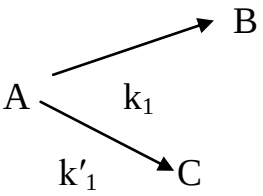
٣. التفاعلات المتوازية Parallel Reactions:

وهي أن المواد المتفاعلة تتفاعل أكثر من تفاعل واحد في نفس الوقت، وان ابسط حالة التفاعلات المتوازية هي عندما تكون جميعها من الدرجة الأولى وهي على نوعين :

النوع الأول:



or $A \xrightarrow{k_1} B \;\&\; A \xrightarrow{k'_1} C$.....51

معدل السرعة للتفاعلات تكون:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{-d[A]}{dt} = k_1[A] + k_1^{\cdot}[A] \quad \text{.....68}$$

$$\frac{d[B]}{dt} = k_1[A] \quad \text{.....69}$$

$$\frac{d[C]}{dt} = k_1^{\cdot}[A] \quad \text{.....70}$$

المعادلة ٦٨ تمثل تفكك المادة A بينما المعادلتين ٦٩&٧٠ تمثلان معادلتي تكوين Bو C على التوالي، ومن المعادلة ٦٨ عند الزمن t فان [A]=(a-x) وبإعادة الترتيب وإجراء الشروط الابتدائية عند التكامل:

$$\int_0^x \frac{dx}{(a-x)} = (k_1 + k_1^{\cdot}) \int_0^t dt \quad \text{.....71}$$

$$[A] = ae^{-(k_1+k_1^{\cdot})t} \quad \text{.....72}$$

بتعويض ٧٢ في ٦٩:

$$\frac{d[B]}{dt} = k_1 ae^{-(k_1+k_1^{\cdot})t} \quad \text{.....73}$$

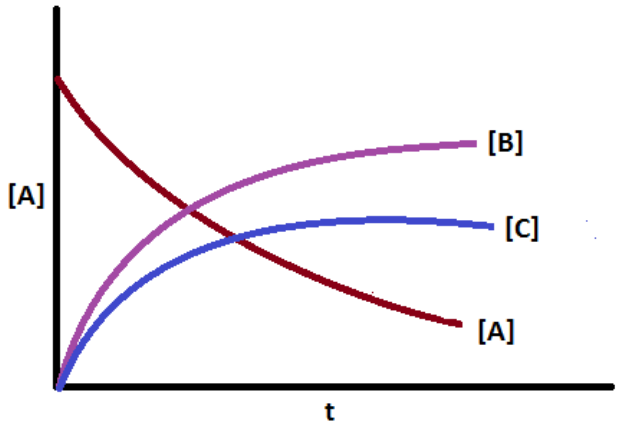
بإجراء التكامل مع إعادة الترتيب للمعادلة ٧٣:

$$[B] = \frac{k_1 a}{k_1+k_1^{\cdot}}(1 - e^{-(k_1+k_1^{\cdot})t}) \quad \text{.....74}$$

وبنفس الطريقة للمادة C تعوض ٧٢ في ٧٠ مع التكامل :

$$[C] = \frac{k_1^{\cdot} a}{k_1+k_1^{\cdot}}(1 - e^{-(k_1+k_1^{\cdot})t}) \quad \text{.....75}$$

وممكن تمثيل المعادلات المتوازية بالشكل ١٩:



شكل ١٩: التفاعلات المتوازية النوع الاول.

بقسمة المعادلة ٧٤ على ٧٥ :

$$\frac{[B]}{[C]} = \frac{k_1^{\cdot}}{k_1} \quad \text{.....76}$$

والمعادلة ٧٦ تمثل نسبة معينة لثوابت السرع بدلالة تراكيز المواد عند أية لحظة زمنية، وهي نسبة ثابتة يمكن الاعتماد عليها للتأكد من أن التفاعل يسلك سلوكا متوازيا. فإذا كان $k_1 \ll k'_1$ أو عندما يكون $k_1 \ll k_1'$ عندها يكون سير التفاعل باتجاه واحد وهو تكوين الناتج الأكثر احتمالا حسب العلاقة بين $k_1 \& k_1'$، لذا نطبق معادلة الدرجة الأولى مثلا :

$$\ln \frac{a}{a-b} = k_1 t \ \ when \ k_1 \gg k_1^{\cdot} \quad \text{.....77}$$

$$\ln \frac{a}{a-c} = k_1^{\cdot} t \ \ when \ k_1 \ll k_1^{\cdot} \quad \text{.....78}$$

من الأمثلة على هذا النوع من التفاعلات:

$$C_2H_5OH \begin{matrix} \nearrow^{C_2H_4 + H_2O \ at \ k_1} \\ \searrow_{CH_3OH + H_2 \ at \ k_1^{\cdot}} \end{matrix}$$

$$^{64}_{29}Cu \begin{matrix} \nearrow^{^{64}_{30}Zn + \beta^- \ (62\%) at \ k_1} \\ \searrow_{^{64}_{28}Ni + \beta^+ \ (38\%) at \ k_1^{\cdot}} \end{matrix}$$

النوع الثاني :

$$\begin{matrix} A \xrightarrow{k_1} \\ \\ B \xrightarrow{k_2} \end{matrix} C \quad or \quad A \xrightarrow{k_1} C \quad B \xrightarrow{k_1'} C \quad \text{.....52}$$

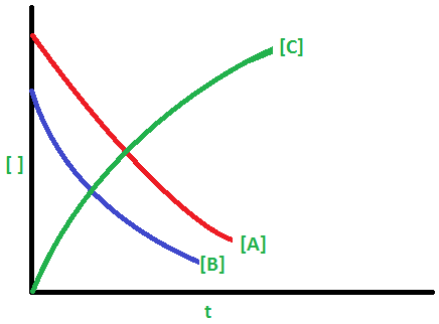
$$A \xrightarrow{k_1} C \qquad B \xrightarrow{k_2} C$$

at t=0	a	0	at t=0	b	0
at t=t	a-x	0	at t=t	b-y	0

$$\frac{dx}{dt} = k_1[A] \qquad \frac{dx}{dt} = k_2[B]$$

$$[A] = ae^{-k_1 t} \qquad [B] = be^{-k_2 t}$$

وممكن تمثيلها بالشكل ٢٠:



شكل ٢٠: التفاعلات المتوازية النوع الثاني.

$$[A] = a - x \rightarrow x = a - [A] \qquad [B] = b - y \rightarrow y = b - [B]$$

$$[C] = x + y \rightarrow [C] = a - [A] + b - [B] \rightarrow [C] = (a + b) + [A] - [B]$$

$$[C] = (a + b) - ae^{-k_1 t} - be^{-k_2 t} \quad \text{.....79}$$

مثال٥: تتفكك المادة A بتفاعل متوازي إلى B و C فإذا علمت أن التركيز الابتدائي للمادة A يساوي (0.20M) وان قيم k_1 و k_1' (3×10^{-4}&3×10^{-3}) احسب تراكيز A،B، C بعد مرور 20min.

مثال٦: تتفكك كلا من المادة A،B بتفاعل متوازي إلى C فإذا علمت أن التركيز الابتدائي للمادة A يساوي (0.05M) والمادة B (0.02M) وان قيم k_1 و k_2 () احسب تراكيز A،B، C بعد مرور 20min.

مثال٧: للتفاعل المتوازي التالي :

$$C_2H_5OH \begin{matrix} \nearrow^{C_2H_4 + H_2O \text{ at } k_1 \text{ in presence of } Cu} \\ \searrow_{CH_3OH + H_2 \text{ at } k_1' \text{ in presence of } Al_2O_3} \end{matrix}$$

اشتق المعادلات التي تكون لازمة لإيجاد تراكيز والايثانول والاسيتالديهايد الاثيلين بعد مرور زمن قدره t.

الحل:

١. نحسب معدل سرعة التفاعل بدلالة سرعة اختفاء والايثانول:

$$\frac{-d[C_2H_5OH]}{dt} = (k_1 + k_2)[C_2H_5OH] \quad \text{.....1}$$

$$\text{at t} = 0 \rightarrow [C_2H_5OH]_\circ, at\ t = t\ \rightarrow [C_2H_5OH] = a - x,$$

$$\int_0^x \frac{dx}{dt} = (k_1 + k_2)\int_0^t dt \rightarrow \ln\frac{a}{a-x} = (k_1 + k_2)t$$

$$[C_2H_5OH] = [C_2H_5OH]_\circ e^{-(k_1+k_2)t}$$

٢. للاستالديهايد:

$$\frac{-d[CH_3CHO]}{dt} = k_1[C_2H_5OH]_\circ e^{-(k_1+k_2)t} \quad \text{.....2}$$

بأجراء التكامل للمعادلة ٢ من t=0 إلى t=t

$$[CH_3CHO] = \frac{-k_1}{k_1 + k_2}[C_2H_5OH]_\circ e^{-(k_1+k_2)t} + Constant$$

وبتطبيق الشروط الابتدائية فان عندما t=0 فان تركيز الاستالديهايد يساوي صفر.

$$Constant = \frac{k_1}{k_1+k_2}[C_2H_5OH]_\circ \quad \text{.....3}$$

$$[CH_3CHO] = \frac{k_1}{k_1+k_2}[C_2H_5OH]_\circ(1 - e^{-(k_1+k_2)t}) \quad \text{.....4}$$

٣. لإيجاد تركيز الاثيلين:

$$\frac{[C_2H_4]}{dt} = k_2[C_2H_5OH] \quad \text{.....5}$$

وبنفس طريقة حساب الالديهايد نعوض المعادلة ٢ في ٥ونكمل الاشتقاق:

$$[C_2H_4] = \frac{k_1}{k_1+k_2}[C_2H_5OH]_\circ(1 - e^{-(k_1+k_2)t}) \quad \text{.....6}$$

٤. التفاعلات المتسلسلة وسلاسل الجذور الحرة Chain Reactions:

تمت دراسة التفاعل المتجانس بين الهيدروجين والبروم عند درجة حرارة C°(230-300) :

$H_2 + Br_2 \longrightarrow 2HBr$.....53

ومن المتوقع بان التفاعل من المرتبة الثانية بدلالة تكوين HBr أي:

$$\frac{d[HBr]}{dt} = k[H_2][\,Br_2]$$.....80

ولكن وجد عمليا بان التفاعل يتبع قانون المرتبة المعقد التالي:

$$\frac{d[HBr]}{dt} = \frac{2k[H_2][\,Br_2]^{\frac{1}{2}}}{\left\{\frac{1+[HBr]}{k'[\,Br_2]}\right\}}$$.....81

حيث يعتبر هذا التفاعل من التفاعلات المتسلسلة والتي هي عبارة عن سلسلة من التفاعلات المتوالية (التي لاتبدء إلا بتسليط الحرارة أو الضوء أو الإشعاع). وتتكون خلالها الجذور الحرة أو الذرات كمركبات وسطية ، لذلك تكون هذه التفاعلات معقدة ولاتخضع لقوانين السرعة البسيطة. حيث يلاحظ بان التفاعل أعلاه يخضع للميكانيكية التالية:

$Br_2 \xrightarrow{k_1} 2Br^{\cdot}$.....54

$H_2 + Br^{\cdot} \xrightarrow{k_2} HBr + H^{\cdot}$.....55

$H^{\cdot} + Br^{\cdot} \xrightarrow{k_3} HBr + Br^{\cdot}$.....56

$H^{\cdot} + HBr \xrightarrow{k_4} H_2 + Br^{\cdot}$.....57

$Br^{\cdot} + Br^{\cdot} \xrightarrow{K_5} Br_2$.....58

تمثل المعادلة ٥٤ خطوة البداية أما المعادلات ٥٥-٥٧ تمثل خطوات الانتشار ، والمعادلة ٥٨ تمثل خطوة النهاية. إن جميع التفاعلات المتسلسلة تشترك في الخطوات الرئيسية التالية:

أ- خطوات الشروع (البدء) Initiation Steps: وتتكون من خطوة واحدة في الغالب وأحيانا بأكثر من خطوة ، حيث تتفكك المواد المتفاعلة (الجزيئات المستقرة) وينتج عنها ذرات أو جذور حرة أولية (تسمى حامل السلسلة) وتتم هذه الخطوة بوجود العوامل المساعدة.

ب- خطوات الانتشار Propagation Steps:وتتكون من خطوتين أو أكثر ، حيث تتكون فيها ذرات أو جذور حرة أخرى نتيجة لتفاعل الجذور الاوليه مع المواد المتفاعلة، أو مع مواد أخرى في خليط التفاعل. أو تفككها إلى جذور أخرى.

ت- خطوات الانتهاء Termination Steps : ويتم فيها تكوين المواد المستقرة النهائية نتيجة لتفاعل الجذور الحرة مع نفسها أو مع جذور حرة أخرى . أي يحدث فيها اختفاء حوامل السلسلة وجميع المركبات الوسطية الأخرى أما عن طريق تفاعلها مع بعضها، أو يمكن التخلص منها بإضافة مواد تسمى المواد المانعة Inhibitorsأو المثبطة من اجل اختزال معدل سرعة التفاعل المتسلسل بتفاعل هذه المواد مع الذرات أو الجذور الحرة وتكوين مركبات مستقرة نهائية.

الخطوات لحساب معدل السرعة:

مثال٨ :للتفاعل التالي:

$$A + B \longrightarrow C + D$$

وجد بان ميكانيكية التفاعل وفق المعادلات التالية:

$A \xrightarrow{k_1} 2X$ (الشروع)

$X + B \xrightarrow{k_2} Y + C$

$Y + A \xrightarrow{k_3} X + D$

} خطوات الانتشار حيث X,Y مواد وسطية

$2X \xrightarrow{k_4} A$ الانتهاء

اثبت أن :

$$\frac{d[C]}{dt} = k_2(\frac{k_1}{k_4})^{\frac{1}{2}} A^{\frac{1}{2}}[B]$$

١. نعبر عن معدل سرعة التفاعل بدلالة معدل استهلاك المادة المتفاعلة بالخطوات المشاركة في الميكانيكية أو بدلالة النواتج المتكونة في خطوات الانتشار. وبما أن C موجود في المعادلة ٢ فقط:

$$\frac{d[C]}{dt} = k_2[X][B] \text{.....1}$$

٢. نكتب معدل سرعة التفاعل بدلالة تكوين المواد الوسطية:

$$\frac{d[X]}{dt} = 2k_1[A] - k_2[X][B] + k_3[Y][A] - 2k_4[X]^2 \text{.....2}$$

معادلة٤ معادلة٣ استهلاك٢ تكوين١

وبما أن Y مركب وسطي أيضا فمعدل تكوين Y يكون:

$$\frac{d[Y]}{dt} = k_2[X][B] - k_3[Y][B] \text{.....3}$$

استهلاك٣ تكوين معادلة ٢

٣. باستخدام طريقة الحالة المستقرة Steady State أو تدعى بفرضية حالة الاضطراد والتي تتلخص بالتالي"أن المركبات الوسطية الناتجة تكون فعالة جدا ولذلك تتفاعل بشدة بحيث إن تركيزها أثناء التفاعل يكون قليل جدا نسبة إلى تركيز المواد المتفاعلة والناتجة من التفاعل وعليه فان معدل سرعة تكوين المركبات الوسطية يساوي معدل سرعة اختفاؤها ".

إذن معدل التغيير في تركيز المركبات الوسطية مع الزمن = صفر، بتطبيق هذه الفرضية على جميع حوامل السلسلة "ذرات أو جذور حرة" (المركبات الوسطية المتكونة أثناء التفاعل). أي:

$$\frac{d[X]}{dt} = 0 \ \& \ \frac{d[Y]}{dt} = 0 \quad \text{.....4}$$

$$2k_1[A] - k_2[X][B] + k_3[Y][A] - 2k_4[X]^2 = 0 \quad \text{.....5}$$

$$k_2[X][B] - k_3[Y][B] = 0 \quad \text{.....6}$$

٤. نحل المعادلتين ٥و٦ آنيا بجمعهم جبريا وشطب الحدود ألمتشابهه والمختلفة بالإشارة فقط لحساب حالة الاضطراد حيث:

$$[X] = [X]_{ss} \ \& \ [Y] = [Y]_{ss} \quad \text{.....7}$$

ينتج عن حل المعادلتين أعلاه:

$$2k_1[A] - 2k_4[X]_{ss}{}^2 = 0 \quad \text{.....8}$$

$$[X]_{ss} = (\frac{k_1[A]}{k_4})^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....9}$$

$$[Y]_{ss} = \frac{k_2[B]}{k_3[A]}[X]_{ss} \quad \text{.....10}$$

٥. بالتعويض عن التراكيز المستخرجة للمركبات الوسطية (معادلة ٩ أو ١٠) في معادلة معدل سرعة التفاعل (المعادلة ١) يمكن الحصول على معدل سرعة التفاعل بدلالة تراكيز المواد المتفاعلة أو الناتجة في بعض الأحيان، إذن بالتعويض عن قيمة $[X]_{ss}$من المعادلة ٩ بالمعادلة ١:

$$\frac{d[C]}{dt} = k_2(\frac{k_1}{k_4})^{\frac{1}{2}} A^{\frac{1}{2}}[B]$$

وبنفس الطريقة ممكن حساب :

$$\frac{-d[A]}{dt}, \frac{-d[B]}{dt}, \frac{-d[D]}{dt}$$

حيث أن:

$$\frac{d[A]}{dt} = -2k_1[A] - k_3[Y][A] - 2k_4[X]^2$$

$$\frac{d[B]}{dt} = -k_2[X][B]$$

$$\frac{d[D]}{dt} = k_3[Y][A] \quad \text{بدلالة المادة دي} \quad \text{.....1}$$

$$\frac{d[X]}{dt} = 2k_1[A] - k_2[X][B] + k_3[Y][A] - 2k_4[X]^2 \quad \text{.....2}$$

$$\frac{d[Y]}{dt} = k_2[X][B] - k_3[Y][B] \quad \text{.....3}$$

$$\frac{d[X]}{dt} = 0 \;\&\; \frac{d[Y]}{dt} = 0 \quad \text{.....4}$$

$$2k_1[A] - k_2[X][B] + k_3[Y][A] - 2k_4[X]^2 = 0 \quad \text{.....5}$$

$$k_2[X][B] - k_3[Y][B] = 0 \quad \text{.....6}$$

$$2k_1[A] - 2k_4[X]^2 = 0 \quad \text{.....7}$$

$$[X]_{ss} = (\frac{k_1[A]}{k_4})^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....8}$$

$$[Y]_{ss} = \frac{k_2[B]}{k_3[A]}[X]_{ss} \quad \text{.....9}$$

$$\frac{d[D]}{dt} = k_3 \frac{k_2[B]}{k_3[A]}[X]_{ss}[A] \quad \text{.....10}$$

$$\frac{d[D]}{dt} = k_3 \frac{k_2[B]}{k_3[A]}(\frac{k_1[A]}{k_4})^{\frac{1}{2}}[A] \quad \text{.....11}$$

$$\frac{d[D]}{dt} = \frac{k_2 k_1[B][A]^{\frac{1}{2}}}{(k_4)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{.....12}$$

$$\frac{d[D]}{dt} = k'[B][A]^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....13}$$

$$\frac{-d[A]}{dt} = 2k_1[A] + k_3[Y][A] - 2k_4[X]^2 \quad \text{.....1}$$

$$[X]_{ss} = (\frac{k_1[A]}{k_4})^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....2}$$

$$[Y]_{ss} = \frac{k_2[B]}{k_3[A]}[X]_{ss} \quad \text{.....3}$$

$$\frac{-d[A]}{dt} = 2k_1[A] + k_3 \frac{k_2[B]}{k_3[A]}(\frac{k_1[A]}{k_4})^{\frac{1}{2}} - 2k_4[(\frac{k_1[A]}{k_4})^{\frac{1}{2}}]^2 \quad \text{.....4}$$

$\frac{-d[A]}{dt} = k'[[A]-[A] + [A]^{\frac{1}{2}}$.....5

$\frac{-d[A]}{dt} = k'[A]^{\frac{1}{2}}$.....6

$$\frac{-d[B]}{dt} = k_2[X][B] = k_2(\frac{k_1}{k_4})^{\frac{1}{2}}[A]^{\frac{1}{2}}[B] = k'[A]^{\frac{1}{2}}[B]$$

سلاسل الجذور الحرة: الجذور الحرة هي جزيئات فعالة ذات الكترونات منفردة، وغالبا أن الجزيئات العضوية ممكن أن تفكك لتعطي جذور حرة عند الدرجات الحرارية العالية، هذه الجذور الحرة تكون حاملات السلسلة.

مثال٩: التفكك الحراري للاستالديهايد وجد انه يجري وفقا للخطوات التالية:

$CH_3CHO \xrightarrow{k_1} {}^{\cdot}CH_3 + {}^{\cdot}CHO$ (Initiation) 1

$CH_3CHO + {}^{\cdot}CH_3 \xrightarrow{k_2} CH_4 + {}^{\cdot}CH_3CO$ (Propagation).....2

${}^{\cdot}CH_3CO \xrightarrow{k_3} CO + {}^{\cdot}CH_3$ 3a

$2{}^{\cdot}CH_3 \xrightarrow{k_4} C_2H_6$ 4b

اكتب معادلة سرعة التفاعل بدلالة تكوين الميثان:

الحل:

$\frac{d[C_2H_4]}{dt} = k_2[CH_3^{\cdot}][CH_3CHO]$.....1

$\frac{d[CH_3^{\cdot}]}{dt} = k_1[CH_3CHO] - k_2[CH_3^{\cdot}][CH_3CHO] + k_3[CH_3^{\cdot}CO] - 2k_4[CH_3^{\cdot}]^2$.....2

$\frac{d[CH_3^{\cdot}CO]}{dt} = k_2[CH_3^{\cdot}][CH_3CHO] - k_3[CH_3^{\cdot}CO]$.....3

$[CH_3^{\cdot}CO] = [CH_3^{\cdot}CO]_{ss}$ & $[CH_3^{\cdot}] = [CH_3^{\cdot}]_{ss}$.....4

$\frac{d[CH_3^{\cdot}]}{dt} = 0$ & $\frac{d[CH_3^{\cdot}CO]}{dt} = 0$.....5

$k_1[CH_3CHO] - k_2[CH_3^{\cdot}][CH_3CHO] + k_3[CH_3^{\cdot}CO] - 2k_4[CH_3^{\cdot}]^2 = 0$

$k_2[CH_3^{\cdot}][CH_3CHO] - k_3[CH_3^{\cdot}CO] = 0$

$k_1[CH_3CHO] - 2k_4[CH_3^{\cdot}]^2 = 0$.....6

$$[CH_3^{\cdot}] = \sqrt[2]{\frac{k_1}{2k_4}}\sqrt[2]{[CH_3CHO]} \quad \text{.....7}$$

$$\frac{d[C_2H_4]}{dt} = k_2[CH_3CHO]\sqrt[2]{\frac{k_1}{2k_4}}\sqrt[2]{[CH_3CHO]} \quad \text{.....8}$$

$$\frac{d[C_2H_4]}{dt} = k^{\cdot\cdot}([CH_3CHO])^{\frac{3}{2}} \quad \text{.....9}$$

سؤال:اكتب معادلة سرعة التفاعل أعلاه بدلالة [CO] و [CH_3CHO]

الجواب:

$$\frac{d[CH_3CHO]}{dt} = k_1[CH_3CHO] + k_2([CH_3CHO])^{\frac{3}{2}}\sqrt[2]{\frac{k_1}{2k_4}}$$

$$\frac{d[CO]}{dt} = k_2\sqrt[2]{\frac{k_1}{2k_4}}([CH_3CHO])^{\frac{3}{2}}$$

مثال١٠: تتفكك جزيئة غاز الأوزون حسب الميكانيكية التالية:

$$O_3 \rightleftharpoons_{k_{-1}}^{k_1} O_2 + O^{\cdot}$$

$$O_3 + O^{\cdot} \rightarrow^{k_2} 2O_2$$

اكتب معادلة لحساب معدل سرعة تفكك المواد المتفاعلة:

الحل: بتطبيق حالة الاطراد (الحالة ألمستقره) على تركيز ذرات الأوكسجين المتكونة نحصل على:

$$\frac{d[O]}{dt} = 0 = k_1[O_3] - k_{-1}[O_2][O] - k_2[O_3][O]$$

$$[O] = \frac{k_1[O_3]}{k_{-1}[O_2] + k_2[O_3]}$$

معادلة حساب سرعة التفاعل بدلالة تفكك المادة المتفاعلة [O_3]

$$\frac{-d[O_3]}{dt} = k_1[O_3] - k_{-1}[O_2][O] + k_2[O_3][O] \quad \text{.....1}$$

$$\frac{-d[O]}{dt} = k_1[O_3] - (k_{-1}[O_2] - k_2[O_3])[O] \quad \text{.....2}$$

بالتعويض عن قيمة [O] في المعادلة ٢

$$\frac{-d[O_3]}{dt} = k_1[O_3] - (k_{-1}[O_2] + k_2[O_3]) \times \frac{k_1[O_3]}{k_{-1}[O_2]+k_2[O_3]} \quad \text{.....3}$$

$$\frac{-d[O_3]}{dt} = \frac{k_1 k_{-1}[O_2][O_3]+k_{1k_2}[O_3]^2-k_1 k_{-1}[O_2][O_3]+k_1 k_{-1}[O_3]^2}{k_{-1}[O_2]+k_2[O_3]} \quad \text{.....4}$$

$$\frac{-d[O_3]}{dt} = \frac{2k_1k_2[O_3]^2}{k_{-1}[O_2]+k_2[O_3]} \quad \text{.....5}$$

س: تتفكك جزيئة غاز الأوزون حسب الميكانيكية التالية:

$$O_3 \rightleftharpoons_{k_{-1}}^{k_1} O_2 + O\cdot$$

$$O_3 + O\cdot \rightarrow^{k_2} 2O_2$$

اثبت بان :

$$\frac{-d[O_3]}{dt} = \frac{2k_1k_2[O_3]^2}{k_{-1}[O_2] + k_2[O_3]}$$

س: تتفكك جزيئة غاز الأوزون حسب الميكانيكية التالية:

$$O_3 \rightleftharpoons_{k_{-1}}^{k_1} O_2 + O\cdot$$

$$O_3 + O\cdot \rightarrow^{k_2} 2O_2$$

وجد بان هذا التفاعل تقريبا من الدرجة الثانية نسبة إلى الأوزون ودرجة (1-) نسبة إلى الأوكسجين ،اكتب علاقة تربط بين التركيز وثابت معدل السرعة تتطابق مع هذه الحقيقة.