى 18 في مثال بريغيه. ما المدى الجديد؟

   5453 × 18/17 = 5774 km.

2. ما C_D الذي تعطيه القطبية عند *C_L؟

.2C_D0 = 0.04

3. ما L/D عند C_L = 1.0 للقطبية في المثال المحلول؟

.1.0/0.06421 = 15.57

4. طائرة شراعية لها L/D = 40. ما المسافة من 2 km؟

.80 km

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: أفضل انزلاق يكون عند أبطأ سرعة.
في الحقيقة: يكون عند سرعة أدنى سحب، وهي أسرع من سرعة الانهيار.

خرافة: المدى يعتمد فقط على الوقود المحمول.
في الحقيقة: يعتمد على L/D وكفاءة المحرك ونسبة الأوزان.

خرافة: السحب الطفيلي دائمًا الجزء الأكبر.
في الحقيقة: عند السرعة المنخفضة يهيمن السحب المستحث.

بطاقات تعليمية

قطبية السحب

.C_D0 + KC_L²

K

.1/(πeAR)

(L/D)max

.1/(2√(KC_D0))

C_L*

.√(C_D0/K)

الانزلاق

المسافة L/D · h =.

بريغيه

.R = (V/c)(L/D) ln(W_i/W_f)

اختبار ذاتي

1. عند أدنى سحب...

الطفيلي = المستحث

المستحث 0 =

C_L = 0

V = سرعة الانهيار

الطفيلي = المستحث. مشتقة D تساوي صفرًا.

2. نسبة الانزلاق تساوي...

L/D

D/L

C_L

W/S

L/D. لا دفع.

3. مدى بريغيه يتناسب مع...

D/L

L/D

C_D0

K

.L/D ∝ L/D. R

4. K في القطبية هو...

1/(πeAR)

πeAR

C_D0

2π

1/(πeAR). معامل السحب المستحث.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يقول بيان NASA لعام 2023 عن Sustainable Flight Demonstrator إن الطائرات ذات الممر الواحد مسؤولة عن نحو نصف انبعاثات الطيران في العالم، وإن تصميم الجناح المدعّم بالدعامات، مع تطورات أخرى، قد يخفض استهلاك الوقود والانبعاثات بما يصل إلى 30%. ويربط ذلك بهدف صافي انبعاثات صفري للطيران بحلول 2050.

تبيّن معادلة بريغيه السبب: المدى وكفاءة الوقود يتناسبان مع L/D. وتشير EPA إلى أن الطائرات المشمولة تمثل 10 بالمئة من انبعاثات غازات الدفيئة من النقل في الولايات المتحدة، لذا فإن بضع نقاط في L/D، مضروبة في آلاف الرحلات يوميًا، تهم المناخ.

على Saving Planets: الحلول · التفاضل والتكامل 1

المصادر: NASA: NASA issues award for greener, more fuel-efficient airliner of future (Jan. 18, 2023) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-issues-award-for-greener-more-fuel-efficient-airliner-of-future/) · U.S. EPA: Regulations for greenhouse gas emissions from aircraft (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-greenhouse-gas-emissions-aircraft)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn: Lift to drag ratio (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/ldrat.html): صفحة مجانية من NASA.
- NASA Glenn: Induced drag (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/induced.html): صفحة مجانية من NASA.
- 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/): محاضرات عن الأداء.
- MIT OpenCourseWare 16.100 Aerodynamics (Fall 2005) (https://ocw.mit.edu/courses/16-100-aerodynamics-fall-2005/): الديناميكا الهوائية في MIT.

شاهد المحاضرة

Lecture 12: Aircraft Performance (https://ocw.mit.edu/courses/16-687-private-pilot-ground-school-january-iap-2019/resources/lecture-12-aircraft-performance/) (باللغة الإنجليزية)

MIT 16.687 Private Pilot Ground School (IAP 2019), 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

مجموعات المسائل

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

1. خواص الموائع والغلاف الجوي القياسي
   4 مسائل
2. استاتيكا الموائع ومعادلة برنولي وقياس سرعة الهواء

4 مسائل

3. قوانين الحفظ: الكتلة والزخم والطاقة؛ أحجام التحكم ونظرية الزخم
4 مسائل
4. الجريان الجهدي ونظرية كوتا–جوكوفسكي
4 مسائل
5. المقاطع الجنيحية ومعاملات الرفع والسحب والعزم
4 مسائل
6. نظرية المقطع الجنيحي الرقيق
4 مسائل
7. الأجنحة المحدودة والسحب المستحث
4 مسائل
8. الجريان اللزج وعدد رينولدز والطبقات الحدية
4 مسائل
9. الجريان الانضغاطي: العلاقات الأيزنتروبية وموجات الصدمة
4 مسائل
10. أداء الطائرات: قطبية السحب والانزلاق والمدى والتحمل
4 مسائل

المختبر (Aerodynamics lab)

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

يمكن إجراء كل مختبر في محاكاة مجانية أو بالورق وأدوات منزلية. لا ترمِ الطائرات الشراعية إلا في أماكن مفتوحة، وأبدًا نحو الأشخاص، وابتعد عن الطرق وخطوط الكهرباء؛ واستخدم سلّمًا صغيرًا متينًا، لا كرسيًا، لاختبارات الإسقاط.

مرجع السلامة: OSHA: Fall protection (https://www.osha.gov/fall-protection)

المختبر A: جدول بيانات الغلاف الجوي القياسي

الأسبوع 1

الهدف: ابنِ نموذج الغلاف الجوي القياسي من NASA Glenn في جدول بيانات وشاهد كيف تنخفض درجة الحرارة والضغط والكثافة مع الارتفاع.

$$T = 15.04 - 0.00649h,\ \ p = 101.29\left[\frac{T+273.1}{288.08}\right]^{5.256},\ \ \rho = \frac{p}{0.2869(T+273.1)}$$

```
T=15.04-0.00649h,\ \ p=101.29[(T+273.1)/(288.08)]^5.256,\ \ ρ=(p)/(0.2869(T+273.1))
```

نموذج التروبوسفير من NASA Glenn (h بالمتر، T بـ °C، p بـ kPa)

الإجراء

1. أنشئ عمودًا للارتفاعات من 0 إلى 11000 m بخطوات 500 m.
2. أضف أعمدة لـ T وp وρ باستخدام صيغ NASA المترية.
3. أضف سرعة الصوت (a = √(1.4 × 287 × (T + 273.15)).
4. ارسم ρ/ρ₀ مقابل الارتفاع وقارنه بإعداد الارتفاع في FoilSim.

جدول البيانات

h (m)	T (°C)	p (kPa)	ρ (kg/m³)
0	15.04	101.40	1.2266
5,000	−17.41	54.11	0.7377
11,000	−56.35	22.71	0.3652

قيم من ملاءمات منحنيات NASA Glenn؛ وجداول الغلاف الجوي القياسي في الكتب تختلف قليلًا (مثلًا 1.225 kg/m³ عند مستوى سطح البحر).

مثال حسابي

1. ρ(11 km)/ρ(0) = 0.3652/1.2266 = 0.298.
2. a(11 km) = √(1.4 × 287 × 216.8) = 295.1 m/s.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات مجاني يفي بالغرض.

- NASA Glenn: FoilSim interactive airfoil simulator (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/FoilSim/index.html)
- NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric units) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/atmosmet.html)

الصلة بالكوكب: يقع ارتفاع الطيران قرب أعلى هذا الجدول، حيث تخفض الكثافة المنخفضة السحب؛ ونموذج NASA هو المستخدم في FoilSim. NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric units) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/atmosmet.html)

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

المختبر B: برنولي وأنبوب فنتوري وأنبوب بيتو

الأسبوع 2

الهدف: شاهد الضغط ينخفض حيث يتسارع الجريان، وحوّل قراءة ضغط بيتو الساكن إلى سرعة هواء.

$$V = \sqrt{2(p_0 - p)/\rho}$$

V=2(p_0-p)/ρ

سرعة الهواء ببيتو الساكن

الإجراء

1. افتح PhET Fluid Pressure and Flow، تبويب Flow؛ ضيّق الأنبوب واقرأ الضغط والسرعة عند المقطعين.
2. تحقق من الاستمرارية $A_1V_1 = A_2V_2$ ومن هبوط الضغط وفق برنولي.
3. في المنزل: أمسك شريطًا من الورق تحت شفتيك وانفخ فوقه؛ فيرتفع. علّق ورقتين على بعد 3 cm وانفخ بينهما؛ فتقتربان.
4. املأ الجدول لأنبوب بيتو عند مستوى سطح البحر.

جدول البيانات

$p_0 - p$ (Pa)	V (m/s)
100	12.8
500	28.6
1500	49.5

محسوب لـ $\rho = 1.225\ kg/m^3$؛ وعروض الورق تُظهر الأثر لا الأرقام الدقيقة (يرتفع الشريط أيضًا لأن النفثة تتبع الورق المنحني).

مثال حسابي

1. $V = \sqrt{(2 \times 500/1.225)} = 28.6$ m/s.
2. مضاعفة V تتطلب 4 أضعاف فرق الضغط.

السلامة

- انفخ بلطف؛ وتوقف إن شعرت بدوار.

بديل منزلي أو افتراضي

- عروض الورق هي المختبر المنزلي.

PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow) · PhET: Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure)

الصلة بالكوكب: تشير NASA إلى أن كثافة هواء المريخ أقل من 1% من كثافة هواء الأرض، لذا فإن قراءة بيتو نفسها على المريخ تعني سرعة أكبر بنحو 10 أضعاف. NASA Science: Ingenuity Mars Helicopter (https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/ingenuity-mars-helicopter/)

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

المختبر C: منحنى الرفع في NASA FoilSim

الأسبوع 8

الهدف: قِس معامل الرفع مقابل زاوية الهجوم، وأوجد ميل الرفع وزاوية الرفع الصفري، وقارنهما بنظرية المقطع الرقيق.

$$c_l = 2\pi(\alpha - \alpha_{L=0})$$

c_l=2π(α-α_L=0)

نظرية المقطع الرقيق

الإجراء

1. افتح NASA FoilSim، واختر مقطعًا متماثلًا، واضبط السرعة والارتفاع.
2. سجّل الرفع عند α = 0°، 2°، 4°، 6°، … حتى 10°، وحوّله إلى c_l = L/(qS).
3. كرّر مع التقوس؛ وأوجد α_L=0.
4. ارسم المنحنيين وقارنهما بجدول النظرية.

جدول البيانات

α (°)	c_l النظري (متماثل)
0	0
2	0.219
4	0.439
6	0.658

قيم نظرية؛ يتضمن FoilSim السماكة وتصحيحات أخرى، لذا قد يختلف ميلك ببضعة في المئة.

مثال حسابي

1. الميل = 0.658/6 = 0.110 لكل درجة = 2π لكل راديان.
2. عند c_l = 0.548 = 0.08727 × 2π = 5°.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يعمل FoilSim في المتصفح.

NASA Glenn: FoilSim interactive airfoil simulator (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/FoilSim/index.html)

الصلة بالكوكب: تقول وزارة الطاقة إن شفرات التوربينات تولّد الرفع كالأجنحة؛ ويستخدم مصممو الشفرات منحنيات رفع كهذا لضبط زاوية كل مقطع. 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: الطائرات الورقية الشراعية ونسبة الباع ونسبة الانزلاق

الأسبوع 10

الهدف: قِس نسبة الانزلاق (L/D) لطائرات ورقية شراعية بنسب باع مختلفة وشاهد السحب المستحث عمليًا.

$$\frac{L}{D} = \frac{\text{distance}}{\text{height}}, \quad AR = \frac{b^2}{S}$$

LD=,\ \ AR=(b^2)/(S)

نسبة الانزلاق ونسبة الباع

الإجراء

1. اصنع طائرتين شراعيتين بسيطتين من ورق الطابعة بمساحة الجناح نفسها: واحدة قصيرة وعريضة، وأخرى طويلة وضيقة. أضف مشبك ورق عند المقدمة للتوازن.
2. أطلقهما بلطف، أفقيًا، من ارتفاع ثابت (مثلًا 1.5 m) في غرفة كبيرة أو مكان خارجي هادئ.
3. قِس المسافة الأفقية لـ 5 رحلات لكل منهما واحسب المتوسط.
4. احسب AR وL/D لكل منهما وقارن.

جدول البيانات

الطائرة الشراعية	b (m)	S (m²)	AR	المسافة من 1.5 m (m)	L/D
جناح قصير	0.20	0.010	4	6.0	4.0
جناح طويل	0.30	0.010	9	9.0	6.0

قيم نموذجية لتوضيح الطريقة؛ ونتائجك تعتمد على الطي والتوازن والإطلاق.

مثال حسابي

1. AR = 0.30²/0.010 = 9.
2. L/D = 9.0/1.5 = 6.0.

السلامة

- لا ترمِ أبدًا نحو الأشخاص أو الوجوه؛ أخلِ المكان أولًا.
- أطلق من الأرض أو من سلّم صغير متين، لا من كرسي (إرشادات OSHA للحماية من السقوط).

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

NASA Glenn: FoilSim interactive airfoil simulator (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/FoilSim/index.html) · NASA Glenn: Induced drag (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/induced.html)

الصلة بالكوكب: يستخدم جناح NASA المدعّم بالدعامات أجنحة طويلة جدًا ورفيعة للسبب نفسه الذي يجعل الطائرة الشراعية الطويلة تطير أبعد: سحب أقل. NASA: NASA issues award for greener, more fuel-efficient airliner of future (Jan. 18, 2023) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-issues-award-for-greener-more-fuel-efficient-airliner-of-future/)

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

المختبر E: سحب مرشح القهوة والسرعة الحدية

الأسبوع 11

الهدف: قِس السرعة الحدية، وأوجد معامل سحب، وبيّن أن السحب يزداد مع مربع السرعة.

$$mg = \tfrac{1}{2}\rho V_t^2 C_D A$$

mg=12ρ V_t^2C_DA

السحب يساوي الوزن عند السرعة الحدية

الإجراء

1. أسقط مرشح قهوة ورقيًا واحدًا من نحو 2 m وصوّره بالحركة البطيئة بجانب شريط قياس.
2. أوجد السرعة الحدية من آخر متر من السقوط.
3. كدّس 2 ثم 4 مرشحات (الشكل نفسه، وزن أكبر) وكرّر.
4. احسب C_D وتحقق من أن V_t تزداد مثل √m.

جدول البيانات

المرشحات	m (g)	V_t (m/s)	C_D
1	1.0	1.20	0.98
2	2.0	1.70	0.98

قيم نموذجية لمرشح قطره 12 cm؛ زِن مرشحاتك على ميزان مطبخ.

مثال حسابي

1. C_D = 2 × 0.00981/(1.225 × 1.20² × π × 0.06²) = 0.98.
2. V_t(مرشحان 2) = 1.20 × √2 = 1.70 m/s.

السلامة

- أسقط من ارتفاعك واقفًا أو من سلّم صغير متين فقط.
- أبقِ المكان خاليًا مما قد يسبب التعثر.

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

NASA Glenn: The drag equation (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/drageq.html) · PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow)

الصلة بالكوكب: تشير EPA إلى أن الطائرات المشمولة تمثل 3% من إجمالي انبعاثات غازات الدفيئة في الولايات المتحدة؛ والسحب هو ما تحرق محركاتها الوقود للتغلب عليه. U.S. EPA: Regulations for greenhouse gas emissions from

aircraft (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-greenhouse-gas-emissions-aircraft)

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

المختبر F: جدول بيانات قطبية السحب والمدى

الأسبوع 15

الهدف: ابنِ قطبية سحب، وأوجد (L/D)max، واستخدم معادلة بريغيه لترى كيف يغيّر خفض السحب المدى والوقود.

$$C_D = C_{D0} + \frac{C_L^2}{\pi e A R}$$

```
C_D=C_D0+(C_L^2)/(π eAR)
```

قطبية السحب

الإجراء

1. اضبط C_D0 = 0.02 وe = 0.9 وAR = 8 (قيم نموذجية).
2. احسب C_D وL/D لقيم C_L من 0.1 إلى 1.2.
3. أوجد أقصى L/D وقارنه بـ 1/(2√(KC_D0)).
4. غيّر AR إلى 12، والسحب الكلي بنسبة 7%− (رقم NASA لسحب الجنيحات الطرفية)، وشاهد كيف يتغير المدى.

جدول البيانات

C_L	C_D	L/D
0.2	0.0218	9.19
0.673	0.0400	16.81
1.0	0.0642	15.57

محسوب من القطبية النموذجية.

مثال حسابي

1. K = 0.04421؛ (L/D)max = 16.81 عند C_L = 0.673.
2. مدى بريغيه ∝ L/D، لذا 10%+ في L/D تعطي 10%+ في المدى.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

NASA Glenn: Lift to drag ratio (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/ldrat.html) · NASA Glenn: FoilSim interactive airfoil simulator (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/FoilSim/index.html)

الصلة بالكوكب: تقول NASA إن الجنيحات الطرفية تخفض السحب بما يصل إلى 7% وهي الآن على نحو 10000 طائرة نفاثة، ووفّرت أكثر من 10 مليارات غالون من الوقود. NASA Armstrong: On the winglets of innovation (2023) (https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/on-the-winglets-of-innovation-with-nasa-armstrong-2/)

☐ **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. أوجد كثافة الهواء عند 60 kPa و250 K.

   .ρ = 60,000/(287 × 250) .1

   الإجابة: 0.836 kg/m³.

2. أنبوب بيتو ساكن يقرأ 800 Pa حيث ρ = 0.9 kg/m³. أوجد السرعة الحقيقية.

   .V = √(2 × 800/0.9) .1

   الإجابة: 42.2 m/s.

3. أوجد قدرة التحويم المثالية لمروحية كتلتها 500 kg بدوّار 8 m عند مستوى سطح البحر.

   .T = 4905 N; A = 50.27 m² .1
   .P = T^1.5/√(2ρA) .2

   الإجابة: 31.0 kW.

4. أوجد C_p عند θ = 45° على أسطوانة غير رافعة.

   .1 − 4 × 0.5 .1

   الإجابة: −1.

5. جسم عند مستوى سطح البحر في تيار سرعته 40 m/s دورانه Γ = 15 m²/s. أوجد L'.

   .1.225 × 40 × 15 .1

   الإجابة: 735 N/m.

مجموعة التدريب النهائية (كل الوحدات)

1. أوجد c_l لمقطع رقيق متماثل عند 3°.

   .2π × 0.05236 .1

الإجابة: 0.329.

2. أوجد C_{Di} عندما $C_L = 0.6$ و$AR = 10$ و$e = 0.85$.

1. $(\pi \times 8.5)/0.36$.

الإجابة: 0.0135.

3. أوجد Re لوتر 2 m عند 50 m/s عند مستوى سطح البحر.

1. $1.225 \times 50 \times 2/1.789 \times 10^{-5}$.

الإجابة: 6.85×10^6.

4. أوجد M_2 وp_2/p_1 عبر صدمة عمودية عند $M_1 = 3$.

1. $M_2 = \sqrt{(2.8/12.4)}$; $p_2/p_1 = 1 + (2.8/2.4) \times 8$.

الإجابة: $M_2 = 0.475$, $p_2/p_1 = 10.33$.

5. أوجد T_0/T وp_0/p عند $M = 0.8$.

1. $1 + 0.2 \times 0.64 = 1.128$; $1.128\text{^}3.5$.

الإجابة: 1.128 و1.524.

6. أوجد $(L/D)_{max}$ عندما $C_{D0} = 0.025$ و$AR = 10$ و$e = 0.85$.

1. $K = 0.03745$.

الإجابة: 16.34.

ورقة الصيغ

$$p = \rho R T,\ a = \sqrt{\gamma R T},\ M = V/a$$

$$p + \tfrac{1}{2}\rho V^2 = p_0,\ q = \tfrac{1}{2}\rho V^2$$

$$C_p = 1 - (V/V_\infty)^2$$

$$\dot{m} = \rho A V,\ \nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

$$P_{ideal} = T^{3/2}/\sqrt{2\rho A}$$

$$L' = \rho_\infty V_\infty \Gamma,\ C_p = 1 - 4\sin^2\theta$$

$$L = qSC_L,\ D = qSC_D$$

$$c_l = 2\pi(\alpha - \alpha_{L=0})$$

$$C_{D_i} = C_L^2/(\pi e AR),\ AR = b^2/S$$

$$Re = \rho V L/\mu,\ C_f = 1.328/\sqrt{Re}$$

$$T_0/T = 1 + \frac{\gamma-1}{2}M^2 \qquad p_2/p_1 = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1}(M_1^2 - 1)$$

$$(L/D)_{max} = 1/(2\sqrt{KC_{D0}}),\ R = \frac{V}{c}\frac{L}{D}\ln\frac{W_i}{W_f}$$

الثوابت

الثابت	القيمة
الهواء القياسي عند مستوى سطح البحر (قيم من الكتب الدراسية)	p = 101,325 Pa, T = 288.15 K, ρ = 1.225 kg/m³, μ = 1.789 × 10⁻⁵ kg/(m·s), a = 340.3 m/s
ثابت الغاز للهواء	R = 287 J/(kg·K); γ = 1.4
1 عقدة	0.514444 m/s
1 قدم	0.3048 m
1 ميل في الساعة	0.44704 m/s
الجاذبية على المريخ (قيمة من الكتب الدراسية)	g = 3.71 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 وصفحات NASA والمحاكاة المجانية إلى جانب المقرر.

- MIT OpenCourseWare 16.100 Aerodynamics (Fall 2005) (https://ocw.mit.edu/courses/16-100-aerodynamics-fall-2005/): ملاحظات محاضرات ومجموعات مسائل مجانية من 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 مجانية من MIT عن الموائع والديناميكا الحرارية.
- NASA Glenn: Beginner’s Guide to Aeronautics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/short.html): مئات الصفحات المجانية من NASA عن الرفع والسحب والجريان الانضغاطي.
- NASA Glenn: FoilSim interactive airfoil simulator (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/FoilSim/index.html): غيّر شكل المقطع والسرعة والارتفاع وشاهد الرفع والسحب.
- OpenStax University Physics Volume 1, 14.6 Bernoulli’s equation (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-6-bernoullis-equation): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow): الضغط والجريان وبرنولي.

مسرد المصطلحات

زاوية الهجوم
الزاوية بين الوتر والجريان القادم.

نسبة الباع

b^2/S، مربع الباع مقسومًا على مساحة الجناح.

الطبقة الحدية

طبقة رقيقة قرب السطح تبطئ فيها اللزوجة الجريان.

التحدب

انحناء الخط الأوسط للمقطع الانسيابي.

الدوران

التكامل الخطي للسرعة حول منحنى مغلق؛ مرتبط بالرفع.

عدد ماخ الحرج

عدد ماخ للتيار الحر الذي يبلغ عنده الجريان المحلي $M = 1$ أول مرة.

الانحراف السفلي للهواء

جريان نحو الأسفل تستحثه الدوامات التابعة.

قطبية السحب

C_D بدلالة C_L.

الضغط الديناميكي

$q = \frac{1}{2}\rho V^2$.

السحب المستحث

سحب ناتج عن ميل الرفع بسبب الانحراف السفلي.

شرط كوتا

يغادر الجريان الحافة الخلفية الحادة بسلاسة.

عدد ماخ

سرعة الجريان مقسومة على سرعة الصوت.

الصدمة العمودية

قفزة رقيقة تحوّل الجريان فوق الصوتي إلى دون صوتي.

عدد رينولدز

$\rho V L/\mu$، القصور مقسومًا على اللزوجة.

الانفصال

انفصال الطبقة الحدية عن السطح.

ضغط الركود

الضغط إذا أُوقف الجريان أيزنتروبيًا.

الانهيار

فقدان الرفع حين ينفصل الجريان عند زاوية هجوم عالية.

المقطع فوق الحرج

مقطع مسطح من الأعلى يُضعف الصدمات قرب $M = 1$.

الدوامية

$\nabla \times V$، ضعف معدل الدوران المحلي.

الجنيح الطرفي

سطح شبه عمودي عند طرف الجناح يقلل السحب المستحث.

معايير التقييم الذاتي

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

المستوى	كيف يبدو
4 · إتقان	يحدد نظام الجريان، ويختار النموذج المناسب (برنولي، الزخم، الجريان الجهدي، خط الرفع، الطبقة الحدية، الأيزنتروبي، الصدمة)، ويتحقق من الوحدات والحالات الحدية، وينفذ المختبرات بأمان.
3 · متمكن	يحل التمارين مع أخطاء عرضية في الوحدات أو الكثافة.
2 · قيد التطور	يتبع الأمثلة المحلولة لكنه يخلط بين معاملات 2D و3D، أو بين الدرجات والراديان.
1 · مبتدئ	يعوّض الأرقام في الصيغ دون رسم تخطيطي؛ يحتاج 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

- الدوائر الكهربائية ENGR 214 + ENGR 214L
- الديناميكا الحرارية ENGR 320
- ميكانيكا الموائع ENGR 330
- كل الدورات