الكيمياء، البكالوريا، الفرع العلمي

بسيطة

السّرعة اللّحظيّة وقانون السّرعة ورتبة التّفاعل

السّرعة في لحظةٍ من ميل المماسّ، وقانون سرعة التّفاعل الأوّليّ، ورتبة التّفاعل من التّجارب، وحساب السّرعة بعد مزج محلولين حتّى توقّف التّفاعل.

حركيّة التّفاعلات الكيميائيّة . الوحدة 3 . الدرس 1 (3 من 3)

السّرعة الوسطيّة تصف فترةً زمنيّة، لكنّ التّفاعل يتباطأ عادةً مع تناقص تراكيز الموادّ المتفاعلة، فسرعته في لحظةٍ غيرها في اللّحظة الّتي تليها. في هذا الدّرس نقرأ السّرعة في لحظةٍ محدّدة من الرّسم البيانيّ، ثمّ نحسبها من قانون سرعة التّفاعل، ونستنتج رتبة التّفاعل من نتائج التّجارب. وهذا الحساب هو ما تطلبه مسائل الامتحان.

حساب السّرعة اللّحظيّة بيانيّاً

نشاط (12)، الكتاب، الصّفحة 47: يتفاعل كلورو البوتان مع الماء وفق المعادلة

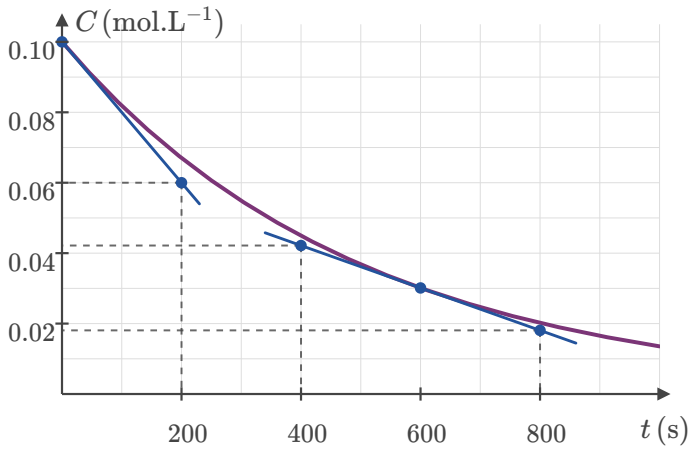
$$\mathrm{C_4H_9Cl_{(aq)} + H_2O_{(l)} \longrightarrow C_4H_9OH_{(aq)} + HCl_{(aq)}}$$

ويبيّن الجدول تركيز كلورو البوتان خلال لحظاتٍ محدّدة من زمن سير التّفاعل:

$t\,(\mathrm{s})$	$[\mathrm{C_4H_9Cl}]\,(\mathrm{mol.L^{-1}})$
0	0.10
100	0.08
200	0.06
300	0.05
400	0.04
500	0.03
800	0.02
1000	0

تركيز كلورو البوتان بدلالة الزّمن. الكتاب، الصّفحة 47.

نرسم منحني تغيّر التّركيز بدلالة الزّمن، ونرسم المماسّ للمنحني في اللّحظتين $t = 0$ و $t = 600\,\mathrm{s}$:



تركيز كلورو البوتان بدلالة الزّمن، والمماسّ في اللّحظتين. الكتاب، الصّفحة 47. الرّسم من عندنا كما في الكتاب.

نقاط الجدول لا تقع تماماً على المنحني المرسوم في الكتاب: يمرّ المنحني مثلاً بالقيمة 0.067 عند $200\,\text{s}$ ، والجدول يذكر 0.06 . رسمنا المنحني كما في الكتاب، فمنه يُقرأ المماسّ عند $600\,\text{s}$. وعلى محور الكتاب طُبع 0.970 ، والمقصود 0.070 .

الكتاب، الصّفحة 47: احسب ميل المماسّ عند كلٍّ من اللّحظتين $t = 0$ و $t = 600\,\text{s}$.

$$v(0),\ v(600) = ?$$

1. الميل عند بداية التّفاعل يمرّ المماسّ بالنّقطتين $(0;\ 0.100)$ و $(200;\ 0.060)$:

$$\frac{0.060 - 0.100}{200 - 0}$$
$$= -2 \times 10^{-4}\,\text{mol.L}^{-1}.\text{s}^{-1}$$

2. الميل في اللّحظة $600\,\text{s}$ نقرأ من الرّسم نقطتين على المماسّ كما في الكتاب، $(400;\ 0.042)$ و $(800;\ 0.017)$:

$$\frac{0.017 - 0.042}{800 - 400}$$
$$= -6.3 \times 10^{-5}\,\text{mol.L}^{-1}.\text{s}^{-1}$$

3. السّرعة اللّحظيّة كلورو البوتان مادّةٌ متفاعلة، فالسّرعة عكس إشارة الميل:

$$v(0) = 2 \times 10^{-4}\,\text{mol.L}^{-1}.\text{s}^{-1}$$
$$v(600) = 6.3 \times 10^{-5}\,\text{mol.L}^{-1}.\text{s}^{-1}$$

تمثّل قيمة ميل المماسّ عند لحظةٍ محدّدة قيمة السّرعة اللّحظيّة للتّفاعل، الكتاب، الصّفحة 47، وتتناقص السّرعة مع الزّمن:

$$v(600) < v(0)$$

القراءة من الرّسم تقريبيّة: على المماسّ في رسمنا نقرأ 0.018 عند $800\,\mathrm{s}$ ، فيخرج الميل $-6.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{mol.L^{-1}.s^{-1}}$. والفرق من دقّة القراءة لا من طريقة الحلّ.

إضاءة

$v = -\dfrac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t}$ للموادّ المتفاعلة. لحساب السّرعة اللّحظيّة يقاس تغيّر التّركيز خلال أزمنةٍ صغيرةٍ جدّاً.

$v = +\dfrac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t}$ للموادّ النّاتجة.

الكتاب، الصفحة 47

ميل المماسّ لمنحني تركيز مادّةٍ متفاعلة في لحظةٍ ما يساوي $-4 \times 10^{-5}\,\mathrm{mol.L^{-1}.s^{-1}}$. السّرعة اللّحظيّة في هذه اللّحظة:

أ) $-4 \times 10^{-5}\,\mathrm{mol.L^{-1}.s^{-1}}$

ب) $4 \times 10^{-5}\,\mathrm{mol.L^{-1}.s^{-1}}$

ج) لا تُعرف من دون جدول القيم

ب. نعم: للمادّة المتفاعلة السّرعة عكس إشارة الميل.

قانون سرعة التّفاعل اللّحظيّة

حساب السّرعة اللّحظيّة رياضيّاً، الكتاب، الصّفحة 48: يحدث عند درجة حرارةٍ ثابتة تفاعلٌ كيميائيّ تتفاعل فيه m مولات من A مع n مولات من B :

$$m\,\mathrm{A_{(g)}} + n\,\mathrm{B_{(g)}} \longrightarrow \dots$$

في التّفاعل الأوّليّ تتناسب سرعة التّفاعل اللّحظيّة طرداً مع جداء تراكيز الموادّ المتفاعلة، مرفوعاً كلٌّ منها لأسٍّ يساوي عدد الأمثال التّفاعليّة، أي عدد المولات:

$$v = k\,[\mathrm{A}]^{m}\,[\mathrm{B}]^{n}$$

حيث $[\mathrm{A}]$ و $[\mathrm{B}]$ تراكيز الموادّ المتفاعلة وواحدتها $\mathrm{mol.L^{-1}}$ ، و v سرعة التّفاعل اللّحظيّة وواحدتها $\mathrm{mol.L^{-1}.s^{-1}}$ ، و k ثابت سرعة التّفاعل، وتتعلّق قيمته بطبيعة الموادّ المتفاعلة ودرجة الحرارة. يكتب الكتاب وسلّم التّصحيح k دون واحدة، وواحدته تتغيّر حسب رتبة التّفاعل.

تطبيق (1): عبارة السّرعة لتفاعلاتٍ أوّليّة

$\mathrm{C_4H_9Cl_{(aq)} + H_2O_{(l)} \longrightarrow \dots}$ $v = k[\mathrm{C_4H_9Cl}]$ لا يدخل تركيز الماء، لأنّه المحلّ وتركيزه ثابت.

$\mathrm{CaCO_{3\,(s)} + 2\,HCl_{(aq)} \longrightarrow \dots}$ $v = k[\mathrm{HCl}]^2$ تُستبعد كربونات الكالسيوم لأنّها صلبةٌ تركيزها ثابت، والأسّ 2 لأنّ عدد الأمثال التّفاعليّة لحمض كلور الماء 2.

$\mathrm{2\,SO_{2\,(g)} + O_{2\,(g)} \longrightarrow 2\,SO_{3\,(g)}}$ $v = k[\mathrm{SO_2}]^2[\mathrm{O_2}]$ ثنائي أكسيد الكبريت والأكسجين كلاهما غاز، وتتعلّق السّرعة بتغيّر تركيزيهما.

$\mathrm{C_{(s)} + 2\,S_{(s)} \longrightarrow CS_{2\,(l)}}$ $v = k$ تفاعلٌ من الرّتبة صفر، لا تتعلّق سرعته بتركيز الكربون ولا الكبريت، فهما مادّتان صلبتان.

الكتاب، الصفحة 48

انتبه: لا يدخل في قانون السّرعة تركيز مادّةٍ صلبة، ولا تركيز الماء حين يكون المحلّ، لأنّ تركيز كلٍّ منهما ثابت.

يعدّ الكتاب تفاعل كربونات الكالسيوم مع حمض كلور الماء أوّليّاً، فيأخذ الأسّ من المعادلة. أمّا في التّفاعل غير الأوّليّ فلا تُؤخذ الأسس من المعادلة، بل من التّجارب، كما في الفقرة التّالية.

تذكّر: جاء في امتحان دورة 2026 تفاعلٌ أوّليّ $\mathrm{2\,A_{(g)} + B_{(g)} \longrightarrow 2\,C_{(g)}}$ ، ونالت كتابة قانونه $v = k[\mathrm{A}]^2[\mathrm{B}]$ وحدها 6 درجاتٍ في سلّم التّصحيح.

قانون سرعة التّفاعل الأوّليّ $\mathrm{2\,NO_{(g)} + O_{2\,(g)} \longrightarrow 2\,NO_{2\,(g)}}$:

أ) $v = k[\mathrm{NO}]^2[\mathrm{O_2}]$

ب) $v = k[\mathrm{NO}][\mathrm{O_2}]$

ج) $v = k[\mathrm{NO_2}]^2$

أ. نعم: في التّفاعل الأوّليّ يُرفع كلّ تركيزٍ لأسٍّ يساوي عدد مولاته في المعادلة.

رتبة التّفاعل

نشاط (13)، الكتاب، الصّفحة 49: يحدث التّفاعل $\mathrm{A + B \longrightarrow C}$ في شروطٍ مناسبة، وقيست السّرعة الابتدائيّة لهذا التّفاعل بدلالة تراكيز الموادّ المتفاعلة:

	$[\mathrm{A}]$	$[\mathrm{B}]$	v
1	0.1	0.1	4.0×10^{-5}

	$[\mathrm{A}]$	$[\mathrm{B}]$	v
2	0.1	0.2	4.0×10^{-5}
3	0.2	0.1	16.0×10^{-5}

في العمود الأوّل رقم التّجربة. الكتاب، الصّفحة 49.

الكتاب، الصّفحة 49: بفرض $v = k[\mathrm{A}]^x[\mathrm{B}]^y$ ، استنتج قيمة كلٍّ من x و y ، واكتب عبارة سرعة التّفاعل اللّحظيّة واستنتج رتبته، ثمّ احسب ثابت سرعة التّفاعل.

$$x,\ y,\ k = ?$$

1. نعوّض قيم التّجارب الثّلاث في كلّ تجربةٍ معادلة:

$$(1)\quad 4 \times 10^{-5} = k\,[0.1]^x\,[0.1]^y$$
$$(2)\quad 4 \times 10^{-5} = k\,[0.1]^x\,[0.2]^y$$
$$(3)\quad 16 \times 10^{-5} = k\,[0.2]^x\,[0.1]^y$$

2. نقسم (1) على (2) لا يتغيّر بينهما إلّا تركيز B ، فيُختصر الباقي:

$$\frac{4 \times 10^{-5}}{4 \times 10^{-5}} = \frac{[0.1]^y}{[0.2]^y}$$
$$\Rightarrow [0.2]^y = [0.1]^y \Rightarrow y = 0$$

3. نقسم (3) على (1) لا يتغيّر بينهما إلّا تركيز A :

$$\frac{16 \times 10^{-5}}{4 \times 10^{-5}} = \frac{[0.2]^x}{[0.1]^x}$$
$$\Rightarrow 4 = 2^x \Rightarrow x = 2$$

4. عبارة السّرعة والرّتبة مجموع الأسس $x + y = 2 + 0 = 2$ ، فالتّفاعل من الرّتبة الثّانية:

$$v = k[\mathrm{A}]^2[\mathrm{B}]^0 \Rightarrow v = k[\mathrm{A}]^2$$

5. ثابت سرعة التّفاعل من قيم التّجربة الأولى:

$$4 \times 10^{-5} = k\,[0.1]^2$$
$$\Rightarrow k = \frac{4 \times 10^{-5}}{10^{-2}} = 4 \times 10^{-3}$$

نقسم تجربتين لا يتغيّر بينهما إلّا تركيز مادّةٍ واحدة، فيبقى أسّها وحده في المعادلة:

$$\frac{v_3}{v_1} = \left(\frac{[\mathrm{A}]_3}{[\mathrm{A}]_1}\right)^x$$

تذكّر: التّفاعلات الأوّليّة: تفاعلاتٌ تتوافق فيها عبارة السّرعة اللّحظيّة مع معادلة التّفاعل المعطاة. والتّفاعلات غير الأوّليّة: تفاعلاتٌ تتمّ على عدّة مراحل لا تتوافق فيها عبارة السّرعة اللّحظيّة مع معادلة التّفاعل، وتُعطى عبارة السّرعة للمرحلة الأبطأ. ورتبة التّفاعل: مجموع أسس تراكيز الموادّ المتفاعلة في عبارة سرعة التّفاعل. الكتاب، الصّفحة 49.

انتبه: في نشاط (13) المعادلة $\mathrm{A} + \mathrm{B} \longrightarrow \mathrm{C}$ ، لكنّ عبارة السّرعة $v = k[\mathrm{A}]^2$ لا $v = k[\mathrm{A}][\mathrm{B}]$: التّفاعل غير أوّليّ، فالأسس من التّجارب لا من المعادلة.

تذكّر: جاء في الدّورة الأولى 2022 مسألةٌ بالبناء نفسه: ثلاث تجارب، ثمّ عبارة السّرعة والرّتبة، ثمّ ثابت السّرعة. وفي سلّم التّصحيح: لا تُقبل العلاقة عند إغفال x أو y ، ويُقبل ذكر الرّتبة الثّانية بدل $x + y = 2$ ، و k دون واحدة.

في تجربتين بقي $[\mathrm{A}]$ ثابتاً وصار $[\mathrm{B}]$ مثلي ما كان عليه، فازدادت السّرعة أربع مرّات. أسّ $[\mathrm{B}]$ في عبارة السّرعة:

أ) $y = 4$

ب) $y = 1$

ج) $y = 2$

ج. نعم: $2^y = 4$ ، أي $y = 2$.

رتب التّفاعلات

توجد تفاعلاتٌ من الرّتبة صفر والأولى والثّانية والثّالثة، والجدول يمثّل رتب التّفاعلات اعتماداً على عبارة سرعة التّفاعل، الكتاب، الصّفحة 50:

	v
0	k
1	$k[\mathrm{A}]$
2	$k[\mathrm{A}]^2$
2	$k[\mathrm{A}][\mathrm{B}]$

	v
3	$k[\mathrm{A}]^3$
3	$k[\mathrm{A}]^2[\mathrm{B}]$
3	$k[\mathrm{A}][\mathrm{B}]^2$
3	$k[\mathrm{A}][\mathrm{B}][\mathrm{C}]$

في العمود الأوّل رتبة التّفاعل، وفي الثّاني عبارة سرعته. الكتاب، الصّفحة 50.

تذكّر: سرعة التّفاعل في التّفاعلات ذات الرّتبة صفر تتحدّد بمجموعةٍ من العوامل، منها مساحة سطح التّماس أو الحفّاز. الكتاب، الصّفحة 50.

انتبه: رتبة التّفاعل مجموع الأسس كلّها، لا أسّ مادّةٍ واحدة: التّفاعل الّذي عبارة سرعته $v = k[\mathrm{A}][\mathrm{B}]^2$ من الرّتبة الثّالثة، لا الثّانية.

نشاط (14)، الكتاب، الصّفحة 50: يحدث التّفاعل الآتي في شروطٍ مناسبة

$$\mathrm{NO_{2\,(g)}} + \mathrm{CO_{(g)}} \longrightarrow \mathrm{NO_{(g)}} + \mathrm{CO_{2\,(g)}}$$

وكانت نتائج قياس السّرعة الابتدائيّة في عدّة تجارب، والتّراكيز بالواحدة $\mathrm{mol.L^{-1}}$ والسّرعة بالواحدة $\mathrm{mol.L^{-1}.s^{-1}}$:

	$[\mathrm{NO_2}]$	$[\mathrm{CO}]$	v
1	0.10	0.10	0.0021
2	0.20	0.10	0.0084
3	0.20	0.20	0.0084

في العمود الأوّل رقم التّجربة. الكتاب، الصّفحة 50.

لا يحلّ الكتاب هذا النّشاط، والحلّ من عندنا: اكتب عبارة سرعة التّفاعل اللّحظيّة واستنتج رتبته، ثمّ احسب قيمة ثابت سرعة التّفاعل.

$$v = k[\mathrm{NO_2}]^x[\mathrm{CO}]^y,\ k = ?$$

1. نقسم (3) على (2) يتضاعف تركيز CO وحده، ولا تتغيّر السّرعة:

$$\frac{0.0084}{0.0084} = \frac{[0.20]^{y}}{[0.10]^{y}}$$
$$\Rightarrow 1 = 2^{y} \Rightarrow y = 0$$

2. نقسم (2) على (1) يتضاعف تركيز $\mathrm{NO_2}$ وحده:

$$\frac{0.0084}{0.0021} = \frac{[0.20]^{x}}{[0.10]^{x}}$$
$$\Rightarrow 4 = 2^{x} \Rightarrow x = 2$$

3. عبارة السّرعة والرّتبة مجموع الأسس $2 + 0 = 2$ ، فالتّفاعل من الرّتبة الثّانية:

$$v = k[\mathrm{NO_2}]^{2}$$

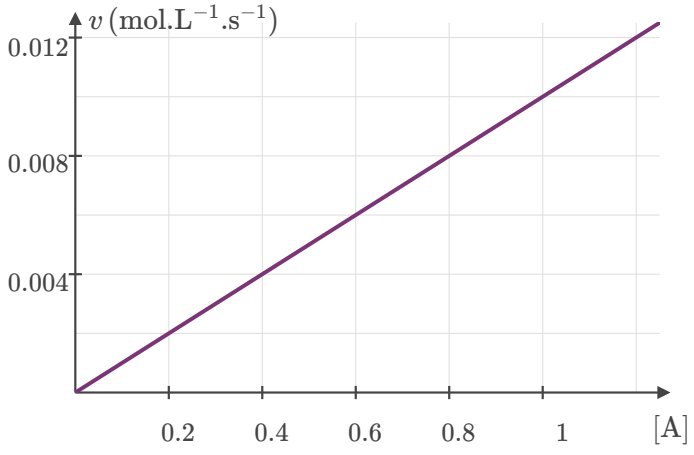
4. ثابت سرعة التّفاعل من قيم التّجربة الأولى:

$$k = \frac{0.0021}{[0.10]^{2}} = 0.21$$

لا يدخل CO في عبارة السّرعة مع أنّه مادّةٌ متفاعلة، فالتّفاعل غير أوّليّ:

$$v = k[\mathrm{NO_2}]^{2}, \quad k = 0.21$$

أختبر نفسي، الكتاب، الصّفحة 53: يبيّن الخطّ البيانيّ تغيّر سرعة التّفاعل بتغيّر تركيز المادّة A في تفاعلٍ تتحوّل فيه A إلى نواتج:



سرعة التّفاعل بدلالة تركيز A بالواحدة $\mathrm{mol.L^{-1}}$. الكتاب، الصّفحة 53. الرّسم من عندنا.

قانون سرعة التّفاعل اللّحظيّة وثابت سرعته:

أ) $v = k[\mathrm{A}]^2,\ k = 0.010$

ب) $v = k,\ k = 0.010$

ج) $v = k[\mathrm{A}],\ k = 0.010$

ج. نعم: التّفاعل من الرّتبة الأولى، و k ميل الخطّ: $k = \dfrac{0.010}{1} = 0.010$.

المزج وتغيّر السّرعة حتّى توقّف التّفاعل

في مسائل الامتحان يُمزج محلولان، فيكبر الحجم ويتغيّر تركيز كلّ مادّة. تركيز المادّة بعد المزج:

$$C' = \frac{C\,V}{V'}$$

حيث C و V تركيز المحلول وحجمه قبل المزج، و V' الحجم الكلّيّ بعد المزج.

مثالٌ من عندنا: يُمزج $100\,\mathrm{mL}$ من محلول المادّة A تركيزه $0.9\,\mathrm{mol.L^{-1}}$ مع $200\,\mathrm{mL}$ من محلول المادّة B تركيزه $0.6\,\mathrm{mol.L^{-1}}$ ، فيحدث التّفاعل الأوّليّ $\mathrm{A_{(aq)} + 2\,B_{(aq)} \longrightarrow C_{(aq)}}$ ، وثابت سرعته $k = 0.5$. احسب السّرعة الابتدائيّة، ثمّ السّرعة عندما يصبح $[\mathrm{C}] = 0.1\,\mathrm{mol.L^{-1}}$ ، ثمّ التّراكيز عند توقّف التّفاعل.

$$v_0,\ v,\ [\mathrm{A}],\ [\mathrm{B}],\ [\mathrm{C}] = ?$$

1. التّراكيز بعد المزج الحجم الكلّيّ $V' = 100 + 200 = 300\,\mathrm{mL}$:

$$[\mathrm{A}]_0 = \frac{0.9 \times 100}{300} = 0.3\,\mathrm{mol.L^{-1}}$$
$$[\mathrm{B}]_0 = \frac{0.6 \times 200}{300} = 0.4\,\mathrm{mol.L^{-1}}$$

2. السّرعة الابتدائيّة التّفاعل أوّليّ، فنأخذ الأسس من المعادلة:

$$v = k[\mathrm{A}][\mathrm{B}]^2$$
$$v_0 = 0.5 \times 0.3 \times (0.4)^2$$
$$= 2.4 \times 10^{-2}\,\mathrm{mol.L^{-1}.s^{-1}}$$

3. جدول التّراكيز يتفاعل من A مقدار x ، فيتفاعل من B مقدار $2x$ ويتشكّل من C مقدار x :

	$[\mathrm{A}]$	$[\mathrm{B}]$	$[\mathrm{C}]$
$t=0$	0.3	0.4	0
t	$0.3-x$	$0.4-2x$	x

4. السّرعة عندما يصبح $[\mathrm{C}]=0.1\,\mathrm{mol.L^{-1}}$ ، فالتّراكيز $x=0.1\,\mathrm{mol.L^{-1}}$ و $[\mathrm{A}]=0.2$ $[\mathrm{B}]=0.4-0.2=0.2\,\mathrm{mol.L^{-1}}$:

$$\begin{aligned} v &= 0.5\times 0.2\times (0.2)^2 \\ &= 4\times 10^{-3}\,\mathrm{mol.L^{-1}.s^{-1}} \end{aligned}$$

5. عند توقّف التّفاعل يتوقّف التّفاعل حين تنفد إحدى الموادّ المتفاعلة، فتصبح $v=0$. من $0.4-2x=0$ نجد $x=0.2$ ، ومن $0.3-x=0$ نجد $x=0.3$ ، فتنفد B أوّلاً:

$$\begin{aligned} x &= 0.2\,\mathrm{mol.L^{-1}} \\ [\mathrm{B}] &= 0 \\ [\mathrm{A}] &= 0.3-0.2=0.1\,\mathrm{mol.L^{-1}} \\ [\mathrm{C}] &= x = 0.2\,\mathrm{mol.L^{-1}} \end{aligned}$$

نحسب التّراكيز بعد المزج أوّلاً، ثمّ نكتب كلّ تركيزٍ بدلالة x حسب عدد مولاته في المعادلة. ويتوقّف التّفاعل حين تنفد المادّة الّتي تنفد أوّلاً:

$$C' = \frac{CV}{V'}$$

انتبه: 🚨 بعد المزج يتغيّر التّركيز. من يعوّض التّركيزين المعطيين مباشرةً تخرج له سرعةٌ ابتدائيّةٌ 0.162 بدل 0.024 ، أكبر بنحو سبع مرّات. وفي سلّم تصحيح الدّورة الثّانية 2022 يخسر الطّالب 9 درجاتٍ إذا عوّض التّراكيز المعطاة في نصّ المسألة.

في المثال، ما تركيز B عندما يصبح $[\mathrm{A}]=0.25\,\mathrm{mol.L^{-1}}$ ؟

أ) $[\mathrm{B}]=0.3\,\mathrm{mol.L^{-1}}$
ب) $[\mathrm{B}]=0.35\,\mathrm{mol.L^{-1}}$
ج) $[\mathrm{B}]=0.25\,\mathrm{mol.L^{-1}}$

أ. نعم: $x=0.3-0.25=0.05$ ، فينقص B بمقدار $2x=0.1$ ويبقى $0.3\,\mathrm{mol.L^{-1}}$.

المصدر: الكيمياء، الصفحات 47 إلى 50 من الطبعة الرسمية 2025 / 2026.