محاضرات مادة الفيزياء (1)

لطلاب السنة الأولى
(معلوماتية- ميكاترونيكس- عمارة)

أ.د. محي الدين حامد نظام
أ.م.د. عصام محمد غزولين

2026-2025م

المحاضرة السابعة

الطاقة الكهربائية

1. مُقدمة

تُعرّف الطاقة الكامنة الكهربائية (أو طاقة الموضـــع الكهربائية) (Electrical Potential Energy) بأنّها الطاقة الكهربائية المُختزّنة في مجموعة من الشحنات الكهربائية نتيجة لمواقعها بالنسبة لبعضها البعض وتأثير الحقل الكهربائي الموجودة فيه. يُرمز للطاقة الكامنة الكهربائية اختصاراً بالرمز PE وتُقاس بواحدة الجول (J) في جملة الوحدات الدولية (SI)، وتُعرف بأنّها العمل المبذول لتقريب أو إبعاد الشحنات ضد قوى كولون التجاذبية أو التنافرية. تزداد الطاقة الكامنة الكهربائية عند تقريب شحنات كهربائية مُتشابهة، وتكون سالبة عندما تكون الشحنات الكهربائية مُتعاكسة، وتتناسب تناسباً طردياً مع مقدار الشحنات الكهربائية وتناسباً عكسياً مع المسافة الفاصلة بينها.

2. العمل والطاقة الكامنة الكهربائية

Work and Electrical Potential Energy

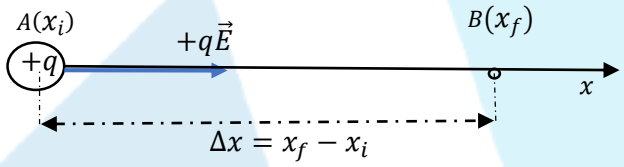
إنّ العمل الناتج عن قوة مُحافظة، وقوة كولون $\vec{F}$ هي قوة مُحافظة، لا يتعلّق بالمســـار المســـلوك ولكنه يتعلّق فقط بنقطة بدايته ونقطة نهايته. يُساوي مقدار تغير الطاقة الكامنة الكهربائية القيمة السالبة للعمل المبذول من قبل القوة المُحافظة:

$$\Delta PE = PE_f - PE_i = -W_F \quad (1)$$

تتأثر الشـــحنة الكهربائية q عندما تنتقل من النقطة A إلى النقطة B تحت تأثير الحقل الكهربائي $\vec{E}$، الذي يتجه وفق المحور ox، بقوة كولون $F_x = qE_x$. ويكون العمل المبذول لنقل الشحنة الكهربائية q من النقطة A إلى النقطة B ناتج مضروب قوة كولون في مقدار انتقالها، الشكل (1):

$$W = F_x \cdot \Delta x = q \cdot E_x \cdot (x_f - x_i) = \Delta KE \quad (2)$$

حيث يُمثل ΔKE مقدار تغير الطاقة الحركية.



الشكل (1)

ويكون مقدار تغير الطاقة الكامنة الكهربائية:

$$\Delta(PE) = -W_F = -q \cdot E_x \cdot (x_f - x_i) \quad (3)$$

يختلف معنى الطاقة الكامنة الكهربائية عن الطاقة الكامنة التجاذبية حيث أنّه يُوجد نوعين من الشحنات الكهربائية؛ موجبة وسالبة، على حين يُوجد نوع واحد من الكتل. وينتج من مبدأ انحفاظ الطاقة الكلّية تحولها إلى عمل:

$$W = \Delta(KE) + \Delta(PE)_{el} = \frac{1}{2}\, m \cdot v^2 + q \cdot E \cdot d \quad (4)$$

حيث تُمثل m كتلة الشحنة q وتُمثل v سرعتها عند وصولها إلى النقطة B وتُمثل d المسافة الفاصلة بين النقطة A والنقطة B.

مثال (1):

تحرّك بروتون، إحداثياته $x_i = -2(cm)$، من وضع السكون في حقل كهربائي مُنتظم $E = 1.5 \times 10^{+3}\ (N/C)$ اتجاهه وفق المحور ox.

1- أحسب التغيّر في طاقته الكامنة الكهربائية عند وصوله إلى الإحداثية $x_f = +5(cm)$.

2- أحسب التغيّر في الطاقة الكامنة الكهربائية لإلكترون ينطلق من الموضع والاتجاه نفسه للبروتون عند وصوله إلى الإحداثية $x_f = +12(cm)$.

3- أحسب التغيّر في الطاقة الكامنة الكهربائية لإلكترون ينطلق من الإحداثية $x_i = +3(cm)$ ليصل إلى الإحداثية $x_f = +7(cm)$ وذلك بفرض أنّ اتجاه الحقل الكهربائي المُنتظم أصبح مُعاكساً لاتجاه المحور ox.

الحل:

1. $\Delta(PE) = -W_F = -q \cdot E_x \cdot (x_f - x_i) \Rightarrow$
   $\Delta(PE) = -(+1.6 \times 10^{-19})(+1.5 \times 10^{+3})\big(0.05 - (-0.02)\big) = -1.68 \times 10^{-17}(J)$
2. $\Delta(PE) = -(-1.6 \times 10^{-19})(+1.5 \times 10^{+3})\big(0.07 - (-0.02)\big)$
   $= +3.38 \times 10^{-17}(J)$
3. $\Delta(PE) = -(-1.6 \times 10^{-19})(-1.5 \times 10^{+3})(0.07 - 0.03)$
   $= -9.60 \times 10^{-18}(J)$

يخسر البروتون من طاقته الكامنة الكهربائية بينما يكسب الإلكترون من طاقته الكامنة الكهربائية في الحالة الأولى ويخسر الإلكترون من طاقته الكامنة الكهربائية في الحالة الثانية.

3. الكمون الكهربائي Electric Potential

يرتبط مفهوم الطاقة الكامنة الكهربائية مع مفهوم الكمون الكهربائي (Electrical Potential) ارتباط وثيقاً والكمون الكهربائي واحدته الفولت (Volt)، ويُرمز لها اختصاراً بالرمز (V). أُطلق اسم الفولت على واحدة فرق الكمون الكهربائي تكريماً للفيزيائي الإيطالي فولتا (Alessandro Volta, 1745-1827)، والفولت هو واحدة فرق الكمون الكهربائي في جملة الوحدات الدولية (SI) ويُعرّف بأنّه مقدار الطاقة الكهربائية الكامنة التي تملكها شحنة كهربائية مقدارها كولون واحد عند نقطة مُعينة في حقل كهربائي. ويُمثّل الكمون الكهربائي مقياساً لقدرة الشحنات الكهربائية على الحركة، حيث تنتقل الشحنات الكهربائية من الكمون الأعلى إلى الكمون الأقل، وهو مقدار قياسي يسهل التعامل معه.

$$\Delta(PE) = q \cdot \Delta U = -q \cdot E \cdot \Delta x \Rightarrow E = -\frac{\Delta U}{\Delta x} \quad (5)$$

$$\Rightarrow [E] = \frac{[\Delta U]}{[\Delta x]} = \frac{V}{m} = \frac{N}{C}$$

نُلاحظ أنّ واحدة الحقل الكهربائي تُساوي أيضاً الفولت على المتر.

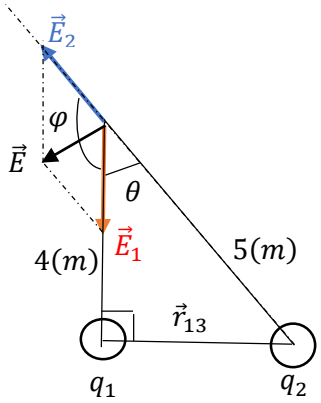
تُولّد الشحنة الكهربائية النقطية q في أيّ نقطة من الفضاء المحيط بها وتبعد عنها مسافة r كموناً كهربائياً، وهو مقدار سُلّمي، يُعطى بالعلاقة التالية:

$$U = 9 \times 10^{+9} \frac{q}{r} \qquad (6)$$

مثال (2):

بفرض أنّه لدينا شحنتين كهربائيتين نقطيتين $q_1 = -16(\mu C)$ و $q_2 = +25(\mu C)$ موضوعة على رأسي مُثلث قائم الزاوية طول ضلعه القائمة $4(m)$ وطول وتره $5(m)$، الشكل (2)..

1) أحسب الكمون الكهربائي الناتج عن الشحنتين الكهربائيتين النقطيتين في الرأس الثالثة.
2) أحسب الحقل الكهربائي الناتج عن الشحنتين الكهربائيتين النقطيتين في الرأس الثالثة.



الشكل (2)

الحل:

1) $U = U_1 + U_2 = 9 \times 10^{+9} \frac{q_1}{r_1} + 9 \times 10^{+9} \frac{q_2}{r_2} \Rightarrow$

$$U = 9 \times 10^{+9} \frac{(-16 \times 10^{-6})}{4} + 9 \times 10^{+9} \frac{(+25 \times 10^{-6})}{5} = 9 \times 10^{+3}(V)$$

2) $E_1 = 9 \times 10^{+9} \frac{q_1}{r_1^2} = 9 \times 10^{+9} \frac{16 \times 10^{-6}}{4^2} = 9 \times 10^{+3}(V/m)$

مُقترب من الشحنة q_1

$$E_2 = 9 \times 10^{+9} \frac{q_2}{r_2^2} = 9 \times 10^{+9} \frac{25 \times 10^{-6}}{5^2} = 9 \times 10^{+3}(V/m)$$

مُبتعد عن الشحنة q_2

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 \times E_1 \times E_1 \times \cos\varphi \Rightarrow$$
$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 - 2 \times E_1 \times E_1 \times \cos(\pi - \theta) : \varphi = \pi - \theta$$
$$\cos(\pi - \theta) = \frac{\text{المُجاور}}{\text{الوتر}} = \frac{4}{5}$$
$$E^2 = (9 \times 10^{+3})^2 + (9 \times 10^{+3})^2 - 2 \times 9 \times 10^{+3} \times 9 \times 10^{+3} \times \frac{4}{5} \Rightarrow$$

$$E^2 = 2 \times (9 \times 10^{+3})^2 \times \left(1 - \frac{4}{5}\right) = (9 \times 10^{+3})^2 \times \left(\frac{2}{5}\right) \Rightarrow$$

$$E = 9 \times 10^{+3} \sqrt{\frac{2}{5}} (V/m)$$

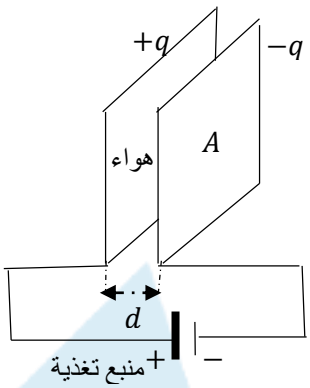
4. المُكثفة المُستوية The Parallel Capacitor

المُكثّفة هي أداة تُستخدم بشكل أساسي في الدارات الكهربائية والدارات الإلكترونية لترشيح الترددات أو لتخزين الطاقة بشكلٍ مؤقت. تُعطى سعة المُكثّفة، ويُرمز لها بالرمز C، بالعلاقة التالية:

$$C = \frac{U}{q} \qquad (7)$$

حيث يُمثّل U فرق الكمون بين طرفيها وتُمثّل q شحنتها. وتُقاس سعة المُكثّفة في جملة الواحدات الدولية (SI) بالفاراد نسبة للفيزيائي الإنكليزي فاراداي (Michael Faraday, 1791-1867) ويُرمز لها بالرمز (F). والفاراد هو سعة مكُثّفة يُكمنها تخزين شحنة كهربائية مقدارها كولون واحد عند تطبيق فرق في الكمون بين طرفيها مقداره فولت واحد. تُعتبر واحدة الفاراد واحدة كبيرة جداً لقياس سعة المُكثّفة لذلك يتمّ استخدام أجزائها مثل: $1(\mu F) = 1 \times 10^{-6}(F)$ و $1(pF) = 1 \times 10^{-12}(F)$.

تُعتبر المُكثّفة المُستوية أحد أكثر أنواع المكثفات استخداماً وهي عبارة ناقلين متوازيين، يُدعيا لبوسي المُكثّفة، سطحهما المُشترك A ويُوجد بينهما عازل وتفصل بينهما مسافة صغيرة d ويكونا مشحونين بشحنتين مُتساويتين ومُختلفتين في النوع، الشكل (3).



الشكل (3)

تُعطى سعة المُكثّفة المُستوية، التي يفصل بين لبوسيها الهواء، بالعلاقة التالية:

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \qquad (8)$$

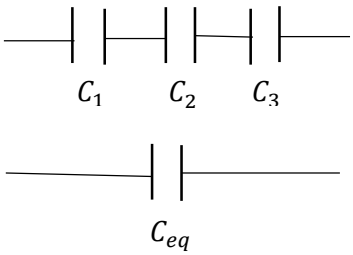
حيث يُمثّل $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}(C^2/N \cdot m^2)$ السماحية الكهربائية للخلاء.
وتُعطى الطاقة المُخزنة في المُكثفة بالعلاقات الثلاث التالية:

$$E = \frac{1}{2}\, q \cdot U = \frac{1}{2}\, C \cdot U^2 = \frac{1}{2}\, \frac{q^2}{C} \qquad (9)$$

5. وصل المُكثفات Combination of Capacitors

1) وصل المُكثفات على التسلسل

يتم وصل المُكثفات على التسلسل (التوالي) لتقليل السعة الكلّية للمُكثفة المُكافئة C_{eq} وزيادة فرق كمون التحمّل أيّ تقسيم الكمون، الشكل (4).



الشكل (4)

تكون شحنة كل مُكثّفة مُتساوية:

$$q = q_1 = q_2 = q_3$$

ويكون فرق الكمون بين الكُلّي يُساوي مجموع فروق الكمونات بين طرفي كل مُكثّفة:

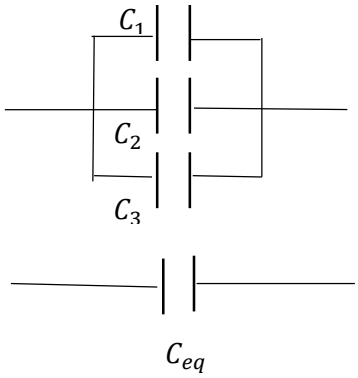
$$U = U_1 + U_2 + U_3 \Rightarrow$$

$$\frac{q}{C_{eq}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \qquad (10)$$

2) وصل المُكثفات على التفرّع

يتم وصل المُكثفات على التفرّع (التوازي) لزيادة السعة الكلّية للمُكثفة المُكافئة C_{eq}، الشكل (5).



الشكل (5)

يكون فرق الكمون كل مُكثّفة مُتساوي:

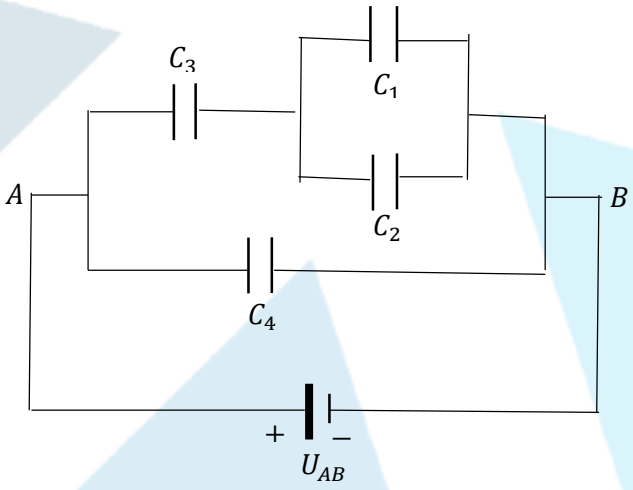
$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

وتكون الشحنة الكُلّية تُساوي مجموع شحنات كل مُكثّفة:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 \Rightarrow$$
$$C_{eq}U = C_1U + C_2U + C_3U \Rightarrow$$
$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 \qquad (11)$$

مثال (3):

بفرض أنّه لدينا أربع مُكثفات سعاتها $C_1 = C_2 = C_4 = 3(\mu F)$ و $C_3 = 6(\mu F)$ موصولة بين النقطة A والنقطة B إلى منبع تغذية فرق الكمون بين طرفيه $U_{AB} = 100(V)$، الشكل (6). أحسب شحنة وسعة وفرق الكمون بين طرفي كل مُكثّفة.



الشكل (6)

الحل:

1- $U_5 = U_1 = U_2 \qquad (1)$

$q_5 = q_1 + q_2 \qquad (2)$

$C_5 = C_1 + C_2 = 3 + 3 = 6(\mu F)$

المُكثفة C_1 والمُكثفة C_2 موصولتان على التفرّع

2- $q_6 = q_3 = q_5$ (3)

$U_6 = U_3 + U_5$ (4)

$$\frac{1}{C_6} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_5} = \frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{2}{6} = \frac{1}{3} \Rightarrow C_6 = 3(\mu F) = 3 \times 10^{-6}(F)$$

المُكثفة C_3 والمُكثفة C_5 موصولتان على التوازي

3- $U = U_4 = U_6$ (5)

$q = q_4 + q_6$ (6)

$C = C_4 + C_6 = 3 + 3 = 6(\mu F) = 6 \times 10^{-6}(F)$

نبدأ من العلاقة (5) فنجد:

$$U = U_4 = U_6 = U_{AB} = 100(V)$$

فتساوي الشحنة المُكافئة ناتج مضروب السعة المُكافئة في فرق الكمون الكلّي:

$$q = C \times U = 6 \times 10^{-6} \times 100 = 6 \times 10^{-4}(C)$$

وتكون شحنة المُكثّفة الرابعة:

$$q_4 = C_4 \times U_4 = 3 \times 10^{-6} \times 100 = 3 \times 10^{-4}(C)$$

وتكون شحنة المُكثّفة السادسة:

$$q_6 = C_6 \times U_6 = 3 \times 10^{-6} \times 100 = 3 \times 10^{-4}(C)$$

وهذا يعني أنّ العلاقة (6) مُحققة:

$$q_4 + q_6 = 3 \times 10^{-4} + 3 \times 10^{-4} = 6 \times 10^{-4}(C) = q$$

ثُمّ نذهب إلى العلاقة (3) فنجد:

$$q_6 = q_3 = q_5 = 3 \times 10^{-4}(C)$$

ويكون فرق الكمون بين طرفي المُكثّفة الثالثة:

$$U_3 = \frac{q_3}{C_3} = \frac{3 \times 10^{-4}}{6 \times 10^{-6}} = \frac{1}{2} \times 10^{+2} = 50(V)$$

ويكون فرق الكمون بين طرفي المُكثّفة الخامسة:

$$U_5 = \frac{q_5}{C_5} = \frac{3 \times 10^{-4}}{6 \times 10^{-6}} = \frac{1}{2} \times 10^{+2} = 50(V)$$

وهذا يعني أنّ العلاقة (4) مُحققة:

$$U_3 + U_4 = 50 + 50 = 100(V) = U_6 = U_{AB}$$

ثُمّ نذهب إلى العلاقة (1) فنجد:

$$U_5 = U_1 = U_2 = 50(V)$$

وتكون شحنة المُكثّفة الأولى:

$$q_1 = C_1 \times U_1 = 3 \times 10^{-6} \times 50 = 1.5 \times 10^{-4}(C)$$

وتكون شحنة المُكثّفة الثانية:

$$q_2 = C_2 \times U_2 = 3 \times 10^{-6} \times 50 = 1.5 \times 10^{-4}(C)$$

وهذا يعني أنّ العلاقة (6) مُحققة:

$$q_1 + q_2 = 1.5 \times 10^{-4} + 1.5 \times 10^{-4} = 3 \times 10^{-4}(C) = q_5$$

$$q_1 = 1.5 \times 10^{-4}(C), U_1 = 50(V)$$
$$q_2 = 1.5 \times 10^{-4}(C), U_2 = 50(V)$$
$$q_3 = 3 \times 10^{-4}(C), U_3 = 50(V)$$
$$q_4 = 3 \times 10^{-4}(C), U_4 = 100(V)$$
$$q_5 = 3 \times 10^{-4}(C), U_5 = 50(V)$$
$$q_6 = 3 \times 10^{-4}(C), U_6 = 100(V)$$