

☆ بسيطة

الفيزياء، البكالوريا، الفرع العلمي

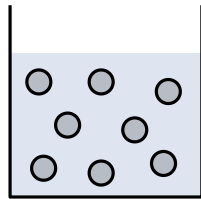
السائل المثالي ومعادلة الاستمرارية

الجريان المستقر، وخط الانسياب وأنبوب التدفق، وميزات السائل المثالي، ومعادلة التدفق، ومعادلة الاستمرارية
الحركة والتحرك . الوحدة 1 . الدرس 4 (1 من 2)

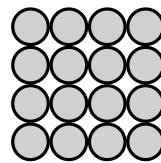
درسنا حتى الآن أجساماً صلبة تهتز وتدور. وننتقل في هذا الدرس إلى السوائل وهي تجري، ويبدأ الكتاب في الصفحة 39 بسؤالين: «ما المقصود بالسائل؟ وما القوانين التي تحكم حركتها؟» نتابع معه في الصفحات 40 إلى 43: ما السائل، وما الجريان المستقر وخط الانسياب وأنبوب التدفق، وما السائل المثالي، ثم معدل التدفق ومعادلة الاستمرارية. ولا يحلّ الكتاب في هذا الدرس مثلاً رقمياً واحداً، فنحلّ في آخره مثلاً من عندنا على مسألة جاءت في امتحان البكالوريا: ملء خزانٍ بخرطوم.

السائل

يقارن الكتاب في النشاط الأول، الصفحة 40، بين الحالتين السائلة والصلبة: في الجسم الصلب جزيئات متراصة، وفي السائل جزيئات أكثر تباعداً تتحرك بحركة أكبر.



الحالة السائلة



الحالة الصلبة

جزيئات سائل في كأس، وجزيئات جسم صلب. عن الكتاب، الصفحة 40.

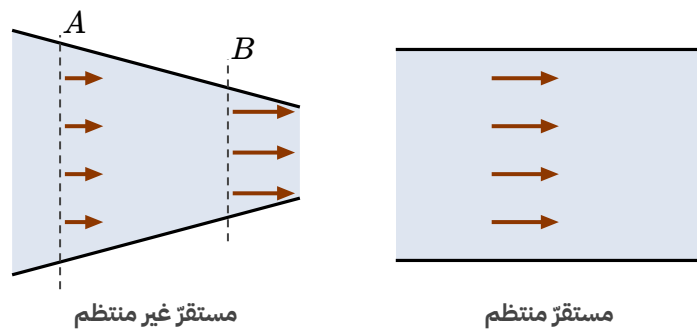
تذكر: «تتميز السوائل بقوة تماسك ضعيفة نسبياً بين جزيئاتها، فهي لا تحافظ على شكل معين، وتتحرك جزيئاتها بحيث تأخذ شكل الوعاء الذي توضع فيه، وهي تستجيب بسهولة للقوى الخارجية التي تحاول تغيير شكلها.» الكتاب، الصفحة 40.

ولنصف حركة سائل عند لحظة ما يجب، كما في الكتاب، أن نعرف كثافته، أي كتلته الحجمية، وضغطه وسرعته ودرجة حرارته. ولتسهيل الدراسة ندرس «جسيم السائل»: جزء من السائل أبعاده صغيرة جداً بالنسبة لأبعاد السائل، وكبيرة بالنسبة لأبعاد جزيئاته.

الجريان المستقر

تذكّر: الجريان المستقرّ «هو الجريان الذي تكون فيه سرعة جسيمات السائل ثابتة مع مرور الزمن في النقطة نفسها من خطّ الانسياب، فإذا تغيّرت السرعة من نقطة إلى أخرى بمرور الزمن كان الجريان المستقرّ غير منتظم، أما إذا كانت السرعة ثابتة في جميع نقاط السائل بمرور الزمن فإنّ الجريان المستقرّ يكون منتظماً». الكتاب، الصفحة 40.

بعبارة أخرى: نثبت نظراً على نقطة واحدة من مجرى السائل. إذا مرّت بها جسيمات السائل كلّها بالسرعة نفسها، لحظةً بعد لحظة، فالجريان مستقرّ. ثمّ نقارن بين النقاط: إن كانت السرعة واحدة في جميع النقاط فالجريان المستقرّ منتظم، وإن اختلفت من نقطة إلى أخرى فهو غير منتظم.



في القناة التي تضيق تختلف السرعة بين المقطعين A و B ، فالأسهم عند B أطول: جريان مستقرّ غير منتظم. وفي الأنبوب ذي المقطع الثابت الأسهم كلّها متساوية: جريان مستقرّ منتظم. عن الكتاب، الصفحة 40.

يجري ماء في أنبوب يضيق. سرعة الماء عند المقطع A ثابتة مع الزمن، وعند المقطع B ثابتة مع الزمن أيضاً، لكنّها أكبر منها عند A . كيف نصف هذا الجريان؟

| كيف أبداً؟ قارن مرّتين: السرعة في النقطة نفسها مع مرور الزمن، ثمّ السرعة بين نقطتين مختلفتين.

(أ) جريان مستقرّ منتظم.

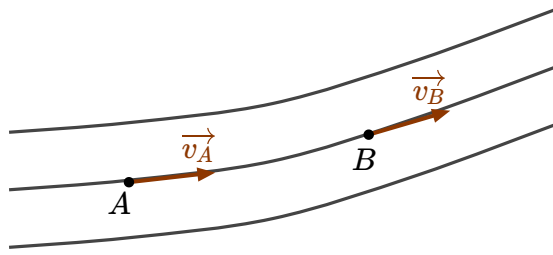
(ب) جريان مستقرّ غير منتظم.

(ج) جريان غير مستقرّ.

ب. نعم: في كلّ نقطة تبقى السرعة ثابتة مع الزمن، فالجريان مستقرّ، وتختلف من A إلى B ، فهو غير منتظم، كالقناة التي تضيق في شكل الكتاب.

خطّ الانسياب وأنبوب التدفق

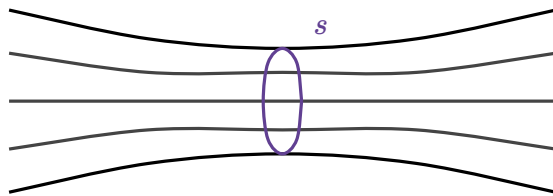
تذكّر: خطّ الانسياب، ويسمّيه الكتاب أيضاً خطّ الجريان: «خط وهمي يبيّن المسار الذي يسلكه جسيم السائل في أثناء جريانه ويمشّي في كلّ نقطة من نقاطه شعاع السرعة في تلك النقطة». الكتاب، الصفحة 41.



ثلاثة خطوط انسياب، وعلى أحدها النقطتان A و B . شعاع السرعة في كلٍّ منهما يمسّ الخط، فيتغيّر اتجاهه حين ينحني الخط. عن الكتاب، الصفحة 41، وفيه نقطة واحدة.

ومن هذا التعريف نفثّر سؤالاً في آخر الدرس، الصفحة 48: لماذا لا تتقاطع خطوط الانسياب؟ والجواب من عندنا: لو تقاطع خطان في نقطة لكان لهما فيها مماسان، أي لكان لجسيم السائل الذي يمرّ بها شعاعاً سرعةً في اتجاهين مختلفين في اللحظة نفسها. وفي الجريان المستقرّ لكلّ نقطة سرعة واحدة ثابتة.

تذكّر: أنبوب التدفق: «إذا أخذنا مساحة صغيرة عموديّة على اتجاه جريان سائل جريانه مستقرّ، ورسمنا على محيط هذه المساحة خطوط الانسياب نحصلُ على أنبوبٍ وهميّ يحتوي السائل يُدعى أنبوب التدفق». الكتاب، الصفحة 41.



المساحة s عموديّة على اتجاه الجريان، وخطّ الانسياب المارّان بحيطها يحدّان أنبوب التدفق. عن الكتاب، الصفحة 41.

لماذا لا تتقاطع خطوط الانسياب في سائلٍ جريانه مستقرّ؟

| كيف أبدأ؟ ماذا يعني أن يمسّ خطّ الانسياب شعاع السرعة في كلّ نقطة من نقاطه؟

(أ) لأنّ السائل غير قابلٍ للانضغاط.

(ب) لأنّ خطوط الانسياب متوازيّة دائماً.

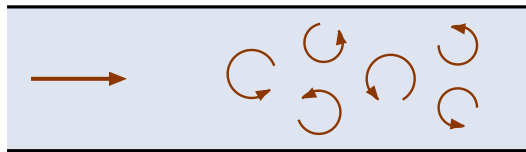
(ج) لأنّ جسيم السائل في نقطة التقاطع سيكون له شعاعاً سرعةً في اتجاهين مختلفين في آنٍ واحد.

ج. نعم: شعاع السرعة يمسّ خطّ الانسياب، وخطان متقاطعان لهما في نقطة التقاطع مماسان مختلفان. وفي الجريان المستقرّ لكلّ نقطة سرعة واحدة.

ميزات السائل المثالي

ندرس في هذا الدرس والدرس الذي يليه سائلاً مثاليًا، وهو نموذجٌ يبسط السائل الحقيقي. يكتب الكتاب في الصفحة 41: «يتمتع السائل المثالي بالميزات الآتية»:

تذكّر: (1) غير قابل للانضغاط: «كتلته الحجمية ثابتة مع مرور الزمن». (2) عديم اللزوجة: «قوى الاحتكاك الداخلي بين مكوناته مهملة عندما تتحرك بالنسبة لبعضها بعضاً، وبالتالي لا يوجد ضياع للطاقة». (3) جريانه مستقر: «أي أنّ حركة جسيماته لها خطوط انسياب محدّدة وسرعة جسيماته عند نقطة معيّنة تكون ثابتة بمرور الزمن». (4) جريانه غير دوّاني: «لا تتحرك جسيمات السائل حركة دورانية حول أي نقطة في مجرى الجريان». الكتاب، الصفحة 41.



الجريان الدوّراني لمائع: جسيماته تدور حول نقاطٍ في مجرى الجريان، فهو ليس جريان سائلٍ مثالي. عن الكتاب، الصفحة 41.

وفي امتحان 2025 سؤال اختيارٍ من متعدّد عن ميزات السائل المثالي، وفي امتحان 2026 في دمشق: «اذكر اثنتين فقط من خصائص السائل المثالي»، ثم استنتاج معادلة الاستمرارية، وهو ما نصل إليه في آخر هذا الدرس.

سائلٌ تتغيّر كتلته الحجميّة حين يُضغَط. أيّ ميزةٍ من ميزات السائل المثالي لا تتحقّق فيه؟

| كيف أبدأ؟ أيّ الميزات الأربع تتحدّث عن الكتلة الحجميّة؟

أ) غير قابلٍ للانضغاط.

ب) عديم اللزوجة.

ج) جريانه غير دوّراني.

أ. نعم: السائل المثالي «كتلته الحجمية ثابتة»، فلا ينضغَط. وسائلٌ تتغيّر كتلته الحجميّة حين يُضغَط قابلٌ للانضغاط.

معدّل التدفق

في تجربة الكتاب، الصفحتان 41 و42، نملأ محقناً بلاستيكيّاً بالماء ونفرغه مرّتين، وندفع المكبس في المرّة الثانية بالقوّة السابقة نفسها: مرّةً والإبرة المعدنيّة مثبتةً في طرفه، ومرّةً بعد نزعها.



1. **مع الإبرة:** يتحرك الماء في جسم المحقن الواسع ببطء، ويخرج من الإبرة الضيقة أسرع بكثير.
2. **بعد نزع الإبرة:** يخرج الماء من فتحة المحقن، وهي أوسع من مقطع الإبرة، فالفرق بين سرعته في جسم المحقن وسرعة خروجه أصغر.

تجربة المحقن، الصفحتان 41 و 42: $\vec{F}$ القوة نفسها على المكبس في المَرتَين، و $\vec{v}_1$ سرعة الماء في جسم المحقن، و $\vec{v}_2$ سرعة خروجه. الرسم من عندنا وليس بمقياس، وفي الكتاب صورة محقن.

تذكر: «تزداد سرعة تدفق السائل في أنبوب بنقصان مساحة مقطع الأنبوب». الكتاب، الصفحة 42.

تذكر: معدل التدفق الكتلي Q لسائل «هو كتلة كمية السائل التي تعبر مقطع الأنبوب في وحدة الزمن»: $Q = \frac{m}{\Delta t}$ ، ويقدر في الجملة الدولية بـ kg.s^{-1} . ومعدل التدفق الحجمي Q' لسائل «هو حجم كمية السائل التي تعبر مقطع الأنبوب في وحدة الزمن»: $Q' = \frac{V}{\Delta t}$ ، ويقدر بـ $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. الكتاب، الصفحة 42.

انتبه إلى الشرطة: Q' للحجم و Q للكتلة. ونربط بينهما بالكتلة الحجمية ρ ، فكتلة حجم V من السائل $m = \rho V$ ، ويكتبها الكتاب نفسه $m = \rho \Delta V$ في الصفحة 45. أما العلاقة التالية إضافةً منّا، لا يكتبها الكتاب في هذا الدرس:

$$Q = \rho Q'$$

انتبه: ⚠️ خطآن شائعان. الأول أن تحسب Q' وقد طلب Q ، أو العكس، فانظر إلى الوحدة: kg.s^{-1} أو $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. والثاني أن تعوّض قبل تحويل الوحدات: $1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$ و $1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$. ومسائل الكتاب في الصفحتين 48 و 49 تعطي المقاطع بـ cm^2 وبعض الحجوم بـ L . وفي الملاحظات العامة لسلم تصحيح 2023: «الغلط في التحويل يخسر درجة الجواب».

وطلبت علاقة معدل التدفق الكتلي في الدورة الثانية 2022 وفي امتحان 2026 في دمشق، وعلاقة معدل التدفق الحجمي في الدورة الأولى 2019. وتسمي أوراق الامتحان Q' أيضاً «معدل الضخ»، وكذلك يسميه الكتاب في مسأله، الصفحة 49.

يُملأ خزان حجمه 360 L بزيت كتلته الحجمية $\rho = 900 \text{ kg.m}^{-3}$ في 120 s . ما معدّل التدفق الكتلي؟
كيف أبدأ؟ حوّل الحجم إلى m^3 ، ثم احسب كتلة الزيت، ثم اقسّمها على الزمن.

$$Q = 2.7 \text{ kg.s}^{-1} \quad (\text{أ})$$

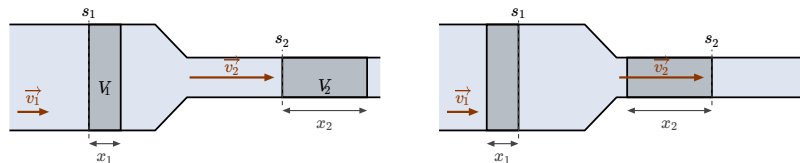
$$Q = 3 \times 10^{-3} \text{ kg.s}^{-1} \quad (\text{ب})$$

$$Q = 2700 \text{ kg.s}^{-1} \quad (\text{ج})$$

أ. نعم: الحجم $V = 0.36 \text{ m}^3$ ، فكتلة الزيت $m = \rho V = 324 \text{ kg}$ ، و $Q = \frac{m}{\Delta t} = \frac{324}{120}$ ، أي $Q = 2.7 \text{ kg.s}^{-1}$. وهو $\rho Q'$ أيضاً.

معادلة الاستمرارية

لماذا يجري الماء في الطرف الضيق أسرع منه في جسم المحقن؟ يجب الكتاب في الصفحتين 42 و 43 باستنتاج رياضي. سائل يتحرك داخل أنبوب مساحة مقطعيه s_1 و s_2 ، والفرض أنّ كمية السائل التي تدخل الأنبوب عند المقطع s_1 في مدّة زمنية معينة تساوي كمية السائل التي تخرج من المقطع s_2 في المدّة نفسها، «السائل لا يتجمّع داخل الأنبوب ويملؤه تماماً، وجريانه مستمر».



2. اللحظة $t + \Delta t$: عبر كل منهما مقطع: $x_1 = v_1 \Delta t$ و $x_2 = v_2 \Delta t$. ولهما الحجم نفسه، فالجزء في الأنبوب الضيق أطول.

1. اللحظة t : جزءان من السائل يوشكان أن يعبرا المقطعين: الأول طوله x_1 قبل s_1 ، والثاني طوله x_2 قبل s_2 .

أنبوب مساحة مقطعه s_1 ثم s_2 أصغر منها، و $\vec{v}_1$ و $\vec{v}_2$ سرعتا السائل فيهما. على شكل الكتاب، الصفحة 42، مقسوماً إلى لحظتين.

نستنتج معادلة الاستمرارية كما في الكتاب، وبالخطوات التي يطلبها سلم تصحيح الدورة الثانية 2022: نبدأ من تساوي معدلي التدفق الحجمي عند المقطعين.

$$Q'_1 = Q'_2$$

1. **الحجم عند s_1** حجم كميّة السائل التي تعبر المقطع s_1 لمسافة x_1 في الزمن Δt ، والسائل يقطع هذه المسافة بسرعه v_1 :

$$\begin{aligned} V_1 &= s_1 x_1 \\ x_1 &= v_1 \Delta t \\ V_1 &= s_1 v_1 \Delta t \end{aligned}$$

2. **الحجم عند s_2** وكذلك عند المقطع s_2 ، حيث السرعة v_2 :

$$\begin{aligned} V_2 &= s_2 x_2 \\ x_2 &= v_2 \Delta t \\ V_2 &= s_2 v_2 \Delta t \end{aligned}$$

3. **تساوي معدّلي التدفق** الكميّتان متساويتان في المدة نفسها، والسائل غير قابل للانضغاط، فلهما الحجم نفسه، كما يقول الكتاب صراحةً في استنتاج برنولي، الصفحة 44. ف $Q'_1 = Q'_2$. نعوّض ونختصر Δt :

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{\Delta t} &= \frac{V_2}{\Delta t} \\ \frac{s_1 v_1 \Delta t}{\Delta t} &= \frac{s_2 v_2 \Delta t}{\Delta t} \\ s_1 v_1 &= s_2 v_2 \end{aligned}$$

4. **النسبة** إذن، كما في الكتاب: «أي أنّ سرعة تدفق السائل تتناسب عكساً مع مساحة مقطع الأنبوب الذي يتدفق منه السائل.»

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{s_1}{s_2}$$

وعموماً، كما يكتب الكتاب في الصفحة 43، معدّل التدفق الحجمي ثابت على طول الأنبوب:

$$Q' = s_1 v_1 = s_2 v_2 = \text{const}$$

وطلب هذا الاستنتاج انطلاقاً من $Q'_1 = Q'_2$ في الدورة الثانية 2022 وفي امتحان 2026 في دمشق. وسلّم تصحيح 2026 يكتب المسافة Δx مكان x : $\frac{s_1 \Delta x_1}{\Delta t} = \frac{s_2 \Delta x_2}{\Delta t}$ ، ثم $s_1 v_1 = s_2 v_2$ ، لأنّ $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ هي السرعة. ويعطي سلّم 2022 علامة على الجملة الأخيرة أيضاً، أنّ السرعة تتناسب عكساً مع مساحة المقطع، فلا تقف عند المعادلة.

انتبه: إذا صار المقطع ربع ما كان عليه ومعدّل التدفق الحجمي لم يتغيّر، صارت السرعة أربعة أضعاف، لا ضعفين ولا ستّة عشر ضعفاً: $v_2 = \frac{s_1}{s_2} v_1$ ، والنسبة بين المقطعين تدخل كما هي، دون تربيع.

يجري الماء في خرطومٍ مساحة مقطعه 4 cm^2 بسرعة 1.5 m.s^{-1} ، وفي طرفه فوهةً مساحة مقطعها 0.5 cm^2 . ما سرعة خروج الماء من الفوهة؟

| كيف أبدأ؟ كم مرّة مقطع الفوهة أصغر من مقطع الخرطوم؟ ثمّ انظر ماذا تقول معادلة الاستمراريّة عن السرعة.

$$v_2 = 96 \text{ m.s}^{-1} \quad (\text{أ})$$

$$v_2 = 0.1875 \text{ m.s}^{-1} \quad (\text{ب})$$

$$v_2 = 12 \text{ m.s}^{-1} \quad (\text{ج})$$

ج. نعم: $\frac{s_1}{s_2} = \frac{4}{0.5} = 8$ ، ف $v_2 = 8 \times 1.5 = 12 \text{ m.s}^{-1}$. ولا حاجة هنا لتحويل cm^2 : النسبة بين مساحتين بالوحدة نفسها لا واحدة لها.

مثالٌ محلول: ملء خزّان

لا يحلّ الكتاب في هذا الدرس مثلاً رقمياً، فهذا مثالٌ من عندنا على مسألة ملء خزّانٍ بخرطوم. وقد جاءت بهذا البناء في امتحاني الدورة الأولى 2016 و 2022: معدّل التدفق الحجمي، ثمّ سرعة خروج الماء، ثمّ السرعة بعد تضيق الفتحة. ونكتب في كلّ خطوةٍ العلاقة ثمّ التعويض ثمّ النتيجة مع واحدتها، فعلى هذا تبني سلالم التصحيح علاماتها.

مثالٌ من عندنا: يُملأ خزّانٌ حجمه 900 L بالماء بخرطومٍ مساحة مقطع فتحته 6 cm^2 ، فتستغرق العمليّة 500 s . احسب معدّل التدفق الحجمي، ثمّ سرعة تدفق الماء من فتحة الخرطوم، ثمّ هذه السرعة إذا نقص مقطع الفتحة ليصبح ثلث ما كان عليه، ثمّ معدّل التدفق الكتلي. الكتلة الحجميّة للماء $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$.

$$Q' = \frac{V}{\Delta t}$$

1. تحويل الواحدات قبل أيّ تعويض:

$$V = 900 \text{ L} = 0.9 \text{ m}^3$$

$$s = 6 \text{ cm}^2 = 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

2. معدّل التدفق الحجمي العلاقة، ثمّ التعويض، ثمّ النتيجة:

$$Q' = \frac{V}{\Delta t} = \frac{0.9}{500}$$

$$Q' = 1.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

3. سرعة التدفق من $Q' = s v$:

$$v = \frac{Q'}{s} = \frac{1.8 \times 10^{-3}}{6 \times 10^{-4}}$$

$$v = 3 \text{ m.s}^{-1}$$

4. بعد تضيق الفتحة يصبح المقطع $s_2 = \frac{s}{3}$ ، ونفرض كما في هذه المسائل أنّ معدّل التدفق الحجمي لا يتغيّر، فمن معادلة الاستمراريّة:

$$s v = \frac{s}{3} v_2$$

$$v_2 = 3v = 9 \text{ m.s}^{-1}$$

5. معدّل التدفق الكتليّ بالعلاقة $Q = \rho Q'$ ، أو بكتلة الماء $m = \rho V = 900 \text{ kg}$ مقسومةً على الزمن:

$$Q = 1000 \times 1.8 \times 10^{-3}$$

$$Q = 1.8 \text{ kg.s}^{-1}$$

إذا بقي معدّل التدفق الحجمي نفسه بعد التضيق، كما نفرض في هذه المسائل، تغيّرت السرعة عكس المقطع:

$$Q' = s_1 v_1 = s_2 v_2$$

وتطلب الامتحانات أيضاً تفسيراً بالعلاقات، لا حساباً فقط، كما في الدورة الأولى 2019:

خرطومٌ يملؤه الماء تماماً ولا يتجمّع فيه، وفي جداره ثقبٌ صغير. لماذا يندفع الماء من الثقب بسرعة أكبر من سرعة خروجه من فتحة الخرطوم؟

| كيف أبدأ؟ قارن مساحة مقطع الثقب بمساحة مقطع فتحة الخرطوم، ثمّ تذكّر كيف تتغيّر السرعة مع المقطع.

(أ) معدّل التدفق الحجمي عبر الثقب أكبر منه عبر فتحة الخرطوم.

(ب) مساحة مقطع الثقب أصغر من مساحة مقطع فتحة الخرطوم، والسرعة تتناسب عكساً مع مساحة المقطع.

(ج) الكتلة الحجميّة للماء عند الثقب أصغر، فيتحرّك أسرع.

ب. نعم: من معادلة الاستمراريّة $s_1 v_1 = s_2 v_2$ ، فالمقطع الأصغر سرعته أكبر. وهذا ما يطلبه سلّم التصحيح بالترتيب:

العلاقة، ثمّ أنّ مقطع الثقب أصغر، ثمّ أنّ السرعة تتناسب عكساً مع المقطع.

المصدر: الفيزياء، الصفحات 39 إلى 43 من الطبعة الرسمية 2025 / 2026.