آخر تحديث: November 1, 2026

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 ميكانيكا الموائع للسنة الثالثة. وهو مبني على موضوعات وعمق MIT 2.06 Fluid Dynamics وMIT 1.060 Engineering Mechanics II (وكلاهما مجاني على MIT OpenCourseWare)، وعلى مقررات مثل Purdue ME 309 وGeorgia Tech CEE 3040، مستخدمًا فصل الموائع المجاني في OpenStax University Physics ومحاكاة PhET، ونضع روابطها حيث تفيد. لا يؤيد أي من هؤلاء المؤلفين أو الجامعات هذه الصفحة.

ما نضيفه: كل وحدة مرتبطة بعمل حقيقي مع مصدر عام موثق (الطاقة الكهرومائية، والتخزين بالضخ، والطاقة البحرية، وتسربات المياه المنزلية، والدوران المحيطي، وتوربينات الرياح)، وكل رقم في الصفحة يعاد حسابه ببرنامج تحقق قبل نشره، 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

يحمل الماء والهواء المتحركان معظم الطاقة المتجددة في العالم: الأنهار عبر توربينات الطاقة الكهرومائية، والرياح عبر شفرات التوربينات، والمد والجزر والأمواج إلى أجهزة الطاقة البحرية. وتحدد ميكانيكا الموائع أيضًا مقدار الطاقة اللازمة لضخ المياه إلى المدن والمزارع، ومقدار ما يضيع بالتسرب والاحتكاك.

تنقل التيارات المحيطية الحرارة حول الكوكب وتشكّل المناخ. تنتهي كل وحدة بقسم قصير موثق المصادر. القيم التي لا تأتي من مصدر معلّمة على أنها قيم توضيحية.

للمعلمين

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

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

- التفاضل والتكامل III: المشتقات الجزئية والتباعد والتكاملات المتعددة.
- المعادلات التفاضلية: المعادلات التفاضلية العادية من الرتبتين الأولى والثانية.
- الاستاتيكا والديناميكا: مخططات الجسم الحر وقوانين نيوتن وكمية الحركة.
- الديناميكا الحرارية تساعد في معادلة الطاقة لكنها ليست مطلوبة.

كيف تذاكر

- ابدأ كل مسألة برسم: حجم تحكم أو خط انسياب أو مخطط جسم حر للمائع.
- اكتب المعادلة الحاكمة بالكلمات أولًا (الكتلة أو كمية الحركة أو الطاقة)، ثم احذف الحدود التي يمكنك تبرير حذفها.
- اعمل بالعلو (أمتار من المائع) في أنظمة السوائل؛ فهو يسهّل مقارنة المضخات والأنابيب والتوربينات.
- احسب عدد رينولدز قبل اختيار علاقة للاحتكاك أو السحب.
- تحقق من الوحدات والحالات الحدية: التدفق الصفري يعني فقدًا صفريًا؛ ومضاعفة السرعة تضاعف الفواقد المضطربة أربع مرات تقريبًا.
- حل كل تمرين على الورق قبل فتح الإجابة، وأعد الاختبارات القصيرة بعد بضعة أيام.

ماذا تحتاج

- حاسوب أو جهاز لوحي لمحاكاة PhET المجانية Density وBuoyancy وUnder Pressure وFluid Pressure and Flow.
- زجاجة بلاستيكية شفافة، ومسمار أو سيخ، ومسطرة، وشريط لاصق.
- ميزان مطبخ، وإبريق قياس، ودلو، وساعة إيقاف.
- خرطوم حديقة أو صنبور حوض.
- برنامج جداول بيانات لمختبرات الأنابيب والمضخات.

جدول مقترح من 15 أسبوعًا

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

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
1	خواص الموائع: الكثافة واللزوجة والتوتر السطحي	خواص الموائع، اللزوجة، التوتر السطحي	OpenStax UP1 14.1, 14.7
2	استاتيكا الموائع والمانومترات والطفو	الهيدروستاتيكا والمانومترات	UP1 14.2

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
3	استاتيكا الموائع والمانومترات والطفو	القوى على السطوح المغمورة، الطفو، الاستقرار؛ المختبر A	UP1 14.4
4	برنولي وعلو الضغط ومعادلة الطاقة	الاستمرارية، برنولي، العلو، معادلة الطاقة؛ المختبر B	UP1 14.5–14.6
5	كمية الحركة التكاملية: النفثات والريش والأكواع والتوربينات	مبرهنة رينولدز للنقل، كمية الحركة، النفثات، الريش، بلتون	MIT 2.06
6	التحليل التفاضلي: الاستمرارية ونافييه–ستوكس والتدفقات الدقيقة	الكينماتيكا، الاستمرارية، دالة الانسياب	MIT 2.06
7	التحليل التفاضلي: الاستمرارية ونافييه–ستوكس والتدفقات الدقيقة	نافييه–ستوكس، كويت وبوازوي؛ المختبر C؛ تدريب لامتحان منتصف الفصل	MIT 2.25
8	التحليل البعدي والتشابه واختبار النماذج	التحليل البعدي والتشابه	MIT 1.060
9	التدفق في الأنابيب: الاحتكاك ومخطط مودي والفواقد الثانوية	التدفق الطباقي والمضطرب في الأنابيب، مخطط مودي	MIT 1.060
10	التدفق في الأنابيب: الاحتكاك ومخطط مودي والفواقد الثانوية	الفواقد الثانوية، الشبكات؛ المختبر D	MIT 1.060
11	المضخات والتوربينات وأنظمة الضخ	المضخات، منحنيات النظام، قوانين التشابه، التوربينات؛ المختبر F	أنظمة الضخ لدى DOE
12	التدفق الخارجي: الطبقات الحدية والسحب والرفع	الطبقات الحدية، السحب، تدفق ستوكس	NASA Glenn
13	التدفق الخارجي: الطبقات الحدية والسحب والرفع	الرفع، طاقة الرياح، حد بيتز؛ المختبر E	NASA Glenn; DOE wind
14	التدفق في القنوات المفتوحة: الأنهار والقنوات والقفزات الهيدروليكية	القنوات المفتوحة، عدد فرود، مانينغ	MIT 1.060
15	التدفق في القنوات المفتوحة: الأنهار والقنوات والقفزات الهيدروليكية	الطاقة النوعية، القفزات الهيدروليكية، الهدارات؛ تدريب للامتحان النهائي	MIT 1.060

تقدّمك

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

الوحدات

خواص الموائع: الكثافة واللزوجة والتوتر السطحي

ما الذي يجعل المادة مائعًا، وافتراض الاستمرارية، والكثافة والوزن النوعي، والضغط، واللزوجة وقانون نيوتن للزوجة، واللزوجة الكينماتيكية، والموائع غير النيوتونية، والتوتر السطحي والارتفاع الشعري، وضغط البخار والتكهف.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- تعريف المائع واستخدام افتراض الاستمرارية.
- استخدام قانون نيوتن للزوجة لإيجاد إجهاد القص.
- حساب الارتفاع الشعري من التوتر السطحي.
- شرح كيف تولّد فروق الكثافة التدفقات.

المفاهيم الأساسية

- يتشوه المائع باستمرار تحت أي إجهاد قص مهما صغر. ومعاملته كوسط متصل تتيح تعريف الكثافة والسرعة والضغط عند كل نقطة.
- الكثافة ρ (kg/m³) والوزن النوعي SG = ρ/ρ_water. للماء عند 20 °C كثافة ρ = 998 kg/m³؛ وللهواء عند 15 °C 1.225 kg/m³.
- قانون نيوتن للزوجة: إجهاد القص τ = μ du/dy. تقيس اللزوجة الديناميكية μ مقاومة القص؛ واللزوجة الكينماتيكية ν = μ/ρ. الماء أكثر لزوجة من الهواء بنحو 56 مرة لكن قيمة ν له أقل بنحو 15 مرة.
- للموائع غير النيوتونية (الطلاء والدم ومعجون الأسنان) لزوجة تتغير مع معدل القص.
- يشد التوتر السطحي σ أسطح السوائل؛ وفي أنبوب رفيع يرتفع الماء h = 4σ cos θ/(ρgD). وإذا انخفض الضغط الموضعي إلى ضغط البخار يغلي السائل: إنه التكهف، الذي يتلف المضخات والمراوح.

المعادلات الأساسية

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

τ=μdu/dy

قانون نيوتن للزوجة

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

ν=(μ)/(ρ)

اللزوجة الحركية

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{water}}$$

SG=ρρ_water

الوزن النوعي

$$h = \frac{4\sigma\cos\theta}{\rho g D}$$

h=(4σθ)/(ρ gD)

الارتفاع الشعري

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 1.1 يملأ ماء (μ = 1.002 × 10⁻³ kg/(m·s)) فجوة عرضها 1 mm بين لوح ثابت ولوح يتحرك بسرعة 2 m/s. أوجد إجهاد القص.

1. du/dy = 2/0.001 = 2000 s⁻¹.
2. τ = 1.002 × 10⁻³ × 2000.

الإجابة: τ = 2.00 Pa.

مثال 1.2 أوجد الارتفاع الشعري للماء (σ = 0.0728 N/m، θ = 0) في أنبوب زجاجي قطره 1 mm.

1. h = 4 × 0.0728/(998 × 9.81 × 0.001).

الإجابة: h = 29.7 mm.

مثال 1.3 أوجد ν للماء عند 20 °C.

1. ν = 1.002 × 10⁻³/998.

الإجابة: ν = 1.004 × 10⁻⁶ m²/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد الوزن النوعي SG لماء البحر (1025 kg/m³).

   1025/998 = 1.027.

2. أوجد الارتفاع الشعري في أنبوب قطره 0.5 mm.

   الضعف: 59.5 mm.

3. أوجد μ_water/μ_air.

56.0 = 10⁻⁵ × 1.789/10⁻³ × 1.002.

4. ما الجزء من جبل الجليد الذي يطفو تحت ماء البحر؟

89.5% = 917/1025.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: اللزوجة والكثافة شيء واحد.
في الحقيقة: العسل لزج؛ والزئبق كثيف لكنه غير لزج كثيرًا.

خرافة: تقاوم الموائع القص مثل المواد الصلبة.
في الحقيقة: إنها تتدفق تحت أي إجهاد قص.

خرافة: التكهف يحتاج إلى درجة حرارة عالية.
في الحقيقة: يكفي الضغط المنخفض.

بطاقات تعليمية

المائع

يتشوه باستمرار تحت القص.

اللزوجة

τ = μ du/dy.

اللزوجة الحركية

ν = μ/ρ.

الوزن النوعي

ρ/ρ_water.

الارتفاع الشعري

4σ cos θ/(ρgD).

التكهف

الغليان عند ضغط منخفض.

اختبار ذاتي

1. إجهاد القص في مائع نيوتوني هو...

μ du/dy

ρgh

ρV²

σ/D

μ du/dy. قانون نيوتن للزوجة.

2. اللزوجة الكينماتيكية هي...

μρ

μ/ρ

ρ/μ

τ/μ

ν = μ/ρ. μ/ρ.

3. يزداد الارتفاع الشعري عندما يكون الأنبوب...

أعرض

أضيق

أطول

أثقل

h ∝ 1/D. أضيق.

4. يحدث التكهف عندما ينخفض الضغط إلى...

صفر مقياسي

ضغط البخار

الضغط الجوي

ضغط الركود

ضغط البخار. غليان موضعي.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح NOAA أن الرياح تحرك التيارات المحيطية في الـ100 متر العليا، أما التيارات العميقة على أعماق آلاف الأمتار فتحركها فروق كثافة الماء التي تتحكم فيها درجة الحرارة والملوحة: الدوران الحراري الملحي.

في المناطق القطبية يتكون الجليد البحري تاركًا الملح خلفه، فيصبح الماء المحيط أكثر ملوحة وكثافة ويغوص؛ ويتدفق الماء السطحي ليحل محله، فيبدأ الحزام الناقل العالمي. والكثافة، أول خاصية في هذه الوحدة، تنقل الحرارة حول الكوكب كله.

على Saving Planets: المحيطات · رصد الأرض

المصادر: NOAA National Ocean Service: Thermohaline circulation (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP1, 14.1 Fluids, density and pressure (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-1-fluids-density-and-pressure): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- 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 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): ملاحظات MIT عن خواص الموائع.
- PhET: Density (https://phet.colorado.edu/en/simulations/density): الكثافة بشكل تفاعلي.

أنهيت هذه الوحدة

استاتيكا الموائع والمانومترات والطفو

الضغط عند نقطة، ومعادلة الهيدروستاتيكا، والضغط المقياسي والمطلق، والمانومترات، والقوى الهيدروستاتيكية على السطوح المستوية المغمورة ومركز الضغط، والقوى على السطوح المنحنية، ومبدأ أرخميدس، واستقرار الأجسام الطافية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب الضغط على عمق وقراءة المانومترات.
- إيجاد القوة المحصلة ومركز الضغط على بوابة مغمورة.
- تطبيق مبدأ أرخميدس.
- الحكم على استقرار جسم طافٍ.

المفاهيم الأساسية

- يؤثر الضغط عند نقطة بالتساوي في جميع الاتجاهات. في مائع ساكن dp/dz = −ρg، لذا مع كثافة ثابتة p = p₀ + ρgh عند العمق h. ويُقاس الضغط المقياسي نسبةً إلى الغلاف الجوي.
- توازن المانومترات أعمدة من الموائع: تتبع الأنبوب مضيفًا ρgh عند النزول وطارحًا إياه عند الصعود.
- على سطح مستوٍ تكون القوة المحصلة F = ρg h_c A (حيث h_c عمق المركز الهندسي). وتؤثر عند مركز الضغط، أسفل المركز الهندسي: y_cp = y_c + I_xc/(y_c A).
- على السطوح المنحنية، المركبة الأفقية هي القوة على الإسقاط الرأسي، والمركبة الرأسية هي وزن المائع فوق السطح.
- أرخميدس: قوة الطفو تساوي وزن المائع المزاح، F_B = ρ_fluid g V_displaced. ويكون الجسم الطافي مستقرًا إذا كان مركزه المتري فوق مركز ثقله.

المعادلات الأساسية

$$p = p_0 + \rho g h$$

p=p_0+ρ gh

الضغط الهيدروستاتيكي

$$F = \rho g h_c A$$

F=ρ g h_cA

القوة على سطح مستوٍ

$$y_{cp} = y_c + \frac{I_{xc}}{y_c A}$$

y_cp=y_c+_xcy_cA

مركز الضغط

$$F_B = \rho_f g V_{disp}$$

```
F_B=ρ_f gV_disp
```

قوة الطفو

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 2.1 أوجد الضغط المقياسي على عمق 10 m تحت سطح ماء عذب ($\rho = 998\ \text{kg/m}^3$).

1. $p = 998 \times 9.81 \times 10$.

الإجابة: $p = 97.9\ \text{kPa}$ (نحو ضغط جوي واحد).

مثال 2.2 بوابة مستطيلة رأسية عرضها 2 m وارتفاعها 3 m حافتها العليا عند سطح الماء. أوجد القوة وعمق مركز الضغط.

1. $h_c = 1.5\ \text{m};\ A = 6\ \text{m}^2$.
2. $F = 998 \times 9.81 \times 1.5 \times 6 = 88.1\ \text{kN}$.
3. $I_{xc} = 2 \times 3^3/12 = 4.5\ \text{m}^4;\ y_{cp} = 1.5 + 4.5/(1.5 \times 6)$.

الإجابة: $F = 88.1\ \text{kN}$ تؤثر على عمق 2.0 m تحت السطح (ثلثا العمق).

مثال 2.3 مانومتر زئبقي ($\rho = 13600\ \text{kg/m}^3$) موصول عبر أنبوب ماء يُظهر فرقًا قدره 0.1 m. أوجد فرق الضغط.

1. $\Delta p = (13600 - 1000) \times 9.81 \times 0.1$ (ماء فوق الزئبق، $\rho_{water} \approx 1000\ \text{kg/m}^3$).

الإجابة: $\Delta p = 12.4\ \text{kPa}$.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد قوة الطفو على جسم حجمه 2 L مغمور كليًا في الماء ($\rho \approx 1000\ \text{kg/m}^3$).

   $19.6\ \text{N} = 0.002 \times 9.81 \times 1000$.

2. ما الضغط المطلق على عمق 10 m إذا كان $p_{atm} = 101.3\ \text{kPa}$؟

   $199.2\ \text{kPa}$.

3. هل تعتمد القوة على السد على طول الخزان؟

لا؛ تعتمد فقط على العمق ومساحة الجدار.

4. لماذا يقع مركز الضغط أسفل المركز الهندسي؟

يزداد الضغط مع العمق.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: يعتمد الضغط على شكل الوعاء.
في الحقيقة: يعتمد على العمق فقط (المفارقة الهيدروستاتيكية).

خرافة: يعتمد الطفو على وزن الجسم.
في الحقيقة: يعتمد على الحجم المزاح.

خرافة: تؤثر القوة على البوابة عند مركزها.
في الحقيقة: تؤثر عند مركز الضغط، في موضع أدنى.

بطاقات تعليمية

الهيدروستاتيكا

$p = p_0 + \rho g h$.

الضغط المقياسي

نسبةً إلى الغلاف الجوي.

القوة على سطح مستوٍ

$\rho g\, h_c\, A$.

مركز الضغط

$y_c + I/(y_c\, A)$.

أرخميدس

$F_B = \rho g V$.

الاستقرار

المركز المتري فوق G.

اختبار ذاتي

1. الضغط على العمق h هو...

ρgh

ρV²/2

μ du/dy

mg/A

pgh. الهيدروستاتيكا (مقياسي).

2. قوة الطفو تساوي...

وزن الجسم

وزن المائع المزاح

كتلة الجسم

صفر

وزن المائع المزاح. أرخميدس.

3. لبوابة رأسية تبدأ من السطح، يقع مركز الضغط عند...

نصف العمق

ثلثي العمق

السطح

القاع

ثلثي العمق. حمل مثلثي.

4. يكون الجسم الطافي مستقرًا إذا كان...

G فوق M

M فوق G

B = G

ثقيلًا

M فوق G. المركز المتري.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تشير وزارة الطاقة الأمريكية إلى أن في الولايات المتحدة أكثر من 90000 سد، وأن أقل من 3% منها ينتج الكهرباء؛ والبقية تخدم الترفيه وبرك المزارع ومكافحة الفيضانات وإمدادات المياه والري. وكل واحد منها مصمم بمعادلات هذه الوحدة: حمل الماء على السد يزداد مع مربع العمق ويؤثر في الجزء السفلي من الجدار.

وتصف الوزارة أكثر محطات الطاقة الكهرومائية شيوعًا، وهي منشأة الحجز، بأنها سد يخزن مياه النهر في خزان؛ ويدير الماء المطلق عبر توربين مولدًا، ويمكن أن تخدم الإطلاقات أيضًا مكافحة الفيضانات والترفيه ومرور الأسماك وجودة المياه. وضغط الماء المخزن على السد وعلوه عند التوربين يأتيان مباشرة من $p = \rho g h$.

على Saving Planets: الاستاتيكا · المحيطات

المصادر: U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP1, 14.2 Measuring pressure (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-2-measuring-pressure): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- OpenStax UP1, 14.4 Archimedes' principle and buoyancy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-4-archimedes-principle-and-buoyancy): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- PhET: Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure): الهيدروستاتيكا بشكل تفاعلي.
- PhET: Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy): الطفو بشكل 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**

برنولي وعلو الضغط ومعادلة الطاقة

خطوط الانسياب وتصوير التدفق، والاستمرارية Q = AV، ومعادلة برنولي وحدودها، وعلو الضغط والسرعة والارتفاع، وخط الطاقة، وقانون تورشيلي، ومعادلة الطاقة للتدفق المستقر مع علو المضخة والتوربين والفواقد، وإنتاج الطاقة الكهرومائية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- تطبيق الاستمرارية وبرنولي على طول خط انسياب.
- العمل بالعلو: الضغط والسرعة والارتفاع.
- استخدام معادلة الطاقة مع علو المضخة والتوربين والفواقد.
- حساب القدرة الكهرومائية وقدرة الضخ.

المفاهيم الأساسية

- في التدفق المستقر غير القابل للانضغاط، يكون التدفق الحجمي Q = AV واحدًا عند كل مقطع من الأنبوب (الاستمرارية).
- برنولي على طول خط انسياب (مستقر، عديم اللزوجة، غير قابل للانضغاط): p/(ρg) + V²/(2g) + z = ثابت. وكل حد هو علو بالأمتار.
- تورشيلي: النفث الخارج من خزان على عمق h سرعته V = √(2gh).
- تضيف الأنظمة الحقيقية مضخات وتوربينات وتفقد طاقة بالاحتكاك: $p_1/(\rho g) + V_1^2/(2g) + z_1 + h_{pump} = p_2/(\rho g) + V_2^2/(2g) + z_2 + h_{turbine} + h_L$.
- القدرة من العلو: P = ρgQH. توصل التوربينات P = ηρgQH؛ وتحتاج المضخات P = ρgQH/η. وتشير الوزارة إلى أن إنتاج الطاقة الكهرومائية يعتمد على التدفق والعلو.

المعادلات الأساسية

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

```
Q=A_1V_1=A_2V_2
```

الاتصال

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{const}$$

```
(p)/(ρ g)+(V^2)/(2g)+z=const
```

برنولي بدلالة العلو

$$V = \sqrt{2gh}$$

```
V=2gh
```

تورشيلي

$$P = \eta \rho g Q H$$

P=ρ gQH

الطاقة الكهرومائية

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 3.1 أوجد سرعة النفث من ثقب يقع 5 m تحت سطح خزان.

1. V = √(2 × 9.81 × 5).

الإجابة: V = 9.90 m/s.

مثال 3.2 لمحطة كهرومائية Q = 50 m³/s وعلو H = 100 m وكفاءة كلية 0.9 (قيم توضيحية؛ ρ = 1000 kg/m³). أوجد القدرة.

1. P = 0.9 × 1000 × 9.81 × 50 × 100.

الإجابة: P = 44.1 MW، أي محطة «كبيرة» وفق تعريف الوزارة البالغ 30 MW.

مثال 3.3 ترفع مضخة 0.05 m³/s من الماء مسافة 20 m مع فواقد أنابيب قدرها 5 m وكفاءة 75%. أوجد القدرة الداخلة.

1. h_pump = 20 + 5 = 25 m.
2. P = 1000 × 9.81 × 0.05 × 25/0.75.

الإجابة: P = 16.4 kW.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ينقل خرطوم 0.4 L/s عبر قطر داخلي 20 mm إلى فوهة قطرها 10 mm. أوجد السرعتين.

   1.27 m/s و5.09 m/s.

2. حوّل 200 kPa إلى أمتار من علو الماء.

   200,000/(1000 × 9.81) = 20.4 m.

3. ضاعِف علو محطة كهرومائية عند Q نفسه. ما القدرة؟

   تتضاعف.

4. لماذا يقرأ أنبوب بيتو قيمة أعلى من فتحة الضغط الساكن؟

لأنه يضيف علو السرعة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: ينطبق برنولي عبر المضخة.
في الحقيقة: استخدم معادلة الطاقة مع h_pump.

خرافة: التدفق الأسرع يعني ضغطًا أعلى.
في الحقيقة: على طول خط انسياب، الأسرع يعني ضغطًا ساكنًا أقل.

خرافة: العلو ضغط.
في الحقيقة: إنه طاقة لكل وحدة وزن، بالأمتار.

بطاقات تعليمية

الاتصال

Q = AV.

برنولي

p/ρg + V²/2g + z = ثابت.

تورشيلي

V = √(2gh).

معادلة الطاقة

تضيف h_pump وh_turbine وh_L.

الطاقة الكهرومائية

P = ηρgQH.

قدرة المضخة

ρgQH/η.

اختبار ذاتي

1. علو السرعة هو...

V²/(2g)

p/ρg

z

ρV²

$V^2/(2g)$. الطاقة الحركية لكل وحدة وزن.

2. تنصيف مساحة الأنبوب يضاعف...

الضغط

السرعة

التدفق

فاقد العلو

السرعة. الاستمرارية.

3. القدرة الكهرومائية تتناسب مع...

Q فقط

H فقط

Q × H

Q/H

.$Q \times H$. $P = \eta\rho gQH$

4. سرعة نفث تورشيلي هي...

gh

$\sqrt{(2gh)}$

2gh

$\sqrt{(gh)}$

$\sqrt{(2gh)}$. برنولي من الخزان إلى النفث.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح وزارة الطاقة الأمريكية أن الطاقة الكهرومائية تعتمد على الطاقة الحركية للماء المتدفق، وأن الطاقة المتاحة تعتمد على حجم التدفق والتغير في الارتفاع، أي العلو: كلما زاد التدفق وارتفع العلو أمكن توليد مزيد من الكهرباء. يتدفق الماء عبر أنبوب الضغط ويدير توربينًا متصلًا بمولد.

وتصنف الوزارة المحطات حسب الحجم: كهرومائية كبيرة فوق 30 MW، وصغيرة من 100 kW إلى 10 MW، وميكروية حتى 100 kW، وهي تكفي لمنزل واحد أو مزرعة أو قرية. وتتيح P = ηρgQH تحديد حجم أي منها من قياس للتدفق ومسح للانحدار.

على Saving Planets: الحلول · الديناميكا الحرارية

المصادر: U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP1, 14.5 Fluid dynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-5-fluid-dynamics): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- 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): برنولي بشكل تفاعلي.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): ملاحظات عن معادلة الطاقة.

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

كمية الحركة التكاملية: النفثات والريش والأكواع والتوربينات

مبرهنة رينولدز للنقل، ومعادلة كمية الحركة الخطية لأحجام التحكم، وقوى النفثات على الألواح والريش، والقوى على أكواع الأنابيب والفوهات، وأحجام التحكم المتحركة، وتوربينات الدفع (عجلات بلتون)، ومعادلة كمية الحركة الزاوية للآلات التوربينية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- ذكر مبرهنة رينولدز للنقل.
- تطبيق معادلة كمية الحركة على النفثات والريش.
- تحليل ريشة متحركة وعجلة بلتون.
- استخدام كمية الحركة الزاوية لعزم التوربينات والمضخات.

المفاهيم الأساسية

- مبرهنة رينولدز للنقل: معدل تغير خاصية لنظام مائع = معدل التغير داخل حجم التحكم + صافي التدفق الخارج عبر سطحه.
- كمية الحركة الخطية المستقرة: ΣF = Σṁ_out V_out − Σṁ_in V_in (متجهات). أدرج قوى الضغط على المقاطع المقطوعة وقوة الإسناد.
- نفث سرعته V وتدفقه Q يصطدم مباشرة بلوح مستوٍ يؤثر بقوة F = ρQV. وريشة تحرف النفث بزاوية θ تؤثر بقوة F = ρQV(1 − cos θ) على امتداد النفث.
- لريشة تتحرك بسرعة U، استخدم السرعة النسبية (V − U). تحرف دلاء عجلة بلتون النفث بنحو 180°؛ وتكون القدرة F·U أكبر ما يمكن عند U = V/2.
- كمية الحركة الزاوية: العزم ṁ(r₂V_θ2 − r₁V_θ1) = (معادلة أويلر للآلات التوربينية)، وهي أساس تصميم المضخات والتوربينات.

المعادلات الأساسية

$$\sum \mathbf{F} = \sum \dot{m}\mathbf{V}_{out} - \sum \dot{m}\mathbf{V}_{in}$$

```
F= m V_out- m V_in
```

كمية الحركة المستقرة

$$F = \rho Q V (1 - \cos\theta)$$

```
F=ρ QV(1-θ)
```

قوة النفث المحرَف

$$F = \rho Q (V - U)(1 - \cos\beta)$$

```
F=ρ Q(V-U)(1-β)
```

الريشة المتحركة

$$T = \dot{m}(r_2 V_{\theta 2} - r_1 V_{\theta 1})$$

T= m(r_2V_θ2-r_1V_θ1)

معادلة أويلر للآلات التوربينية

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 4.1 نفث ماء قطره 50 mm بسرعة 20 m/s يصطدم مباشرة بلوح مستوٍ. أوجد القوة.

1. $A = \pi \times 0.05^2/4 = 1.963 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$.
2. $F = \rho A V^2 = 1000 \times 1.963 \times 10^{-3} \times 400$.

الإجابة: $F = 785\ \text{N}$.

مثال 4.2 يُحرف النفث نفسه بزاوية 120° بريشة ثابتة. أوجد القوة على امتداد النفث.

1. $F = \rho A V^2 (1 - \cos 120°) = 785 \times 1.5$.

الإجابة: $F = 1178\ \text{N}$.

مثال 4.3 دلو بلتون يتحرك بسرعة 15 m/s يستقبل نفثًا قدره $0.01\ \text{m}^3/\text{s}$ بسرعة 30 m/s ويحرفه بزاوية 165°. أوجد القوة والقدرة.

1. $F = 1000 \times 0.01 \times (30 - 15)(1 - \cos 165°) = 294.9\ \text{N}$.
2. $P = F \times U$.

الإجابة: $F = 294.9\ \text{N}$؛ $P = 4.42\ \text{kW}$ (يحمل النفث $\tfrac{1}{2}\rho Q V^2 = 4.5\ \text{kW}$).

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. عند أي سرعة للدلاء تعطي عجلة بلتون أكبر قدرة؟

   نصف سرعة النفث.

2. ضاعِف سرعة النفث عند المساحة نفسها. ما القوة على اللوح؟

   4 أضعاف.

3. سمِّ القوى في موازنة كمية الحركة لكوع أنبوب.

قوى الضغط عند المدخل والمخرج، والوزن، وقوة الإسناد.

4. لماذا تُقسم دلاء بلتون من المنتصف؟

لتحرف النفث بنحو 180° دون أن يصطدم بالدلو التالي.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: تعتمد القوة على اللوح على حجم اللوح.
في الحقيقة: لنفث محرَف كليًا، تعتمد على ρQV فقط.

خرافة: ترى الريشة المتحركة سرعة النفث كاملة.
في الحقيقة: إنها ترى U − V.

خرافة: كمية الحركة كمية قياسية.
في الحقيقة: إنها متجه؛ حلّلها إلى مركبات.

بطاقات تعليمية

RTT

معدل النظام = معدل حجم التحكم + صافي التدفق الخارج.

كمية الحركة

$\Sigma F = \Sigma \dot{m}\, V_{out} - \Sigma \dot{m}\, V_{in}$.

اللوح

ρQV.

الريشة

ρQV(1 − cos θ).

بلتون

الأفضل عند U = V/2.

توربين أويلر

$T = \dot{m}\, \Delta(rV_\theta)$.

اختبار ذاتي

1. قوة النفث على لوح مستوٍ هي...

ρQV

ρgQH

½ρV²

QV

ρQV. تدفق كمية الحركة.

2. حرف النفث بزاوية 180° يعطي قوة قدرها...

ρQV

2ρQV

0

ρQV/2

2 = 2ρQV. 1 − cos 180°.

3. أفضل نسبة U/V لعجلة بلتون هي...

0.25

0.5

1

2

0.5. تجعل U(V − U) أكبر ما يمكن.

4. تعطي معادلة أويلر للآلة التوربينية...

العزم

السحب

الطفو

اللزوجة

العزم. كمية الحركة الزاوية.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح وزارة الطاقة الأمريكية أن التخزين الكهرومائي بالضخ يعمل كبطارية عملاقة: عندما يكون الطلب منخفضًا يضخ الماء إلى خزان علوي، وعندما يرتفع الطلب يعود الماء نازلًا عبر توربين. وتفيد الوزارة بأن التخزين بالضخ يمثل 88% من كل تخزين الطاقة على نطاق الشبكات في الولايات المتحدة، في 43 محطة، مع مجال لأكثر من مضاعفة السعة.

تُصمم كل مضخة-توربين بمعادلات كمية الحركة وكمية الحركة الزاوية في هذه الوحدة: زوايا شفرات الدوّار تحدد مقدار العزم الذي يتخلى عنه الماء أو يتلقاه. وتخزين طاقة الشمس والرياح بهذه الطريقة يعتمد على إتقان تلك الشفرات.

على Saving Planets: الحلول · الديناميكا

المصادر: U.S. DOE: Pumped storage hydropower (https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): كمية الحركة لحجم التحكم.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): ملاحظات عن كمية الحركة.
- NASA Glenn: Conservation of momentum (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/conmo.html): صفحة مجانية من NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): معالجة أعمق.

أنهيت هذه الوحدة

التحليل التفاضلي: الاستمرارية ونافييه–ستوكس والتدفقات الدقيقة

كينماتيكا الموائع (حقل السرعة والتسارع والدوامية والانفعال)، ومعادلة الاستمرارية التفاضلية، ودالة الانسياب، ومعادلتا أويلر ونافييه–ستوكس، والشروط الحدية، والحلول الطباقية الدقيقة: تدفق كويت، وتدفق بوازوي المستوي، وتدفق هاغن–بوازوي في الأنابيب.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب التسارع المادي لحقل سرعة.
- التحقق من الاستمرارية وإيجاد دالة انسياب.
- ذكر معادلات نافييه–ستوكس وشروطها الحدية.
- حل تدفقي كويت وهاغن–بوازوي.

المفاهيم الأساسية

- في الوصف الأويلري للتسارع جزء موضعي ∂V/∂t وجزء حملي (∇·V)V؛ ومجموعهما هو المشتقة المادية DV/Dt.
- الاستمرارية غير القابلة للانضغاط: ∇·V = ∂u/∂x + ∂v/∂y + ∂w/∂z = 0. وفي 2D، تحققها تلقائيًا دالة انسياب ψ حيث u = ∂ψ/∂y وv = −∂ψ/∂x.
- نافييه–ستوكس (غير قابل للانضغاط، نيوتوني): DV/Dt = −∇p + ρg + μ∇²V. ومع شرط عدم الانزلاق عند الجدران، تحكم تقريبًا كل تدفق في هذا المقرر؛ ولا يُحل منها بدقة إلا حالات قليلة.
- تدفق كويت بين لوح ثابت ولوح متحرك: مقطع سرعة خطي، وإجهاد قص τ = μU/h.
- تدفق هاغن–بوازوي في أنبوب: مقطع قطعي مكافئ، وu_max = 2V_avg، وQ = πR⁴Δp/(8μL). ويصح ما دام التدفق طباقيًا (Re أقل من نحو 2300).

المعادلات الأساسية

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V}\cdot\nabla)\mathbf{V}$$

```
(D V)/(Dt)=( V)/( t)+( V·) V
```

التسارع المادي

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

الاستمرارية غير الانضغاطية

$$\rho\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho\mathbf{g} + \mu\nabla^2\mathbf{V}$$

```
ρ(D V)/(Dt)=- p+ρ g+μ^2 V
```

نافييه–ستوكس

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \mu L}$$

Q=(π R^4Δ p)/(8μ L)

هاغن–بوازوي

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 5.1 يتدفق ماء في أنبوب قطره 4 mm مع Δp/L = 100 Pa/m. أوجد Q وV_avg وu_max وRe.

1. $Q = \pi \times 0.002^4 \times 100/(8 \times 1.002 \times 10^{-3}) = 6.27 \times 10^{-7}$ m³/s.
2. $V = Q/(\pi \times 0.002^2) = 0.0499$ m/s؛ $u_{max} = 2V$.
3. $Re = 998 \times 0.0499 \times 0.004/1.002 \times 10^{-3}$.

الإجابة: $Q = 6.27 \times 10^{-7}$ m³/s، $V = 0.0499$ m/s، $u_{max} = 0.0998$ m/s، Re = 199 (طباقي).

مثال 5.2 يتحرك لوح بسرعة 1 m/s فوق طبقة ماء سمكها 2 mm. أوجد إجهاد القص.

1. $\tau = \mu U/h = 1.002 \times 10^{-3} \times 1/0.002$.

الإجابة: $\tau = 0.501$ Pa.

مثال 5.3 هل V = (2x, −2y) غير قابل للانضغاط، وما تسارعه عند (1, 1)؟

1. $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y = 2 - 2 = 0$.
2. $a_x = u\,\partial u/\partial x = 2x \times 2 = 4x$; $a_y = v\,\partial v/\partial y = (-2y)(-2) = 4y$.

الإجابة: نعم؛ $a = (4, 4)$ m/s².

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. نصّف نصف قطر الأنبوب عند Δp/L نفسه. ما Q؟

   1/16 من القيمة.

2. أوجد ψ عندما u = 1 وv = 0.

   ψ = y.

3. أين يكون القص أكبر ما يمكن في تدفق بوازوي؟

عند الجدار.

4. سمِّ الشرط الحدي عند جدار صلب.

عدم الانزلاق: سرعة المائع تساوي سرعة الجدار.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: التدفق المستقر تسارعه صفر.
في الحقيقة: يمكن أن يكون التسارع الحملي غير صفري.

خرافة: لمعادلات نافييه–ستوكس حلول دقيقة كثيرة.
في الحقيقة: لبضعة أشكال هندسية بسيطة فقط.

خرافة: قانون بوازوي يصلح لأي تدفق في الأنابيب.
في الحقيقة: للتدفق الطباقي فقط.

بطاقات تعليمية

المشتقة المادية

$\partial/\partial t + V\cdot\nabla$.

الاتصال

$\nabla\cdot V = 0$.

دالة الانسياب

$u = \partial\psi/\partial y,\ v = -\partial\psi/\partial x$.

نافييه–ستوكس

$\rho DV/Dt = -\nabla p + \rho g + \mu\nabla^2 V$.

كويت

$\tau = \mu U/h$.

بوازوي

$Q = \pi R^4 \Delta p / 8\mu L$.

اختبار ذاتي

1. يتغير Q في هاغن–بوازوي مع نصف القطر بحسب…

R

R^2

R^3

R^4

.R^4. $\pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$

2. في تدفق كويت يكون المقطع...

قطعيًا مكافئًا

خطيًا

منتظمًا

لوغاريتميًا

خطيًا. لا يوجد تدرج ضغط.

3. التسارع الحملي هو...

$\partial V/\partial t$

$V(\nabla \cdot V)$

$p\nabla$

$\mu\nabla^2 V$

$V(\nabla \cdot V)$. التغير المكاني.

4. u_max/V_avg في التدفق الطباقي في الأنابيب يساوي...

1

1.5

2

4

2. قطع مكافئ.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تفيد وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) بأن التسربات المنزلية قد تهدر نحو 1 تريليون غالون من الماء سنويًا على مستوى البلاد، وأن تسربات المنزل المتوسط قد تهدر أكثر من 9300 غالون سنويًا، وأن 9% من المنازل فيها تسربات تهدر 50 غالونًا أو أكثر يوميًا.

التسربات الصغيرة عبر الحشوات والوصلات البالية غالبًا ما تكون تدفقات بطيئة طباقية عبر فجوات دقيقة، حيث يبين قانون R^4 أعلاه لماذا يُحدث اتساع صغير في الشق فرقًا كبيرًا. وتقول الوكالة إن إصلاح التسربات المنزلية سهلة الإصلاح قد يوفر نحو 10% من فواتير المياه.

على Saving Planets: المعادلات التفاضلية · التفاضل والتكامل 3

المصادر: U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): محاضرات عن نافييه–ستوكس.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): حلول دقيقة.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): قانون بوازوي.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): ملاحظات الكينماتيكا.

أنهيت هذه الوحدة

التحليل البعدي والتشابه واختبار النماذج

التجانس البعدي، ومبرهنة باكنغهام باي، والمجموعات اللابعدية الشائعة (رينولدز وفرود وماخ وويبر وأويلر)، والتشابه الهندسي والكينماتيكي والديناميكي، وقوانين النماذج وتأثيرات المقياس، وجعل المعادلات الحاكمة لابعدية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- إيجاد المجموعات اللابعدية بمبرهنة باي.
- بيان ما يقارنه كل من Re وFr وMa وWe.
- تحويل نتائج اختبار النماذج إلى الحجم الكامل بتشابه فرود أو رينولدز.
- شرح سبب استحالة التشابه الكامل غالبًا.

المفاهيم الأساسية

- كل معادلة صحيحة متجانسة بعديًا. تنص مبرهنة باكنغهام باي على أن مسألة فيها n متغيرًا وk أبعاد أساسية لها n − k مجموعة لابعدية مستقلة.
- مجموعات شائعة: Re = ρVL/μ (القصور/اللزوجة)، Fr = V/√(gL) (القصور/الجاذبية)، Ma = V/a (الانضغاطية)، We = ρV²L/σ (القصور/التوتر السطحي)، Eu = Δp/(ρV²) (الضغط).
- التشابه الديناميكي: إذا كان للنموذج والنموذج الأصلي الشكل الهندسي نفسه والمجموعات اللابعدية الحاكمة نفسها، تطابقت نتائجهما اللابعدية (C_D وC_p والكفاءة).
- تستخدم التدفقات ذات السطح الحر (السفن والمفيضات والأمواج) مقياس فرود: V_m = V_p√(L_m/L_p)؛ وتتغير القوى مع مكعب مقياس الطول والقدرة مع المقياس مرفوعًا إلى الأس 3.5.
- مطابقة Re وFr معًا تتطلب عادةً مائعًا مستحيلًا، لذا يطابق المهندسون المجموعة الغالبة ويصححون الأخرى (تأثيرات المقياس).

المعادلات الأساسية

$$\Pi \text{ groups} = n - k$$

```
groups=n-k
```

مبرهنة باكنغهام باي

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu},\ Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

```
Re=(ρ VL)/(μ),\ Fr=
```

عددا رينولدز وفرود

$$V_m = V_p \sqrt{L_m / L_p}$$

```
V_m=V_p_m/L_p
```

$$\frac{F_p}{F_m} = \left(\frac{L_p}{L_m}\right)^3$$

(F_p)/(F_m)=((L_p)/(L_m))^3

مقياس القوى (فرود، المائع نفسه)

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 6.1 يعتمد السحب F على كرة على ρ وV وD وμ. كم مجموعة باي، وما هي؟

1. n = 5 متغيرات، k = 3 أبعاد (M, L, T).
2. المجموعات: F/(ρV²D²) وρVD/μ.

الإجابة: مجموعتان (2): C_D = f(Re).

مثال 6.2 يُختبر نموذج لطاقة الأمواج بمقياس 1:20 وفق مقياس فرود. سرعة الموجة بالحجم الكامل 10 m/s. أوجد سرعة النموذج.

1. V_m = 10/√20.

الإجابة: V_m = 2.24 m/s.

مثال 6.3 لذلك النموذج، كيف تتغير القوى والقدرة؟

1. F_p/F_m = 20³.
2. P_p/P_m = 20^3.5.

الإجابة: القوى 8000 ×؛ القدرة 35777 ×.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أي مجموعة هي الأهم لأمواج السفينة؟

عدد فرود.

2. وأيها للتدفق في أنبوب صغير؟

عدد رينولدز.

3. يجب أن يطابق نموذج 1:10 في المائع نفسه قيمة Re. ما سرعة النموذج مقارنة بالحجم الكامل؟

أسرع 10 مرات.

4. ماذا يقارن We؟

القصور بالتوتر السطحي.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: تستخدم اختبارات النماذج السرعة نفسها للحجم الكامل.
في الحقيقة: إنها تستخدم سرعات مقيسة.

خرافة: اللابعدي يعني غير مهم.
في الحقيقة: المجموعات اللابعدية تتحكم في الفيزياء.

خرافة: أي نموذج يعطي نتائج دقيقة للحجم الكامل.
في الحقيقة: تبقى تأثيرات المقياس عندما لا تتطابق كل المجموعات.

بطاقات تعليمية

مبرهنة باي

n − k مجموعة.

رينولدز

القصور/اللزوجة.

فرود

القصور/الجاذبية.

ويبر

القصور/التوتر السطحي.

التشابه

المجموعات نفسها، المعاملات نفسها.

مقياس فرود

$V \propto \sqrt{L}$.

اختبار ذاتي

1. يقارن عدد فرود القصور بـ...

اللزوجة

الجاذبية

التوتر السطحي

الانضغاطية

الجاذبية. (gL)٧/٧.

2. مع 6 متغيرات و3 أبعاد يوجد...

2

3

6

9

.3. n − k

3. تتغير القوى وفق مقياس فرود (المائع نفسه) مع الطول مرفوعًا إلى...

1st

2nd

3rd

3.5th

.3rd. L^3

4. يعتمد C_D لكرة ملساء أساسًا على...

Fr

Re

We

Ma

Re. تأثيرات اللزوجة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تصف وزارة الطاقة الأمريكية الطاقة البحرية بأنها طاقة مستخلصة من الأمواج والمد والجزر وتيارات الأنهار والمحيطات ومن فروق درجات حرارة المحيط. وتقول إن إجمالي مورد الطاقة البحرية الأمريكي يعادل نحو 57% من كل توليد الكهرباء في الولايات المتحدة عام 2019، وإن هذه الموارد قابلة للتنبؤ إلى حد كبير.

وتشير الوزارة إلى أن الباحثين يختبرون تقنيات جديدة وينشرونها لتسخير هذا المورد. وتُطوَّر محولات طاقة الأمواج وتوربينات المد والجزر بنماذج مصغرة في أحواض الأمواج والقنوات قبل وقت طويل من نزول الأجهزة الكاملة إلى البحر، باستخدام مقياسي فرود ورينولدز في هذه الوحدة.

على Saving Planets: المحيطات · الحلول

المصادر: U.S. DOE: Marine energy basics (https://www.energy.gov/eere/water/marine-energy-basics)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): محاضرات التحليل البعدي.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): ملاحظات عن التشابه.
- NASA Glenn: Similarity parameters (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airsim.html): صفحة مجانية من NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): المقياس.

أنهيت هذه الوحدة

التدفق في الأنابيب: الاحتكاك ومخطط مودي والفواقد الثانوية

التدفق الطباقي والمضطرب في الأنابيب، وطول المدخل، ومعادلة دارسي–فايسباخ، ومعامل الاحتكاك الطباقي 64/Re، ومخطط مودي وعلاقتا كولبروك وهالاند، والفواقد الثانوية، والمجاري غير الدائرية والقطر الهيدروليكي، والأنابيب على التوالي وعلى التوازي وفي شبكات.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- تحديد ما إذا كان التدفق في الأنبوب طباقيًا أم مضطربًا.
- حساب فواقد الاحتكاك بمعادلة دارسي–فايسباخ وصيغة هالاند.
- إضافة الفواقد الثانوية من الوصلات والصمامات.
- حل مسائل بسيطة لأنابيب على التوالي وعلى التوازي.

المفاهيم الأساسية

- في الأنابيب يكون التدفق طباقيًا دون Re ≈ 2300 ومضطربًا فوق نحو 4000. والتدفق المضطرب يخلط كمية الحركة بقوة وله مقطع أكثر تسطحًا.
- دارسي–فايسباخ: h_L = f(L/D)(V²/2g). وللتدفق الطباقي f = 64/Re.
- في التدفق المضطرب يعتمد f على Re والخشونة النسبية ε/D (مخطط مودي). وصيغة هالاند صريحة: 1/√f = −1.8 log₁₀[(ε/D/3.7)^1.11 + 6.9/Re].
- تضيف الوصلات والصمامات والأكواع والمداخل فواقد ثانوية h_m = K V²/(2g). في خطوط الأنابيب الطويلة يغلب الاحتكاك؛ وفي السباكة المنزلية تهم الوصلات.
- تستخدم المجاري غير الدائرية القطر الهيدروليكي D_h = 4A/P. والأنابيب على التوالي تتشارك Q وتجمع الفواقد؛ وعلى التوازي تتشارك فاقد العلو وتجمع التدفقات.

المعادلات الأساسية

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

Re=(ρ VD)/(μ)

عدد رينولدز للأنبوب

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

h_L=fL/D(V^2)/(2g)

دارسي–فايسباخ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log_{10}\left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7}\right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re}\right]$$

(1)/(f)=-1.8_10[((/D)/(3.7))^1.11+(6.9)/(Re)]

هالاند

$$h_m = K\frac{V^2}{2g}$$

h_m=K(V^2)/(2g)

الفاقد الثانوي

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 7.1 يتدفق ماء بسرعة 2 m/s في أنبوب فولاذ تجاري قطره 50 mm (ε = 0.045 mm). أوجد Re وf.

1. Re = 998 × 2 × 0.05/1.002 × 10⁻³ = 99,600.
2. ε/D = 0.0009؛ وتعطي صيغة هالاند f.

الإجابة: Re = 9.96 × 10⁴ (مضطرب)؛ f = 0.0216.

مثال 7.2 أوجد فاقد العلو بالاحتكاك على طول 100 m من ذلك الأنبوب.

1. h_L = 0.0216 × (100/0.05) × 2²/(2 × 9.81).

الإجابة: h_L = 8.82 m.

مثال 7.3 أوجد معامل الاحتكاك الطباقي عند Re = 1500، وفاقد مدخل حاد الحافة (K = 0.5) عند 2 m/s.

1. f = 64/1500.
2. h_m = 0.5 × 4/19.62.

الإجابة: f = 0.0427; h_m = 0.102 m.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد D_h لمجرى أبعاده 0.1 m × 0.2 m.

.4 × 0.02/0.6 = 0.133 m

2. ضاعِف V في تدفق مضطرب خشن كليًا. ما h_L؟

نحو 4 أضعاف.

3. أنبوبان متماثلان على التوازي ينقلان Q كليًا. ما التدفق في كل منهما؟

Q/2، مع فاقد العلو نفسه.

4. هل Re = 3000 طباقي أم مضطرب؟

انتقالي.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: معامل الاحتكاك ثابت.
في الحقيقة: يعتمد على Re والخشونة.

خرافة: الفواقد الثانوية ثانوية دائمًا.
في الحقيقة: ليس في الأنابيب القصيرة كثيرة الوصلات.

خرافة: للتدفق الطباقي فواقد أعلى.
في الحقيقة: في نطاق Re نفسه يكون f له أقل، لكن التدفق الطباقي لا يحدث إلا عند السرعات المنخفضة.

بطاقات تعليمية

الانتقال

Re ≈ 2300–4000.

دارسي–فايسباخ

f(L/D)V²/2g.

f الطباقي

64/Re.

هالاند

f صريح.

الفاقد الثانوي

KV²/2g.

القطر الهيدروليكي

4A/P.

اختبار ذاتي

1. معامل الاحتكاك الطباقي هو...

64/Re

0.316/Re^0.25

0.02

Re/64

64/Re. بوازوي.

2. يتغير فاقد دارسي–فايسباخ مع...

V

V^2

V^3

1/V

V^2. عند f ثابت.

3. القطر الهيدروليكي هو...

4A/P

A/P

P/A

2A/P

4A/P. التعريف.

4. تتشارك الأنابيب على التوازي في...

التدفق

فاقد العلو

القطر

السرعة

فاقد العلو. نقاط نهاية مشتركة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تشير وكالة حماية البيئة إلى أن صنبورًا يقطر مرة في الثانية قد يهدر أكثر من 3000 غالون سنويًا، وهو ما يكفي لأكثر من 180 حمامًا، وأن رأس دش يسرب 10 قطرات في الدقيقة يهدر أكثر من 500 غالون سنويًا. وتسرب ري عرضه 1/32 من البوصة قد يهدر نحو 6300 غالون شهريًا.

كل غالون يُوصَّل يجب أيضًا ضخه عبر كيلومترات من الأنابيب، في مواجهة فواقد الاحتكاك في هذه الوحدة. وإصلاح التسربات يوفر الماء وطاقة الضخ معًا؛ فـ3000 غالون تعادل نحو 11355 L، أي 31.1 L كل يوم.

على Saving Planets: الحلول · ميكانيكا المواد

المصادر: U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engine/ering-mechanics-ii-spring-2006/): ملاحظات عن التدفق في الأنابيب.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): محاضرات عن التدفق الداخلي.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): التدفق الطباقي والمضطرب.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): الاضطراب.

أنهيت هذه الوحدة

المضخات والتوربينات وأنظمة الضخ

المضخات الطاردة المركزية والمحورية، وعلو المضخة، والقدرة والكفاءة، ومنحنيات أداء المضخة، ومنحنيات النظام ونقطة التشغيل، والمضخات على التوالي وعلى التوازي، وقوانين التشابه ومحركات السرعة المتغيرة، والتكهف وNPSH، والتوربينات الهيدروليكية (بلتون وفرانسيس وكابلان).

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- قراءة منحنى المضخة وإيجاد نقطة التشغيل مع منحنى النظام.
- حساب قدرة المضخة وكفاءتها.
- تطبيق قوانين التشابه على تغيرات السرعة.
- شرح NPSH وكيفية تجنب التكهف.

المفاهيم الأساسية

- تضيف المضخة علوًا h_p إلى التدفق؛ والقدرة المائية ρgQh_p وقدرة العمود ρgQh_p/η.
- يلتقي منحنى المضخة (علو يتناقص مع زيادة التدفق) بمنحنى النظام (الرفع الساكن مضافًا إليه فواقد تزداد مع Q²) عند نقطة التشغيل.
- قوانين التشابه للمضخة نفسها عند سرعة جديدة N: Q ∝ N، H ∝ N²، P ∝ N³. وإبطاء المضخة بمحرك سرعة متغيرة بدلًا من خنق صمام يوفر كثيرًا من الطاقة.
- يبدأ التكهف عندما ينخفض ضغط المدخل قرب ضغط البخار. ويجب أن يتجاوز صافي علو السحب الموجب المتاح (NPSH_A) ما تحتاجه المضخة (NPSH_R).
- التوربينات الهيدروليكية مضخات معكوسة: بلتون (دفعي) للعلو العالي، وفرانسيس للعلو المتوسط، وكابلان (مروحي) للعلو المنخفض والتدفق الكبير؛ وكثير من وحدات التخزين بالضخ مضخات-توربينات عكوسة.

المعادلات الأساسية

$$P_{shaft} = \frac{\rho g Q h_p}{\eta}$$

```
P_shaft=(ρ gQh_p)/()
```

قدرة المضخة

$$H_{sys} = H_{static} + kQ^2$$

```
H_sys=H_static+kQ^2
```

منحنى النظام

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1},\ \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2,\ \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

```
(Q_2)/(Q_1)=(N_2)/(N_1),\ (H_2)/(H_1)=((N_2)/(N_1))^2,\ (P_2)/(P_1)=((N_2)/(N_1))^3
```

$$NPSH_A > NPSH_R$$

لا تكهف

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 8.1 منحنى مضخة $H = 40 - 7000Q^2$ ومنحنى النظام $H = 10 + 5000Q^2$ (H بالمتر، Q بوحدة m^3/s). أوجد نقطة التشغيل.

1. $10 + 5000Q^2 = 40 - 7000Q^2$، إذن $Q^2 = 30/12000$.
2. $Q = 0.05\ m^3/s$; $H = 10 + 5000 \times 0.0025$.

الإجابة: $Q = 0.05\ m^3/s$, $H = 22.5\ m$.

مثال 8.2 أوجد قدرة العمود عند تلك النقطة مع ($\rho = 1000\ kg/m^3$) $\eta = 0.75$.

1. $P = 1000 \times 9.81 \times 0.05 \times 22.5/0.75$.

الإجابة: $P = 14.7\ kW$.

مثال 8.3 مضخة توصل $0.05\ m^3/s$ عند علو $30\ m$ تُبطأ من 1800 إلى 1500 rpm. أوجد التدفق الجديد والعلو الجديد ونسبة القدرة.

1. $Q = 0.05 \times 1500/1800$.
2. $H = 30 \times (1500/1800)^2$.
3. نسبة $P = (1500/1800)^3$.

الإجابة: $Q = 0.0417\ m^3/s$، $H = 20.8\ m$، والقدرة 57.9% من الأصلية.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. مضختان متماثلتان على التوالي: ما الذي يُجمع؟

   العلو عند التدفق نفسه.

2. واثنتان على التوازي؟

التدفقات عند العلو نفسه.

3. خفّض السرعة بنسبة 20%. ما القدرة؟

$0.8^3 = 51.2\%$.

4. أي توربين يناسب علوًا قدره 500 m؟

بلتون.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: خنق الصمام طريقة كفؤة لتقليل التدفق.
في الحقيقة: إنه يهدر العلو؛ وإبطاء المضخة أفضل.

خرافة: المضخة الأكبر أفضل دائمًا.
في الحقيقة: المضخات كبيرة الحجم تعمل بعيدًا عن نقطة أفضل كفاءة لها.

خرافة: التكهف يصدر ضجيجًا فقط.
في الحقيقة: إنه يُحدث تآكلًا في الدوّارات ويقلل الأداء.

بطاقات تعليمية

قدرة المضخة

$\rho g Q h / \eta$.

منحنى النظام

$H_{static} + kQ^2$.

نقطة التشغيل

تقاطع المنحنيين.

التشابه

$Q \propto N,\ H \propto N^2,\ P \propto N^3$.

NPSH

تجنب التكهف.

التوربينات

بلتون، فرانسيس، كابلان.

اختبار ذاتي

1. تتغير قدرة المضخة مع السرعة بحسب...

N

N^2

N^3

N^2

N^3. قوانين التشابه.

2. نقطة التشغيل هي حيث...

يلتقي منحنى المضخة بمنحنى النظام

تكون الكفاءة صفرًا

Q = 0

H = 0

يلتقي منحنى المضخة بمنحنى النظام. التوازن.

3. لتجنب التكهف...

NPSH_A > NPSH_R

NPSH_A < NPSH_R

ارفع السرعة

اخفض ضغط المدخل

NPSH_A > NPSH_R. الهامش.

4. العلو المنخفض والتدفق العالي يناسبان...

بلتون

فرانسيس

كابلان

مضخة مكبسية

كابلان. توربين مروحي.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يذكر مكتب الكفاءة الصناعية في وزارة الطاقة الأمريكية أنه يمكن تحقيق وفورات كبيرة في الطاقة والتكلفة في أنظمة الضخ بتطبيق أفضل ممارسات إدارة الطاقة وشراء معدات موفرة للطاقة، ويقدم مجانًا أداة Pumping System Assessment Tool (PSAT) وبرنامج MEASUR لاكتشافها.

تبيّن قوانين التشابه مصدر جزء كبير من هذه الوفورات: فالمضخة التي تُبطأ بنسبة 20% بمحرك سرعة متغيرة لا تحتاج إلا إلى نحو نصف القدرة. وتضيف صفحة الوزارة عن التخزين بالضخ أن المضخات-التوربينات ترفع الماء إلى أعلى حين تكون الكهرباء رخيصة وتولّد حين يُحتاج إليها.

على Saving Planets: الحلول · الدوائر الكهربائية

المصادر: U.S. DOE: Pumped storage hydropower (https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower) · U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engine/ering-mechanics-ii-spring-2006/): ملاحظات عن المضخات.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): محاضرات عن الآلات التوربينية.
- U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems): أدوات وزارة الطاقة المجانية للمضخات.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-flui/d-mechanics-fall-2013/): معالجة أعمق.

أنهيت هذه الوحدة

التدفق الخارجي: الطبقات الحدية والسحب والرفع

التدفق حول الأجسام، والطبقات الحدية على الألواح المستوية، وسحب الاحتكاك وسحب الضغط، ومعاملات السحب للكرات والأسطوانات والأجسام الانسيابية، وأزمة السحب، وتدفق ستوكس والترسيب، والرفع، والقدرة المتاحة في تيار من الرياح أو الماء.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب السحب من معامل السحب.
- شرح دور سحب الاحتكاك وسحب الضغط.
- استخدام قانون ستوكس للجسيمات الصغيرة.
- إيجاد قدرة تيار الرياح وحد بيتز.

المفاهيم الأساسية

- السحب F_D = C_D ½ρV²A والرفع F_L = C_L ½ρV²A، حيث A مساحة مرجعية. ويعتمد C_D على الشكل وعلى Re.
- الأجسام الانسيابية يغلب عليها سحب الاحتكاك؛ أما الأجسام غير الانسيابية (الكرات والأسطوانات والشاحنات) فيغلب عليها سحب الضغط الناتج عن أثر منفصل.
- لكرة ملساء C_D ≈ 0.47 عندما $10^3 < Re < 2 \times 10^5$؛ وقرب $Re \approx 3 \times 10^5$ تصبح الطبقة الحدية مضطربة وتنفصل متأخرة، فينخفض C_D بشدة (أزمة السحب).
- عند Re منخفض جدًا (Re < 1)، سحب ستوكس F = 3πμVD؛ وتترسب الجسيمة الصغيرة بسرعة V = (ρ_p − ρ)gD²/(18μ).
- يحمل تيار مساحته A قدرة ½ρAV³. ولا يمكن لأي توربين أن يلتقط أكثر من 59.3% ≈ 16/27 منها (حد بيتز).

المعادلات الأساسية

$$F_D = C_D \tfrac{1}{2}\rho V^2 A$$

```
F_D=C_D12ρ V^2A
```

السحب

$$F = 3\pi\mu V D$$

```
F=3πμ VD
```

سحب ستوكس

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho) g D^2}{18\mu}$$

```
V_s=((ρ_p-ρ)gD^2)/(18μ)
```

سرعة الترسيب

$$P = \tfrac{1}{2}\rho A V^3,\ \ C_{P,max} = \frac{16}{27}$$

P=12ρ AV^3,\ \ C_P,max=16/27

قدرة الرياح وحد بيتز

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 9.1 كرة قطرها 0.22 m تتحرك بسرعة 20 m/s في الهواء (C_D = 0.47، قيمة مثال). أوجد Re والسحب.

1. $\mathrm{Re} = 1.225 \times 20 \times 0.22 / 1.789 \times 10^{-5} = 3.01 \times 10^{5}$.
2. $F = 0.47 \times \tfrac{1}{2} \times 1.225 \times 400 \times \pi \times 0.11^2$.

الإجابة: $\mathrm{Re} = 3.01 \times 10^{5}$ (قرب أزمة السحب)؛ $F = 4.38$ N.

مثال 9.2 أوجد سرعة ترسيب حبة رمل قطرها 50 µm (ρ_p = 2500 kg/m³) في الماء.

1. $V = (2500 - 998) \times 9.81 \times (50 \times 10^{-6})^2 / (18 \times 1.002 \times 10^{-3})$.
2. تحقق: $\mathrm{Re} = 998 \times 0.00204 \times 50 \times 10^{-6} / 1.002 \times 10^{-3} = 0.102$.

الإجابة: $V = 2.04$ mm/s؛ و$\mathrm{Re} < 1$، إذن قانون ستوكس صالح.

مثال 9.3 أوجد قدرة الرياح عبر دوّار قطره 100 m عند 10 m/s، والحد الأقصى لبيتز.

1. $A = \pi \times 50^2 = 7854$ m².
2. $P = \tfrac{1}{2} \times 1.225 \times 7854 \times 1000$.
3. $P_{max} = P \times 16/27$.

الإجابة: $P = 4.81$ MW؛ والحد الأقصى لبيتز 2.85 MW.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ضاعف سرعة الرياح. ما قدرة الرياح؟

   8 أضعاف.

2. لماذا تستخدم الشاحنات الأغطية الانسيابية؟

   لتقليل سحب الضغط الناتج عن الأثر.

3. نصّف قطر جسيم. ما سرعة ترسيب ستوكس؟

.1/4

4. ما أزمة السحب؟

الانخفاض المفاجئ في C_D عندما تصبح الطبقة الحدية مضطربة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: السحب يتناسب دائمًا مع V^2.
في الحقيقة: عند Re منخفض جدًا يتناسب مع V.

خرافة: يمكن للتوربين استخلاص كل قدرة الرياح.
في الحقيقة: حد بيتز يقيدها بـ59.3%.

خرافة: الأسطح الخشنة تزيد السحب دائمًا.
في الحقيقة: على الكرات قد تُطلق أزمة السحب مبكرًا.

بطاقات تعليمية

السحب

$C_D \, ½\rho V^2 A$.

سحب الضغط

الأثر خلف الأجسام غير الانسيابية.

أزمة السحب

ينخفض C_D قرب $Re \, 3 \times 10^5$.

ستوكس

$F = 3\pi\mu VD$.

قدرة الرياح

$½\rho AV^3$.

بيتز

59.3%.

اختبار ذاتي

1. تتغير قدرة الرياح مع V بحسب...

V

V^2

V^3

V^4

.V^3. $\frac{1}{2}\rho AV^3$

2. حد بيتز يساوي نحو...

30%

45%

59%

100%

.59%. 16/27

3. ينطبق سحب ستوكس عندما يكون Re...

< 1

$\approx 10^3$

$> 10^5$

أي قيمة

1 >. التدفق الزاحف.

4. سحب الجسم غير الانسيابي معظمه...

الاحتكاك

الضغط

مستحث

موجي

الضغط. أثر منفصل.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تشرح وزارة الطاقة الأمريكية أن شفرات توربينات الرياح تعمل مثل جناح الطائرة أو دوّار المروحية: فرق الضغط على جانبي الشفرة يولّد رفعًا وسحبًا، ولأن الرفع أقوى من السحب يدور الدوّار مولدًا كهربائيًا. وتشير الوزارة إلى أن التوربينات البرية تتراوح بين 100 كيلوواط وعدة ميغاواطات.

يفسر قانون ½ρAV³ سبب ازدياد ارتفاع التوربينات وعرضها: فمضاعفة قطر الدوّار تضاعف المساحة أربع مرات، والمحاور الأعلى تبلغ رياحًا أسرع، والقدرة تزداد مع مكعب السرعة. ويحدد حد بيتز الهدف الذي يسعى إليه كل مصمم شفرات.

على Saving Planets: الديناميكا الهوائية 1 · الحلول

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

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn: Drag of a sphere (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html): صفحة مجانية من NASA.
- NASA Glenn: Boundary layer (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundlay.html): صفحة مجانية من NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): محاضرات عن التدفق الخارجي.
- 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.

أنهيت هذه الوحدة

التدفق في القنوات المفتوحة: الأنهار والقنوات والقفزات الهيدروليكية

القنوات المكشوفة، ونصف القطر الهيدروليكي، وعدد فرود والتدفق دون الحرج والحرج وفوق الحرج، والطاقة النوعية والعمق الحرج، والتدفق المنتظم ومعادلة مانينغ، والقفزات الهيدروليكية وتبديد الطاقة، والهدارات لقياس التدفق.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- تصنيف التدفق في القنوات بعدد فرود.
- إيجاد العمق الحرج والطاقة النوعية.
- استخدام معادلة مانينغ للتدفق المنتظم.
- حساب العمق بعد القفزة الهيدروليكية والطاقة المفقودة فيها.

المفاهيم الأساسية

- في القنوات المكشوفة تدفع الجاذبية التدفق ويكون السطح الحر عند الضغط الجوي. ونصف القطر الهيدروليكي R_h = A/P (المحيط المبلل).
- عدد فرود Fr = V/√(gy): Fr < 1 دون الحرج (بطيء وعميق)، Fr = 1 حرج، Fr > 1 فوق الحرج (سريع وضحل). ولا تنتقل الموجات السطحية عكس التيار إلا في التدفق دون الحرج.
- الطاقة النوعية E = y + V²/(2g). ولتدفق لكل وحدة عرض q، تحدث أدنى قيمة لـE عند العمق الحرج y_c = (q²/g)^(1/3).
- التدفق المنتظم (مانينغ، SI): V = (1/n) R_h^(2/3) S^(1/2)، مع معامل الخشونة n (نحو 0.013 للخرسانة المشطبة) وميل القاع S.
- تحوّل القفزة الهيدروليكية التدفق فوق الحرج إلى دون الحرج: y₂/y₁ = ½(√(1 + 8Fr₁²) − 1)، وتبدد علوًا h_L = (y₂ − y₁)³/(4y₁y₂). وتستخدم المفيضات القفزات لحماية مجاري الأنهار أسفل السدود.

المعادلات الأساسية

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

عدد فرود

$$E = y + \frac{V^2}{2g}, \;\; y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}$$

```
E=y+(V^2)/(2g),\ \ y_c=((q^2)/(g))^1/3
```

الطاقة النوعية والعمق الحرج

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

```
V=1n R_h^2/3S^1/2
```

معادلة مانينغ (SI)

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1\right)$$

(y_2)/(y_1)=12(1+8Fr_1^2-1)

القفزة الهيدروليكية

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 10.1 قناة خرسانية عرضها 2 m (n = 0.013) يجري فيها الماء بعمق 1 m على ميل 0.001. أوجد V وQ.

1. A = 2 m², P = 4 m, R_h = 0.5 m.
2. V = (1/0.013) × 0.5^(2/3) × 0.001^0.5.
3. Q = VA.

الإجابة: V = 1.53 m/s; Q = 3.06 m³/s.

مثال 10.2 يجري الماء بعمق 0.5 m وبسرعة 6 m/s أسفل مفيض. أوجد Fr والعمق بعد القفزة الهيدروليكية والعلو المفقود.

1. Fr = 6/√(9.81 × 0.5) = 2.71.
2. $y_2 = 0.25 \times (\sqrt{1 + 8 \times 2.71^2} - 1)$.
3. $h_L = (y_2 - y_1)^3/(4y_1y_2)$.

الإجابة: Fr = 2.71; y_2 = 1.68 m; h_L = 0.491 m.

مثال 10.3 أوجد العمق الحرج عند q = 2 m²/s.

1. y_c = (4/9.81)^(1/3).

الإجابة: y_c = 0.742 m.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. هل V = 3 m/s عند عمق 1 m دون الحرج أم فوقه؟

   Fr = 0.958، دون الحرج.

2. أوجد E عند y = 1 m و V = 3 m/s.

   1 + 9/19.62 = 1.459 m.

3. أي عمق ينقل $q = 2\ m^2/s$ عند $V = 1.53\ m/s$؟

$2/1.532 = 1.31\ m$.

4. لماذا يُبنى حوض تهدئة أسفل السد؟

لفرض قفزة تبدد الطاقة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: التدفق السريع فوق الحرج دائمًا.
في الحقيقة: قارن V مع √(gy).

خرافة: القفزة تكسب طاقة.
في الحقيقة: إنها تفقد طاقة.

خرافة: معامل مانينغ n واحد في كل مكان.
في الحقيقة: يعتمد على السطح.

بطاقات تعليمية

فرود

V/√(gy).

نصف القطر الهيدروليكي

A/P.

الطاقة النوعية

$y + V^2/2g$.

العمق الحرج

$(q^2/g)^(1/3)$.

مانينغ

$(1/n)R^(2/3)S^(1/2)$.

القفزة

$y_2/y_1 = ½(√(1 + 8Fr^2) − 1)$.

اختبار ذاتي

1. التدفق فوق الحرج...

Fr < 1

Fr = 1

Fr > 1

Fr = 0

Fr > 1. سريع وضحل.

2. نصف القطر الهيدروليكي هو...

A/P

P/A

4A/P

y

A/P. التعريف.

3. تكون الطاقة النوعية في أدنى قيمها عند...

العمق الحرج

عمق صفري

العمق الطبيعي

أي عمق

العمق الحرج. dE/dy = 0.

4. القفزة الهيدروليكية...

تبدد الطاقة

تضيف طاقة

عكوسة

تسرّع التدفق

تبدد الطاقة. خلط مضطرب.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تصف وزارة الطاقة الأمريكية محطة الطاقة الكهرومائية التحويلية، أو الجارية على النهر، بأنها منشأة توجّه جزءًا من النهر عبر قناة و/أو أنبوب ضغط، مستفيدة من الانحدار الطبيعي لمجرى النهر لإنتاج الطاقة، أحيانًا دون سد. وتصميم تلك القناة مسألة تدفق في قناة مكشوفة: تحدد معادلة ماننغ أبعادها وفق التدفق، ويحدد فرق المنسوب العلو.

وتضيف الوزارة أن تصريفات الخزانات يمكن أن تخدم مرور الأسماك وجودة المياه. ويستخدم المهندسون عدد فرود والقفزات الهيدروليكية لتشكيل المفيضات والقنوات التي تحمي مجاري الأنهار وتُبقي التدفقات آمنة للحياة البرية.

على Saving Planets: المحيطات · رصد الأرض

المصادر: U.S. DOE: U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants) · How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engine/ering-mechanics-ii-spring-2006/): ملاحظات عن القنوات المكشوفة.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): تدفقات السطح الحر.
- NOAA: Currents tutorial (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html): درس مجاني من NOAA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-flui/d-mechanics-fall-2013/): معالجة أعمق.

أنهيت هذه الوحدة

مجموعات المسائل

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

1. خواص الموائع: الكثافة واللزوجة والتوتر السطحي
   4 مسائل
2. استاتيكا الموائع والمانومترات والطفو
   4 مسائل
3. برنولي وعلو الضغط ومعادلة الطاقة
   4 مسائل
4. كمية الحركة التكاملية: النفثات والريش والأكواع والتوربينات
   4 مسائل
5. التحليل التفاضلي: الاستمرارية ونافييه–ستوكس والتدفقات الدقيقة
   4 مسائل
6. التحليل البعدي والتشابه واختبار النماذج
   4 مسائل
7. التدفق في الأنابيب: الاحتكاك ومخطط مودي والفواقد الثانوية
   4 مسائل

8. المضخات والتوربينات وأنظمة الضخ
   4 مسائل
9. التدفق الخارجي: الطبقات الحدية والسحب والرفع
   4 مسائل
10. التدفق في القنوات المفتوحة: الأنهار والقنوات والقفزات الهيدروليكية
    4 مسائل

المختبر (Fluid mechanics lab)

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

يمكن إجراء كل مختبر في محاكاة مجانية أو بأدوات من المطبخ والحديقة. اعمل فوق حوض أو في الخارج، وامسح أي انسكاب فورًا لتجنب الانزلاق، واستخدم ماء الصنبور البارد فقط، وأبعد الماء عن المقابس والأجهزة الكهربائية.

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

المختبر A: الكثافة والطفو بالوزن

الأسبوع 3

الهدف: إيجاد حجم جسم وكثافته من وزنه في الهواء ووزنه الظاهري في الماء، باستخدام مبدأ أرخميدس.

$$V = \frac{m_{air} - m_{water}}{\rho_w}, \;\; \rho = \frac{m_{air}}{V}$$

```
V=_air-m_waterρ_w,\ \ ρ=_airV
```

مبدأ أرخميدس

الإجراء

1. استكشف PhET Buoyancy: غيّر كثافة الجسم وكثافة المائع وراقب القوى.
2. في المنزل: زن جسمًا صغيرًا كثيفًا (حجرًا أو ملعقة معدنية) على ميزان مطبخ.
3. علّقه بخيط مغمورًا كليًا في الماء داخل إبريق موضوع على الميزان (اضبط الصفر أولًا)، أو استخدم ميزان أمتعة معلقًا؛ وسجّل الكتلة الظاهرية.
4. احسب الحجم والكثافة.

جدول البيانات

الكمية	القيمة
الكتلة في الهواء	200 g
الكتلة الظاهرية في الماء	120 g
الحجم	80 cm³
الكثافة	2500 kg/m³

قيم مثال (نموذجية للحجر أو الزجاج).

مثال حسابي

1. V = (200 − 120)/1.00 = 80 cm³.
2. ρ = 200/80 = 2.50 g/cm³ = 2500 kg/m³.

> **السلامة**
>
> - امسح أي انسكاب فورًا.

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

PhET: Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy) · PhET: Density (https://phet.colorado.edu/en/simulations/density)

الصلة بالكوكب: توضح NOAA أن فروق الكثافة الناتجة عن الحرارة والملوحة تحرك الحزام الناقل في أعماق المحيط. NOAA National Ocean Service: Thermohaline circulation (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html)

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

المختبر B: زجاجة تورشيلي

الأسبوع 4

الهدف: التحقق من قانون تورشيلي بقياس المسافة التي يقطعها نفث ماء من ثقب في زجاجة.

$$V = \sqrt{2gh}, \;\; x = 2\sqrt{hY}$$

V=2gh,\ \ x=2

سرعة النفث ومداه من الارتفاع Y

الإجراء

1. اثقب ثقبًا صغيرًا في جانب زجاجة بلاستيكية قرب القاع؛ وغطّه بشريط لاصق.
2. املأ الزجاجة وضعها على صندوق فوق حوض أو في الخارج، بحيث يكون الثقب على ارتفاع Y = 0.3 m فوق سطح السقوط.
3. انزع الشريط؛ وعندما يكون منسوب الماء h = 0.2 m فوق الثقب، علّم موضع سقوط النفث.
4. قارن بالتنبؤ؛ وكرر عند أعماق أخرى.

جدول البيانات

الكمية	القيمة
العلو h	0.20 m
سرعة النفث	1.98 m/s
ارتفاع السقوط Y	0.30 m
المدى المتوقع	0.49 m

قيم متوقعة؛ النفث الحقيقي يسقط أقرب قليلًا بسبب الفواقد عند الثقب.

مثال حسابي

1. V = √(2 × 9.81 × 0.2) = 1.98 m/s.
2. x = 2√(0.2 × 0.3) = 0.49 m.

السلامة

- نفّذ ذلك فوق حوض أو في الخارج؛ وامسح الماء لتجنب الانزلاق.
- استخدم سيخًا بحذر، موجهًا بعيدًا عن يدك.

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

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 وزارة الطاقة الأمريكية إلى أن إنتاج الطاقة الكهرومائية يزداد مع العلو؛ وسرعة نفث الزجاجة تزداد مع h٧ للسبب نفسه. U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

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

المختبر C: قياس معدل التدفق وعدد رينولدز

الأسبوع 7

الهدف: قياس معدل تدفق صنبور أو خرطوم بدلو وساعة إيقاف، وتحديد ما إذا كان التدفق داخله طباقيًا أم مضطربًا.

$$Q = \frac{V_{bucket}}{t}, \quad Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

```
Q=_buckett,\ \ Re=(ρ VD)/(μ)
```

معدل التدفق وعدد رينولدز

الإجراء

1. قِس الزمن الذي يستغرقه خرطوم أو صنبور لملء 10 L.
2. قِس القطر الداخلي للخرطوم أو لمخرج الصنبور.
3. احسب Q والسرعة المتوسطة وRe.
4. اخفض الصنبور حتى يبدو التيار أملس وزجاجيًا، ثم كرر.

جدول البيانات

الكمية	القيمة
10 L خلال	25 s
Q	0.4 L/s
قطر الخرطوم الداخلي	16 mm
V	1.99 m/s
Re	31,700

قيم مثال؛ Re أعلى بكثير من 4000 يعني تدفقًا مضطربًا داخل الخرطوم.

مثال حسابي

1. $V = 0.0004 / (\pi \times 0.008^2) = 1.99$ m/s.
2. $Re = 998 \times 1.99 \times 0.016 / 1.002 \times 10^{-3} = 31{,}700$.

السلامة

- أغلق الصنبور عند الانتهاء؛ وانتبه للأرض الزلقة.

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

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

الصلة بالكوكب: تقترح وكالة حماية البيئة فحص عداد المياه خلال ساعتين دون استخدام أي ماء؛ وأي تغير يعني وجود تسرب. U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

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

المختبر D: جدول بيانات احتكاك الأنابيب

الأسبوع 10

الهدف: بناء جدول بيانات لعدد رينولدز ومعامل الاحتكاك وفاقد العلو مقابل السرعة، ومعرفة كيف تزداد الفواقد.

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

```
h_L=fL/D(V^2)/(2g)
```

دارسي–فايسباخ

الإجراء

1. اجعل D = 50 mm و L = 100 m و ε = 0.045 mm، والماء عند 20 °C.
2. احسب Re ومعامل f لهالاند عند V من 0.5 إلى 3 m/s.
3. احسب h_L وارسمه مقابل V.
4. وائم h_L ∝ V^n وأوجد n.

جدول البيانات

V (m/s)	Re	f	h_L (m)
1	49,800	0.0235	2.39
2	99,600	0.0216	8.82
3	149,400	0.0209	19.2

قيم محسوبة؛ تأتي n أقل قليلًا من 2 لأن f ينخفض ببطء مع ازدياد Re.

مثال حسابي

1. h_L(2 m/s) = 0.0216 × 2000 × 4/19.62 = 8.82 m.
2. مضاعفة V ثلاث مرات ترفع h_L بمقدار 19.2/2.39 = 8.0 مرات.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/)

الصلة بالكوكب: تقول وزارة الطاقة الأمريكية إن أفضل الممارسات في أنظمة الضخ توفر طاقة هائلة؛ والفواقد الأقل تعني مضخات أصغر. U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

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

المختبر E: ترسب الرمل في الماء

الأسبوع 13

الهدف: مراقبة ترسب الرمل الناعم والخشن في كأس طويلة من الماء ومقارنته بقانون ستوكس.

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho) g D^2}{18 \mu}$$

```
V_s=((ρ_p-ρ)gD^2)/(18μ)
```

ترسيب ستوكس

الإجراء

1. املأ كأسًا طويلة أو زجاجة شفافة بالماء.
2. أسقط قليلًا من الرمل الناعم وقِس الزمن الذي تستغرقه الحبيبات لتهبط 0.2 m.
3. كرر بالرمل الأخشن.
4. قارن السرعات بقانون ستوكس ولاحظ متى يتوقف عن الانطباق.

جدول البيانات

قطر الحبيبة	سرعة ستوكس	Re
50 µm	2.04 mm/s	0.102
100 µm	8.17 mm/s	0.81

محسوبة لحبيبات شبيهة بالكوارتز (ρ = 2500 kg/m³)؛ والحبيبات الأخشن التي يتجاوز Re فيها نحو 1 تسقط أبطأ مما يتنبأ به ستوكس.

مثال حسابي

1. $V(50\ \mu m) = 1502 \times 9.81 \times 2.5 \times 10^{-9} / (18 \times 1.002 \times 10^{-3}) = 2.04$ mm/s.
2. مضاعفة D تزيد السرعة 4 أضعاف.

السلامة

- استخدم رمل لعب نظيفًا؛ واغسل يديك بعد ذلك.

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

NASA Glenn: Drag of a sphere (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html)

الصلة بالكوكب: تشير وزارة الطاقة الأمريكية إلى أن تصريفات الخزانات تخدم جودة المياه؛ والترسيب يحدد كيف تمتلئ الخزانات وكيف تحمل الأنهار الطمي. U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants)

- [ ] أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)

المختبر F: نظام الضخ والسرعة المتغيرة

الأسبوع 11

الهدف: إيجاد نقطة تشغيل مضخة واستخدام قوانين التشابه للمقارنة بين الخنق وإبطاء المضخة.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

```
(P_2)/(P_1)=((N_2)/(N_1))^3
```

قانون التشابه للقدرة

الإجراء

1. أدخل منحنى المضخة $H = 40 - 7000Q^2$ ومنحنى النظام $H = 10 + 5000Q^2$.
2. أوجد نقطة التشغيل وقدرة العمود.
3. طبّق قوانين التشابه عند 1500 و1200 rpm على نقطة 1800 rpm (0.05 m³/s، 30 m).
4. قارن القدرات المطلوبة.

جدول البيانات

N (rpm)	Q (m³/s)	H (m)	نسبة القدرة
1800	0.050	30.0	1.000
1500	0.0417	20.8	0.579
1200	0.0333	13.3	0.296

تحجيم تشابه مثالي؛ والرفع الساكن في النظام يحد من مقدار إبطاء المضخة الحقيقية.

مثال حسابي

1. $Q(1200) = 0.05 \times 2/3 = 0.0333$ m³/s.
2. نسبة القدرة $= (2/3)^3 = 0.296$.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

الصلة بالكوكب: تساعد أداتا PSAT وMEASUR المجانيتان من وزارة الطاقة المصانعَ على إيجاد وفورات المضخات هذه تحديدًا.
U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

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

مجموعات تدريب للامتحان

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

مجموعة تمارين منتصف الفصل (الوحدات 5–1)

1. أوجد إجهاد القص في الماء بين لوحين المسافة بينهما 0.5 mm عندما يتحرك أحدهما بسرعة 1 m/s.

   1. $\tau = 1.002 \times 10^{-3} \times 1/0.0005$.

   الإجابة: 2.00 Pa.

2. أوجد الضغط المقيس على عمق 25 m في ماء البحر ($1025\ kg/m^3$).

   1. $1025 \times 9.81 \times 25$.

   الإجابة: 251.4 kPa.

3. أوجد قدرة محطة كهرومائية مع $Q = 20\ m^3/s$ و $H = 40\ m$ و $\eta = 0.88$ ($\rho = 1000$).

   1. $0.88 \times 1000 \times 9.81 \times 20 \times 40$.

   الإجابة: 6.91 MW.

4. نفث ماء $0.01\ m^3/s$ بسرعة 25 m/s تحرفه ريشة ثابتة بزاوية 180°. ما القوة؟

   1. $2\rho QV = 2 \times 1000 \times 0.01 \times 25$.

   الإجابة: 500 N.

5. أوجد Q الطباقي في أنبوب نصف قطره 2 mm، مع $\Delta p/L = 200\ Pa/m$، والمائع ماء.

   1. $\pi \times 0.002^4 \times 200/(8 \times 1.002 \times 10^{-3})$.

   الإجابة: $1.25 \times 10^{-6}\ m^3/s$.

مجموعة التدريب النهائية (كل الوحدات)

1. نموذج سفينة بمقياس 1:25 محجّم وفق فرود. السرعة الحقيقية 10 m/s. ما سرعة النموذج؟

   1. 10/5.

   الإجابة: 2 m/s.

2. أوجد h_L في 200 m من أنبوب قطره 0.1 m مع f = 0.02 عند 1.5 m/s.

1. 2.25/19.62 × 2000 × 0.02.

الإجابة: 4.59 m.

3. مضخة عند 1200 rpm تعطي علوًا 25 m. ما العلو عند 1500 rpm؟

1. 25 × (1.25)².

الإجابة: 39.1 m.

4. أوجد قدرة الرياح عبر دوّار قطره 80 m عند 8 m/s (ρ = 1.225).

1. ½ × 1.225 × π × 40² × 512.

الإجابة: 1.58 MW.

5. أوجد Fr لتدفق سرعته 4 m/s وعمقه 0.4 m.

1. 4/√(9.81 × 0.4).

الإجابة: 2.02، فوق الحرج.

6. أوجد y_c عند q = 3 m²/s.

1. (9/9.81)^(1/3).

الإجابة: 0.972 m.

ورقة الصيغ

$$\tau = \mu\, du/dy,\ \nu = \mu/\rho$$

$$p = p_0 + \rho g h,\ F = \rho g h_c A,\ F_B = \rho g V$$

$$Q = AV,\ p/\rho g + V^2/2g + z = \text{const}$$

$$P = \eta \rho g Q H,\ V = \sqrt{2gh}$$

$$\sum F = \sum \dot{m} V_{out} - \sum \dot{m} V_{in},\ F = \rho Q V(1 - \cos$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0,\ Q = \pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$$

$$Re = \rho V L/\mu,\ Fr = V/\sqrt{gL}$$

$$h_L = f(L/D)V^2/2g,\ f_{lam} = 64/Re$$

$$h_m = K V^2/2g,\ D_h = 4A/P$$

$$P = \rho g Q h/\eta,\ Q \propto N,\ H \propto N^2,\ P \propto N^3$$

$$F_D = C_D \tfrac{1}{2}\rho V^2 A,\ P_{wind} = \tfrac{1}{2}\rho A V^3$$

$$V = (1/n)R_h^{2/3} S^{1/2},\ y_c = (q^2/g)^{1/3}$$

$$y_2/y_1 = \tfrac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$$

الثوابت

الثابت	القيمة
الماء عند 20 °C (قيم مرجعية)	ρ = 998 kg/m³، μ = 1.002 × 10⁻³ kg/(m·s)، ν = 1.004 × 10⁻⁶ m²/s، التوتر السطحي σ = 0.0728 N/m
الهواء عند 15 °C (قيم مرجعية)	ρ = 1.225 kg/m³, μ = 1.789 × 10⁻⁵ kg/(m·s)
ماء البحر والجليد (قيم مرجعية)	ρ_sea = 1025 kg/m³، ρ_ice = 917 kg/m³
الزئبق (قيمة مرجعية)	ρ = 13,600 kg/m³
الجاذبية	g = 9.81 m/s²
1 غالون أمريكي	3.785 L

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 وأقسام الكتب والمحاكاة المجانية إلى جانب المقرر.

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): ملاحظات محاضرات ومجموعات مسائل مجانية من MIT.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): مقرر MIT مجاني في موائع الهندسة المدنية.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): معالجة أعمق من MIT.
- OpenStax University Physics Volume 1, Chapter 14: Fluid mechanics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-1-fluids-density-and-pressure): فصل من كتاب مجاني.
- PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow): الضغط والتدفق بشكل تفاعلي.
- PhET: Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy): الطفو بشكل تفاعلي.

مسرد المصطلحات

الطبقة الحدية
طبقة رقيقة قرب الجدار تكون فيها اللزوجة مؤثرة.

الطفو

قوة صاعدة تساوي وزن المائع المزاح.

التكهف
فقاعات بخار تتكون حيث ينخفض الضغط إلى ضغط البخار.

الاتصال
حفظ الكتلة في التدفق.

معامل السحب
السحب مقسومًا على ½ρV²A.

عدد فرود
V/√(gL)، القصور الذاتي إلى الجاذبية.

العلو
الطاقة لكل وحدة وزن من المائع، بالأمتار.

فاقد العلو
الطاقة الميكانيكية المفقودة بالاحتكاك، لكل وحدة وزن.

القفزة الهيدروليكية
تحول مفاجئ من تدفق فوق الحرج إلى دون الحرج.

نصف القطر الهيدروليكي
مساحة التدفق مقسومة على المحيط المبلل.

التدفق الطباقي
تدفق منتظم على هيئة طبقات عند عدد رينولدز منخفض.

المانومتر
أنبوب سائل يُستخدم لقياس فروق الضغط.

معادلات نافييه–ستوكس
معادلات كمية الحركة لمائع لزج.

نقطة التشغيل
حيث يلتقي منحنى المضخة بمنحنى النظام.

عدد رينولدز
ρVL/μ، القصور الذاتي إلى القوى اللزجة.

الوزن النوعي
الكثافة نسبةً إلى الماء.

تدفق ستوكس
تدفق زاحف عند Re أقل بكثير من 1.

التوتر السطحي
القوة لكل وحدة طول على امتداد سطح سائل.

التدفق المضطرب
تدفق فوضوي خالط عند عدد رينولدز مرتفع.

اللزوجة
مقاومة المائع للقص.

معايير التقييم الذاتي

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

المستوى	كيف يبدو
4 · إتقان	يرسم أحجام التحكم، ويختار القانون الصحيح (الهيدروستاتيكا، برنولي، الطاقة، كمية الحركة، نافييه–ستوكس)، ويتحقق من Re وFr، ويحافظ على اتساق الوحدات، وينفذ المختبرات بأمان.
3 · متمكن	يحل مسائل التدريب مع أخطاء عرضية في الوحدات أو الإشارات.
2 · قيد التطور	يتبع الأمثلة المحلولة لكنه يطبق برنولي عبر المضخات أو يتجاهل الفواقد.
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

- الديناميكا الحرارية ENGR 320
- أداء الطائرات AERO 320
- الديناميكا الهوائية 1 AERO 310
- كل الدورات