مقدمة

يعتبر تفسير الظواهر الكهربية أمر حديث نسبياً مقارنة بالظواهر الميكانيكية والضوئية. ويعود تفسير ظاهرة الكهرباء إلى التركيب الذري للمادة، حيث تتألف المادة من جزيئات وذرات، وكل ذرة تحتوي على نواة بها بروتونات ونيوترونات وتدور حول هذه النواة إلكترونات. الإلكترون يحمل شحنة كهربية سالبة يرمز لها بالرمز (e)، بينما البروتون يحمل شحنة كهربيه (+e)، أما النيوترون فهو لا يحمل أية شحنة صافية.

الشحنة:

الشحنة تعتبر من الصفات (الخصائص) الأساسية للأجسام ويرمز لها بالرمز (Q)، وتقاس الشحنة بوحدة تسمي الكولوم (C). وخاصية الشحنة تشبه خاصية الكتلة من حيث تمكين هاتين الخاصيتين للأجسام من التأثير على بعضها. ولكن هناك اختلاف جوهري بين الشحنة والكتلة، حيث إن الشحنة يمكن أن تكون سالبة أو موجبة، بينما الكتلة لا تملك هذه الصفة.

أصغر شحنة أساسية موجودة في الطبيعة هي شحنة الإلكترون $(e = 1.6\times10^{-19}\ C)$ ،بينما كتلته $(m = 9.11\times10^{-31}\ kg)$.

تتواجد الشحنات على الأجسام في صورة مضاعفات لهذه الشحنة الأساسية، ولهذا يقال إن الشحنة مكممة. ومثلما هناك قانون لحفظ الطاقة والكتلة فإن هناك قانون لحفظ الشحنة ينص على:

[مجموع الشحنات الداخلة في أي تفاعل يساوي مجموعة الشحنات الناتجة عن التفاعل]

ما هو مفهوم الشحنة الكهربائية؟

تعرف الشحنة الكهربائية بأنها الخاصية الأساسية للمادة التي تحملها بعض الجسيمات الأولية، والتي تتحكم في كيفية تأثر الجسيمات بالمجال الكهربائي أو المغناطيسي، كما تحدث الشحنة الكهربائية، التي يمكن أن تكون موجبة أو سالبة في وحدات طبيعية منفصلة ولا يتم إنشاؤها أو إتلافها.

تعتبر الشحنة الكهربائية محفوظة في أي نظام معزول، ففي أي تفاعل كيميائي أو نووي، تكون الشحنة الكهربائية الصافية ثابتة.

أنواع الشحنات الكهربائية:

تتكون الشحنات الكهربائية من نوعين: موجبة وسالبة، حيث أن جسمان لهما فائض من نوع واحد من الشحنة يبذلان قوة تنافر على بعضهما البعض عندما يكونان قريبين نسبيًا من بعضهما البعض، أما إذا كان الجسمان لهما شحنة معاكسة زائدة، وأحدهما موجب الشحنة والآخر سالب الشحنة، فسيجذب أحدهما الآخر عندما يكون قريبًا نسبيًا.

تمتلك العديد من جسيمات المادة الأساسية أو دون الذرية خاصية الشحنة الكهربائية على سبيل المثال: للإلكترونات شحنة سالبة والبروتونات شحنة موجبة، لكن النيوترونات لها شحنة صفرية.

وجدت التجربة أن الشحنة السالبة لكل إلكترون لها نفس المقدار، والذي يساوي أيضًا الشحنة الموجبة لكل بروتون، وبالتالي توجد الشحنة في وحدات طبيعية مساوية لشحنة الإلكترون أو البروتون، وهو ثابت فيزيائي أساسي، كما تم إجراء قياس مباشر ومقنع لشحنة الإلكترون، كوحدة طبيعية للشحنة الكهربائية، لأول مرة (١٩٠٩) في تجربة مليكان Millikan oil-drop.

تكون ذرات المادة متعادلة كهربائيًا؛ لأن نواتها تحتوي على نفس عدد البروتونات الموجودة في الإلكترونات المحيطة بالنواة، ويتضمن التيار الكهربائي والأجسام المشحونة فصل بعض الشحنة السالبة للذرات المحايدة. ويتكون التيار في الأسلاك المعدنية من انجراف من الإلكترونات يكون فيها واحد أو اثنان من كل ذرة أكثر ارتباطًا من البقية، وتفقد بعض الذرات الموجودة في الطبقة السطحية لقضيب زجاجي شحنة موجبة بفركها بقطعة قماش حريرية، حيث أن إلكترونات تكون تاركة شحنة موجبة صافية؛ بسبب البروتونات غير المحايدة لنواتها، بحيث أن جسم سالب الشحنة يحتوي على فائض من الإلكترونات على سطحه.

وحدة قياس الشحنة الكهربائية:

وحدة الشحنة الكهربائية في نظامي المتر – كيلوجرام – ثانية، نظام (SI) هي الكولوم، حيث يتم تعريفها على أنها مقدار الشحنة الكهربائية التي تتدفق عبر مقطع عرضي لموصل في دائرة كهربائية خلال كل ثانية، وعندما يكون للتيار قيمة أمبير واحد، يتكون الكولوم الواحد من (6.24×10^{18}) وحدة طبيعية من الشحنة الكهربائية، مثل الإلكترونات الفردية أو البروتونات، ومن تعريف الأمبير، فإن الإلكترون نفسه له شحنة سالبة تبلغ (1.6×10^{-19}) كولوم. بينما كتلته **($m = 9.11\times10^{-31}$ kg)**.

كثافة الشحنة الكهربائية:

بالنسبة للمجال الكهربائي فإنه من المهم جدًا تحديد تدفق الشحنة، حيث إن هذه المجالات لديها تراكم للشحنات الكهربائية، وبالتالي فإن كثافة الشحنة مهمة جدًا لحساب العديد من الأغراض، إذ يجب حساب كثافة الشحنة هذه بناءً على مساحة السطح بالإضافة إلى حجم الجسم الكهربائي.

تعرف كثافة الشحنة أنها مقياس تراكم الشحنة الكهربائية في مجال معين، ويقيس كمية الشحنة الكهربائية حسب الأبعاد التالية:

- لكل وحدة طول، أي **كثافة الشحنة الخطية λ،**

$$\boldsymbol{\lambda} = \frac{q}{l}$$

حيث q هي الشحنة و l هو الطول الذي يتم توزيعها عليه، وستكون وحدة λ بنظام (SI) هي (Coulomb/m).

- لكل وحدة مساحة، أي **كثافة الشحنة السطحية σ،**

$$\sigma = \frac{q}{A}$$

حيث q هي الشحنة و A هي مساحة السطح، ووحدة σ بنظام (SI) هي ($Coulomb/m^2$).

- لكل وحدة حجم، أي **كثافة الشحنة الحجمية ρ،**

$$\rho = \frac{q}{V}$$

حيث q هي الشحنة و V هو حجم التوزيع، ووحدة ρ بنظام (SI) هي ($Coulomb/m^3$).

تعتمد كثافة الشحن على توزيع الشحنة الكهربائية ويمكن أن تكون موجبة أو سالبة، وستكون كثافة الشحنة هي مقياس الشحنة الكهربائية لكل وحدة مساحة على السطح، أو لكل وحدة حجم للجسم أو المجال، كما تصف كثافة الشحنة مقدار الشحنة الكهربائية المتراكمة في مجال معين، وبشكل أساسي، يتم حساب كثافة الشحنة لكل وحدة حجم ومساحة السطح والطول.

يقيس مقدار الشحنة الكهربائية لكل وحدة قياس للمساحة، وقد يكون هذا الفضاء واحدًا أو ثنائيًا أو ثلاثي الأبعاد، حيث تعتمد كثافة الشحن على الموضع، والذي يمكن أن يكون سالبًا.

حفظ الشحنة الكهربائية:

الحفاظ على الشحنة في الفيزياء، يعني ذلك ثبات الشحنة الكهربائية الكلية في الكون أو في أي تفاعل كيميائي أو نووي محدد، ولا تتغير الشحنة الإجمالية في أي نظام مغلق أبدًا، على الأقل ضمن حدود الملاحظة الأكثر دقة.

في المصطلحات الكلاسيكية، يشير هذا القانون إلى أن ظهور مقدار معين من الشحنة الموجبة في جزء واحد من النظام يكون دائمًا مصحوبًا بظهور كمية مساوية من الشحنة السالبة في مكان آخر في النظام؛ على سبيل المثال، عند فرك مسطرة بلاستيكية بقطعة قماش، تصبح سالبة الشحنة وتصبح قطعة القماش مشحونة بشكل إيجابي بمقدار مساوٍ.

ملاحظة

١- عدد الإلكترونات الكلي (N) يساوي الشحنة الكلية مقسوماً على شحنة الإلكترون الواحد(e)، أي:

$$N = \frac{q}{e}$$

٢- كتلة الإلكترونات الكلية (M) تساوي عدد الإلكترونات مضروباً في كتلة الإلكترون الواحد (m) أي:

$$M = mN$$

قانون كولوم (Coulombs Law)

صاغ العالم الفرنسي شارلس كولوم قانوناً مهماً في الكهرباء الساكنة ينص على:

القوة الكهروستاتيكية (F) بين شحنتين نقطيتين (q_1) و (q_2) تتناسب طردياً مع حاصل ضرب قيمة كل من الشحنتين وعكسياً مع مربع المسافة (r) بينهما أي:

$$\vec{F} \alpha \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

q_1 : مقدار الشحنة الأولى (بالكولوم (C)) .

q_2 : مقدار الشحنة الثانية (بالكولوم (C)) .

r^2 : مربع المسافة بين مركزي الشحنتين (بالمتر المربع m^2)

القوة بين الشحنتين يمكن أن تكون قوة تنافر إذا تشابهت الشحنات، ويمكن أن تكون قوة تجاذب إذا كانت الشحنتان مختلفتين.

وان (k) مقدار ثابت يعتمد على نوع الوسط الذي يفصل بين الشحنتين وكذلك على نوع الوحدات المستخدمة، ويكتب هذا الثابت كثيراً بالصورة:

$$\boldsymbol{k = \frac{1}{4\pi\varepsilon}}$$

حيث (ε) هي سماحية الوسط الفاصل بين الشحنتين، وتعرف بأنها مقدرة الوسط على تخزين الشحنة. وفي حالة الفراغ (الهواء) فإن سماحيته ($\boldsymbol{\varepsilon_0}$) تساوي:

$$\boldsymbol{\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}\ F/m}$$

وعليه فإن قيمة ثابت كولوم (k) هي:

$$\boldsymbol{9\times10^{9}\ N.m^2/C^2}$$

مثال/ شحنتان نقطيتان البعد بينهما (30 cm) ، مقدار الشحنة الأولى ($+3\mu C$) ومقدار الشحنة الثانية ($+6\mu C$) ، أوجد مقدار القوة الكهربائية الناشئة بينهما ؟ وما نوعها ؟

الحل/

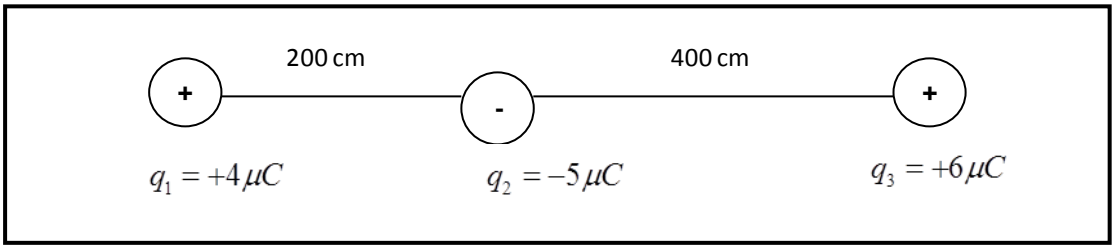
$$\vec{F} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$\vec{F} = (9x10^9).\frac{(+3x10^{-6})(+6x10^{-6})}{(0.3)^2}$$

$$\boxed{\vec{F} = +1.8N}$$

و الإشارة الموجبة تشير إلى أن نوع القوة الناشئة بين الشحنتين هي (**قوة تنافر**).

مثال/ أوجد مقدار محصلة القوة المؤثرة على مركز الشحنة ($q_2 = -5\mu C$) المرسومة في الشكل التالي :



الحل/

١- نحسب مقدار القوة الناشئة بين الشحنة الأولى والشحنة الثانية :

$$\vec{F} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

$$\vec{F}_{1,2} = k.\frac{q_1 q_2}{r_{1,2}^{\ 2}}$$

$$\vec{F}_{1,2} = (9x10^9).\frac{(+4x10^{-6})(-5x10^{-6})}{(200x10^{-2})^2}$$

$$\boxed{\vec{F}_{1,2} = -0.0450N}$$

و الإشارة السالبة تشير إلى أن نوع القوة بين الشحنتين هي (**قوة تجاذب**).

٢- نحسب مقدار القوة الناشئة بين الشحنة الثالثة والشحنة الثانية :

$$\vec{F} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$\vec{F}_{3,2} = k.\frac{q_3 q_2}{r_{3,2}^{\ 2}}$$

$$\vec{F}_{3,2} = (9x10^9).\frac{(+6x10^{-6})(-5x10^{-6})}{(400x10^{-2})^2}$$

$$\boxed{\vec{F}_{3,2} = -0.0169N}$$

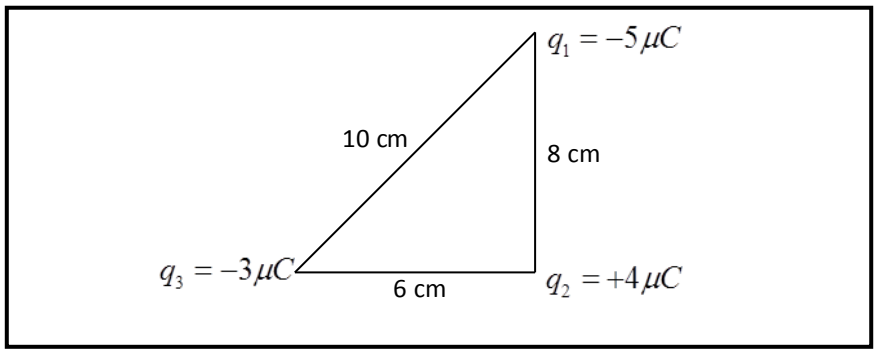
و الإشارة السالبة تشير إلى أن نوع القوة بين الشحنتين هي (**قوة تجاذب**).

إذن القوة الكلية المؤثرة على مركز الشحنة الثانية بواسطة القوتين المتعاكستين في الإتجاه هي (بدون إستخدام إشارات الشحنات الكهربائية لأننا نريد مقدار القوة فقط) :

$$\vec{F}_{Total} = \vec{F}_{1,2} - \vec{F}_{3,2}$$

$$\vec{F}_{Total} = (0.0450) - (0.0169) \boxed{\Rightarrow \vec{F}_{Total} = 0.0281N}$$

مثال/ إحسب مقدار واتجاه محصلة القوى المؤثرة على الشحنة ($q_2 = +4\mu C$) الموضّحة في الشكل الآتي :



الحل/

١- نحسب مقدار القوة الناشئة بين الشحنة الأولى والشحنة الثانية :

$$\vec{F} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$\vec{F}_{1,2} = k.\frac{q_1 q_2}{r_{1,2}^{\ 2}}$$

$$\vec{F}_{1,2} = (9x10^9).\frac{(-5x10^{-6})(+4x10^{-6})}{(8x10^{-2})^2} \boxed{\Rightarrow \vec{F}_{1,2} = -28.125N}$$

وإتجاهها من الشحنة الثانية (الموجبة) إلى الشحنة الأولى (السالبة) ، و الإشارة السالبة تشير إلى أن نوع القوة بين الشحنتين هي (**قوة تجاذب**).

٢- نحسب مقدار القوة الناشئة بين الشحنة الثالثة والشحنة الثانية :

$$\vec{F} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$\vec{F}_{3,2} = k.\frac{q_3 q_2}{r_{3,2}^{\ 2}}$$

$$\vec{F}_{3,2} = (9x10^9).\frac{(-3x10^{-6})(+4x10^{-6})}{(6x10^{-2})^2}$$

$$\boxed{\vec{F}_{3,2} = -30N}$$

واتجاهها من الشحنة الثانية (الموجبة) إلى الشحنة الثالثة (السالبة) ، و الإشارة السالبة تشير إلى أن نوع القوة بين الشحنتين هي (**قوة تجاذب**).

لإيجاد مقدار محصلة القوى المؤثرة على الشحنة ($q_2 = +4\mu C$) ، يلاحظ أن القوتين تؤثران في اتجاهين متعامدين ، أي أن :

$$R = \sqrt{(\vec{F}_{1,2})^2 + (\vec{F}_{3,2})^2}$$

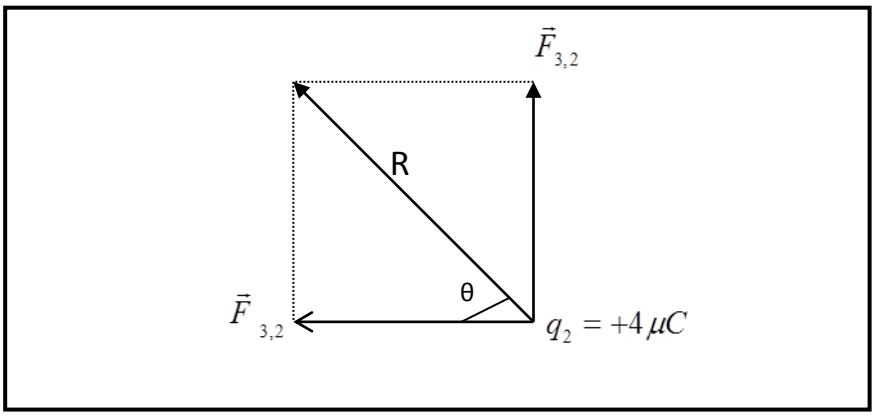
$$R = \sqrt{(28.125)^2 + (30)^2}$$

$$\boxed{R = 41.1N}$$

أما اتجاه محصلة القوى المؤثرة على الشحنة ($q_2 = +4\mu C$) :

$$\tan\theta = \frac{\vec{F}_{1,2}}{\vec{F}_{3,2}} \Rightarrow \theta = \tan^{-1}\frac{\vec{F}_{1,2}}{\vec{F}_{3,2}}$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{(28.125)}{(30)} \boxed{\Rightarrow \theta = 43.152^\circ}$$



المجال الكهربائي Electric Field

المجال الكهربي لأية شحنة: هو الوسيلة التي تمكن هذه الشحنة من التأثير المشترك مع غيرها من الشحنات. أما شدة الجال الكهربي (E) في نقطة ما، فهي القوة التي يؤثر بها المجال على وحدة الشحنة الموجبة الموضوعة في هذه النقطة، أي:

$$E = \frac{F}{q_0}$$

حيث (q_0) ، هي شحنة اختبار موجبة موضوعة في النقطة المراد حساب شدة المجال عندها.

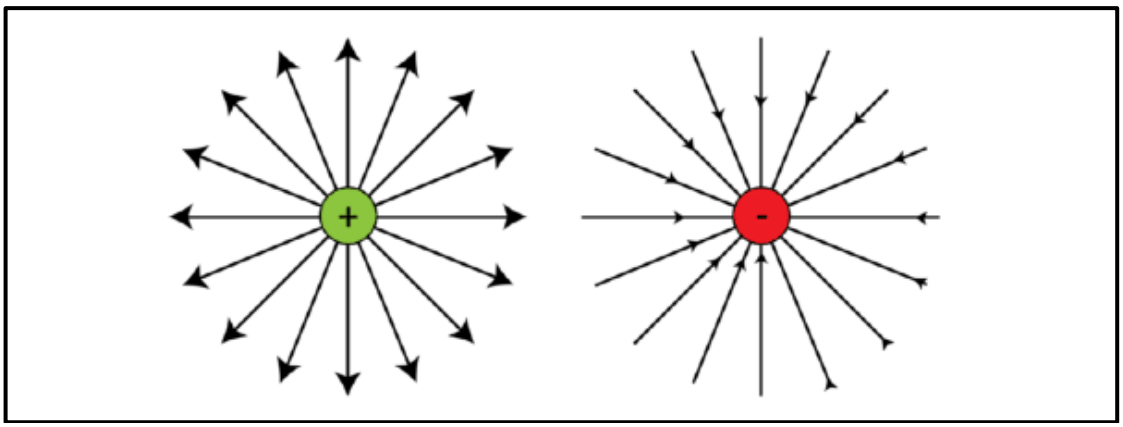
ويتبين من هذه المعادلة أن وحدة شدة المجال الكهربي هي نيوتن/كولوم وتكتب بالصيغة(N/ C)

$$F = k\,\frac{q\,q_o}{r^2}$$

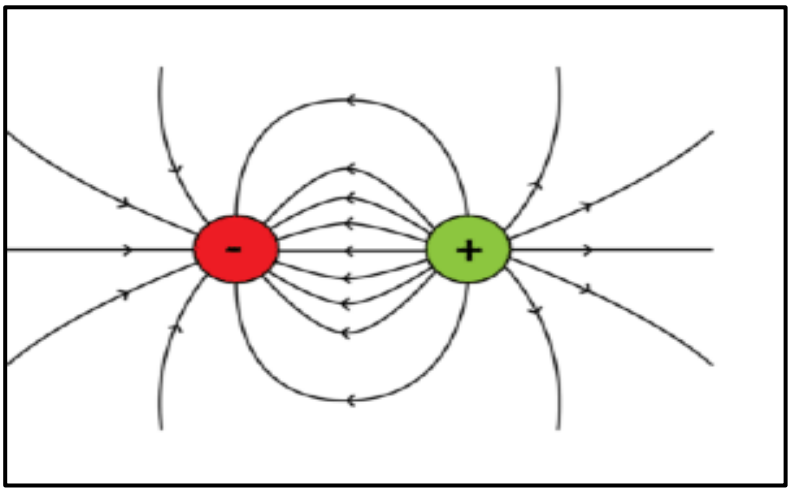
$$\therefore E = k\,\frac{q}{r^2} \quad or \quad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_o}\,\frac{q}{r^2}$$

خطوط القوة الكهربائية

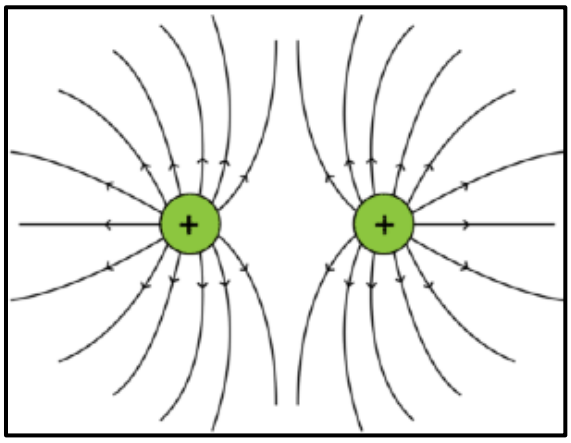
خط القوة: هو المسار الذي تسلكه شحنة اختبارية موجبة موضوعة عند نقطة ما في المجال الكهربائي، الشكل ادناه يبين خطوط القوة لمجال كهربائي ناشئ عن شحنة نقطية معزولة، نلاحظ ان خطوط القوة الكهربائية تكون خطوط مستقيمة ومتجهة نحو الخارج اذا كانت الشحنة موجبة وتكون متجهة نحو الداخل اذا كانت الشحنة سالبة.



اما الشكل ادناه يبين خطوط المجال الناشئ عن ثنائي القطب الكهربائي والذي يعرف بانه عبارة شحنتين متساويتين بالمقدار ومختلفتين بالإشارة تفصلهما مسافة صغيرة



في حالة شحنتين موجبتين بحيث تؤثر احداهما على الاخرى فان خطوط القوة الكهربائية تكون كما في الشكل التالي:



المجال الكهربائي (Electric Field)

يعرّف المجال الكهربائي لشحنة في نقطة ما بأنه القوة التي يؤثر بها ذلك المجال في شحنة إختبار صغيرة موجبة (q_o) موضوعة في تلك النقطة مقسومة على مقدار تلك الشحنة ، بمعنى آخر مقدار وإتجاه القوة المؤثرة على وحدة الشحنة في تلك النقطة ، أي أن :

$$\boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F}_E}{q_o} ...(3-12)}$$

$$\vec{E} = k\frac{q_1 q_o}{r^2 q_o}$$

$$\boxed{\vec{E} = k\frac{q}{r^2} ...(4-12)}$$

ويوضّح المعادلة الأخيرة المجال الكهربائي لشحنة نقطية مقدارها (q) على بعد (r) منها ، وتكون قيمة المجال موجبة أو سالبة معتمدة على نوع شحنة المصدر ، أما إتجاهه فهو يخرج من الشحنة الموجبة وينتهي في الشحنة السالبة ، ويقاس المجال الكهربائي بوحدة (N/C) ، ولما كانت القوة كمية متجهة فإن المجال الكهربائي يكون كمية متجهة أيضا أي يتم تحديده من خلال مقداره وإتجاهه .

إذا إفترضنا أن شحنة إختبار موجبة حرة الحركة صغيرة موضوعة في مجال شحنة كهربائية ، فإن مجموع المسارات التي ستسلكها شحنة الإختبار حول الشحنة الكهربائية عند وضعها في مجالها تسمى بخطوط المجال الكهربائي.

صفات خطوط المجال الكهربائي:

١- يكون إتجاه خطوط المجال الكهربائي بحيث تبدو خارجة من الشحنة الموجبة وداخلة في الشحنة السالبة ، ويدل إتجاه المماس لخط المجال عند أي نقطة على إتجاه المجال الكهربائي عند تلك النقطة ، كما ويدل عدد خطوط المجال والذي يقطع وحدة المساحة على شدة المجال الكهربائي في تلك المنطقة .

٢- يتناسب عدد الخطوط الخارجة من الشحنة الموجبة أو الداخلة في الشحنة السالبة تناسبا طرديا مع مقدار الشحنة .

٣- خطوط المجال الكهربائي لا تتقاطع لأنها لو تقاطعت لوجد أكثر من إتجاه للمجال عند نقطة واحدة وهذا مرفوض فيزياويا .

يعرّف المجال الكهربائي المنتظم بأنه مجال الشحنة ذو المقدار الثابت والإتجاه الثابت بكل مواقع المجال ، ولأجل تشكّل مجال كهربائي منتظم يلزمنا لوحين معدنيين ، متوازيين ، البعد صغير جدا مقارنة بأبعادهما ، ومشحونين بشحنتين مختلفتين .

مثال : إحسب كل مما يأتي :

١ - شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$) عند مسافة ($30cm$) من شحنة نقطية ($q_1 = 5x10^{-9}C$) ؟

الحل :

$$\vec{E} = k\frac{q}{r^2}$$

$$\vec{E} = (9x10^9 N.m^2/C^2)\frac{(5x10^{-9}C)}{(0.30m)^2}$$

$$\boxed{\vec{E} = 500N/C}$$

٢ - القوة المؤثرة على الشحنة ($q_2 = 4x10^{-10}C$) موضوعة على بعد ($30cm$) من (q_1) ؟

الحل :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_E}{q_o}$$

$$\vec{F} = \vec{E}.q_2 = (500)(4x10^{-10})$$

$$\boxed{\Rightarrow \vec{F} = 2x10^{-7}N}$$

و الإشارة الموجبة تشير إلى أن نوع القوة بين الشحنتين هي (**قوة تنافر**).

٣ - القوة المؤثرة على الشحنة ($q_3 = -4x10^{-10}C$) موضوعة على بعد ($30cm$) من (q_1) (في غياب q_2) ؟

الحل :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_E}{q_o}...(3-12)$$

$$\vec{F} = \vec{E}.q_3 = (500)(-4x10^{-10})$$

$$\boxed{\Rightarrow \vec{F} = -2x10^{-7}N}$$

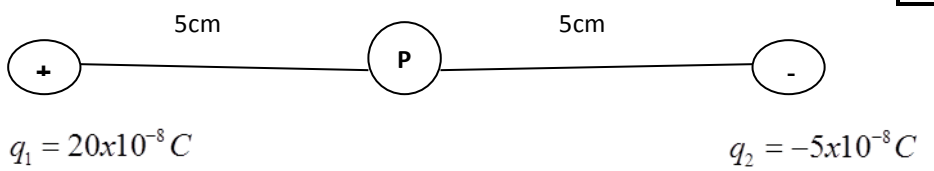
و الإشارة السالبة تشير إلى أن نوع القوة بين الشحنتين هي (**قوة تجاذب**).

مثال : بالنسبة للحالة الموضّحة في الشكل الآتي ، أوجد :

١- شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$) عند النقطة (P) التي تمثل شحنة إختبار موجبة ؟

٢- القوة المؤثرة على الشحنة ($-4x10^{-8}C$) موضوعة عند النقطة (P) ؟

الحل :



١ - شحنة الإختبار الموجبة موضوعة عند (P) سوف تتنافر بتأثير الشحنة الموجبة (q_1) وتنجذب إلى اليمين بتأثير الشحنة السالبة (q_2) ، وحيث أن ($\vec{E}_1$) و ($\vec{E}_2$) لهما نفس الإتجاه ، فإنه يمكننا جمع مقداريهما (بدون إستخدام إشارات الشحنات الكهربائية لأننا نريد مقدار المجال فقط) لإيجاد مقدار محصلة المجال :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$\vec{E} = k\frac{q_1}{r_1^{\,2}} + k\frac{q_2}{r_2^{\,2}}$$

$$\vec{E} = \frac{k}{r_1^{\,2}}(q_1 + q_2)$$

حيث ($r_1 = r_2 = 0.05m$) ، ولذلك :

$$\vec{E} = (9x10^9\, N.m^2/C^2)\frac{((20x10^{-8}) + (5x10^{-8}))}{(0.050m)^2}$$

$$\vec{E} = (9x10^9\, N.m^2/C^2)\frac{(25x10^{-8}C)}{(0.050m)^2}$$

$$\boxed{\vec{E} = 9x10^5\, N/C}$$

ويكون إتجاهه نحو اليمين .

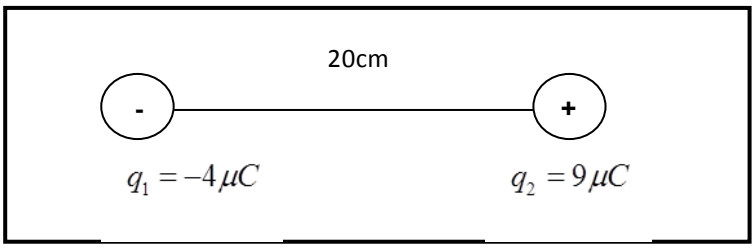
٢ - شحنة ($-4x10^{-8}C$) موضوعة عند (P) ستتأثر بقوة ($\vec{E}.q$) وتساوي :

$$\vec{F}_E = \vec{E}.q = (9x10^5\, N/C)(-4x10^{-8}C)$$

$$\boxed{\Rightarrow \vec{F}_E = -0.036N}$$

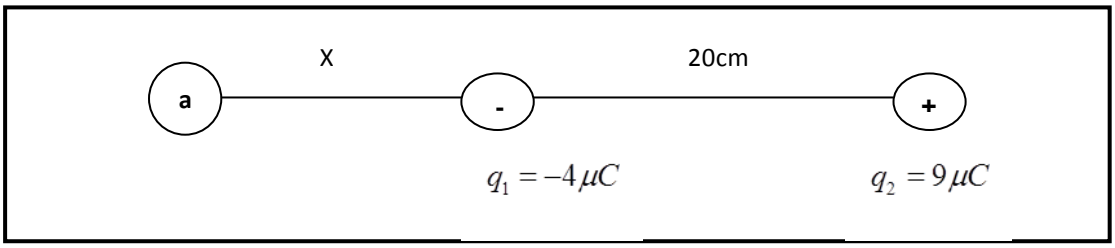
ملاحظة : تعرّف نقطة التعادل في المجال الكهربائي على أنها المنطقة التي تكون محصلة شدة المجال الكهربائي عندها مساوية للصفر (أي أن المجالين يكونان متساويين بالمقدار ومتعاكسين بالإتجاه) ، بمعنى آخر إذا وضعت أي شحنة عندها تصبح مستقرة .

مثال : من الشكل الآتي ، حدّد نقطة التعادل للمجال الكهربائي لشحنتين مقدارهما ($-4\mu C$ و $+9\mu C$) والبعد بينهما ($20cm$) ؟



الحل :

إن موقع نقطة التعادل سوف يكون خارج المنطقة المحصورة بين الشحنتين لأنهما مختلفتان ، لذلك فإنها تتجه نحو الشحنة الأصغر وتقع على بعد (X) من الشحنة ($-4\mu C$) عند النقطة (a) :



بما أن نقطة التعادل تكون عندها محصلة شدة المجال الكهربائي مساوية للصفر ، إذن :

$$\sum \vec{E} = 0 \Rightarrow \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 0$$

أي أن المجالين متساويين بالمقدار

$$\vec{E}_1 = -\vec{E}_2$$

أي أن المجالين متعاكسين في الإتجاه

$$\because \vec{E} = k\frac{q}{r^2} ...(4-16)$$

$$\boxed{k\frac{q_1}{r_1^2} = -k\frac{q_2}{r_2^2}}$$

$$(9x10^9)\frac{(-4x10^{-6})}{(Xx10^{-2})^2} = -(9x10^9)\frac{(9x10^{-6})}{((20+X)x10^{-2})^2}$$

$$(9x10^9)\frac{(4x10^{-6})}{X^2x10^{-4}} = (9x10^9)\frac{(9x10^{-6})}{(20+X)^2x10^{-4}}$$

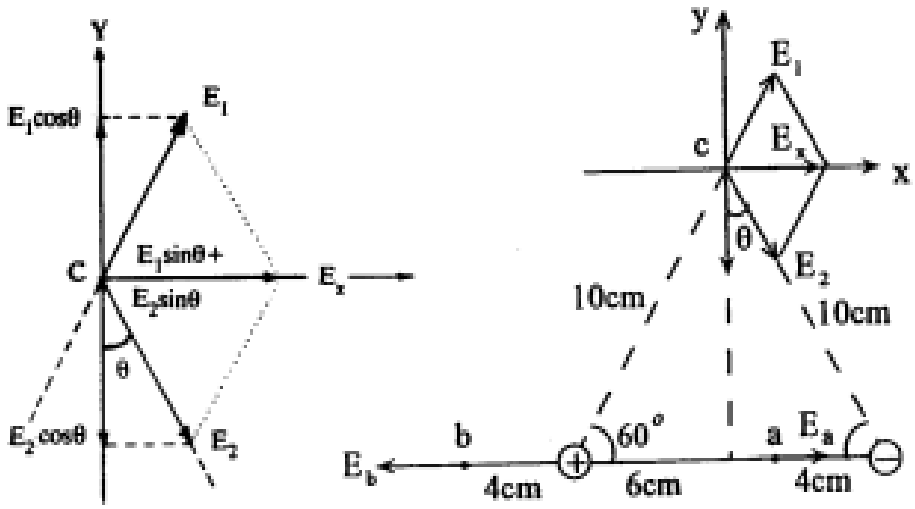
$$\sqrt{\frac{4}{X^2}} = \sqrt{\frac{9}{(20+X)^2}}$$

$$\frac{2}{X} = \frac{3}{20+X} \boxed{\Rightarrow X = 40cm}$$

أي أن نقطة التعادل تقع على بعد $(40cm)$ من الشحنة $(-4\mu C)$ خارج المنطقة المحصورة بين الشحنتين وعلى إمتداد الخط الواصل بينهما .

شحنتان 12×10^{-9} C و -12×10^{-9} C البعد بينهما 10cm كما في الشكل التالي

احسب شدة المجال الناتج من هاتين الشحنتين عند النقاط a, b, c.



الحـــل

لحل هذه المسألة نستخدم المعادلة (١٧-١).

أ- بالنسبة لشدة المجال عند النقطة a : متجه مجال الشحنة الموجبة يتجه نحو اليمين وقيمته :

$$E_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{12 \times 10^{-9}}{(0.06)^2} = 3.0 \times 10^4 \, N/C$$

ومتجه مجال الشحنة السالبة يتجه أيضا نحو اليمين وقيمته :

$$E_2 = 6.75 \times 10^4 \, N/C$$

$$\therefore E_a = E_1 + E_2 = (3.0 + 6.75) \times 10^4 = 9.75 \times 10^4 \, N/C$$

ب- بالنسبة للنقطة b : فمتجه مجال الشحنة الموجبة يتجه نحو الشمال وقيمته :

$$E_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{12 \times 10^{-9}}{(0.04)^2} = 6.75 \times 10^4 \, N/C$$

ومتجه مجال الشحنة السالبة يتجه نحو اليمين وقيمته :

$$E_2 = 0.55 \times 10^4 \, N/C$$

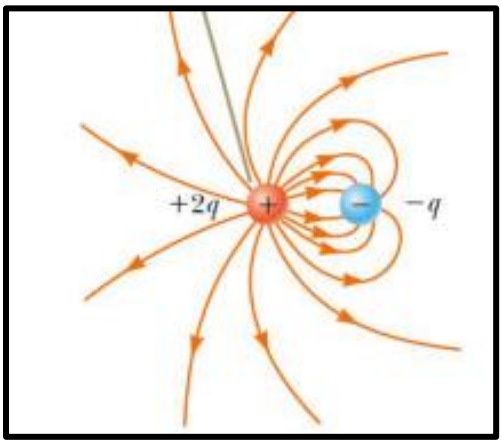
$$\therefore E_b = E_1 - E_2 = (6.75 - 0.55) \times 10^4 = 6.20 \times 10^4 \, N/C$$

خطوط المجال الكهربائي

في حالة رسم خطوط المجال الكهربائي فيجب ملاحظة ما يأتي:

- تبدأ خطوط المجال الكهربائي من الشحنة الموجبة وتنتهي بالشحنة السالبة، وفي حالة وجود شحنة واحدة فان خطوط المجال تبدأ او تنتهي في مكان لانهائي بعيد جدا.
- عدد خطوط القوة التي تترك الشحنة الموجبة او تصل الى الشحنة السالبة يتناسب طرديا مع مقدار تلك الشحنة.
- خطوط المجال الكهربائي لا تتقاطع فيما بينها.

في حالة شحنة موجبة او سالبة او ثنائي قطب فان خطوط المجال كما رسمت سابقا، الشكل ادناه يمثل خطوط المجال الكهربائي لشحنة 2q+ وشحنة اخرى q-



٢-٤ حركة الجسيمات المشحونة في المجال الكهربائي

لو وضع جسيم يحمل شحنة قدرها q (ولتكن موجبة) في مجال كهربائي منتظم E . لتأثر بقوة قدرها

$$F = qE$$

وذلك طبقا لتعريف شدة المجال المتمثل في المعادلة (٢-١) . وكما هو واضح من قانون نيوتن الثاني فان هذا الجسيم سيتحرك بتعجيل ثابت قدره

$$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m} \qquad (٢-١٦)$$

حيث m تمثل كتلة الجسيم الموجب الشحنة . ولو تأملنا هذه المعادلة لوجدنا ان تعجيل الجسيم هو بنفس اتجاه المجال . وسوف نعتبر حالتين لحركة الجسيم المشحون في مجال كهربائي منتظم :

أولا : عندما يوضع الجسيم ساكنا في مجال كهربائي منتظم

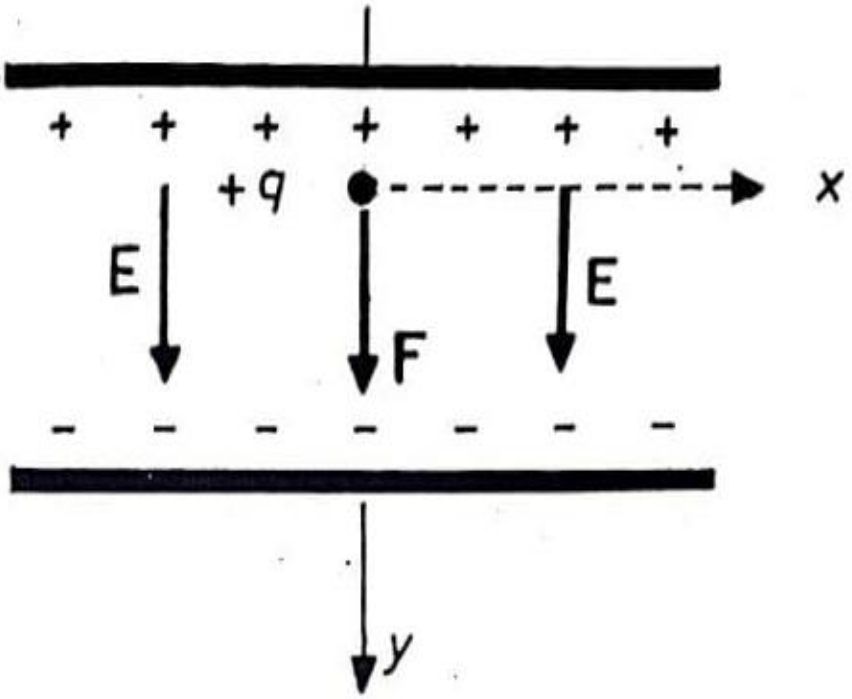
يمكننا الحصول على مجال كهربائي منتظم (كما سنرى في بند لاحق) . اذا وصلنا طرفي بطارية بلوحين معدنيين متوازيين ومعزولين أحدهما عن الآخر. وكلما كانت المسافة بين اللوحين صغيرة (بالمقارنة مع أبعاد اللوحين) . كلما كان المجال بينهما منتظما الى درجة كبيرة.

فلو فرضنا أن جسيم (كتلته m وشحنة q) وضع ساكنا في مثل هذا المجال . كما هو مبين في الشكل (٢-١٢) . لتحرك هذا الجسيم بخط مستقيم وبتعجيل ثابت قدره :

$$a = \frac{qE}{m}$$

لاحظ أن هذه الحركة تشبه حركة الأجسام الساقطة على سطح الأرض بتأثير الجاذبية الأرضية وبهذا يمكننا تطبيق قوانين الحركة ذات التعجيل الثابت والتي لابد وأن يتذكرها الطالب في دراسته السابقة في الميكانيك . لذا فان سرعة الجسيم بعد زمن قدره t تصبح

$$v = v_0 + at = at = \frac{qE}{m}t$$



الشكل ٢-١٢

جسيم ترك ساكنا في مجال

كهربائي منتظم

حيث أن السرعة الابتدائية للجسيم هي صفر. وأما المسافة y التي يقطعها الجسيم بعد نفس الزمن فتصبح

$$y = (1/2)\,at^2 = \frac{q}{2}\frac{E}{m}t^2$$

وكذلك نجد أن

$$v^2 = 2ay = \frac{2qE}{m}y$$

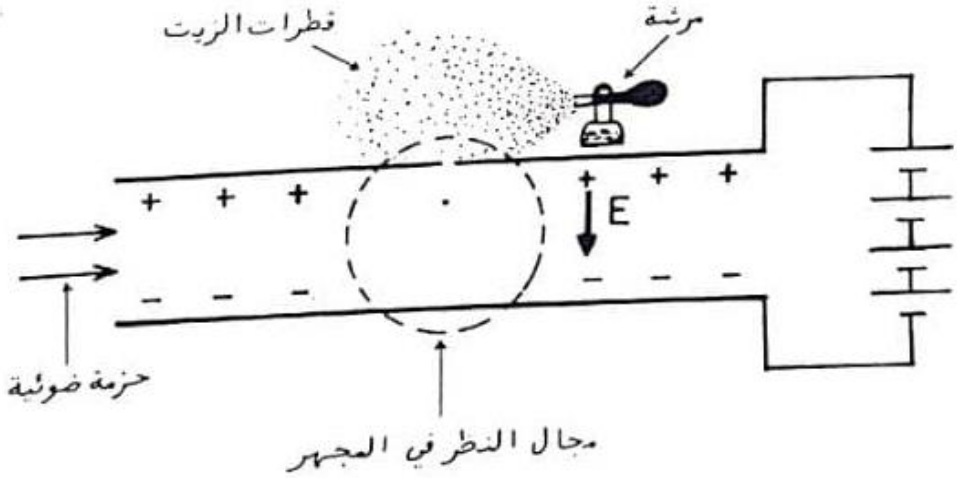
٢-٥ شحنة الالكترون The charge of the Electron

ان الشحنة الكهربائية . كما أثبتت التجارب . ليست متصلة ولكنها مكونة من مضاعفات صحيحة لكمية معينة . هي شحنة الالكترون والتي يرمزلها بالحرف e . وبذلك تكون أية شحنة موجودة في الطبيعة مهما كان أصلها مساوية الى

$$q = n e \qquad (٢-١٩)$$

حيث n تمثل أي عدد صحيح . وبهذا نقول ان الشحنة تتصف بالكم "Charge is quantized"

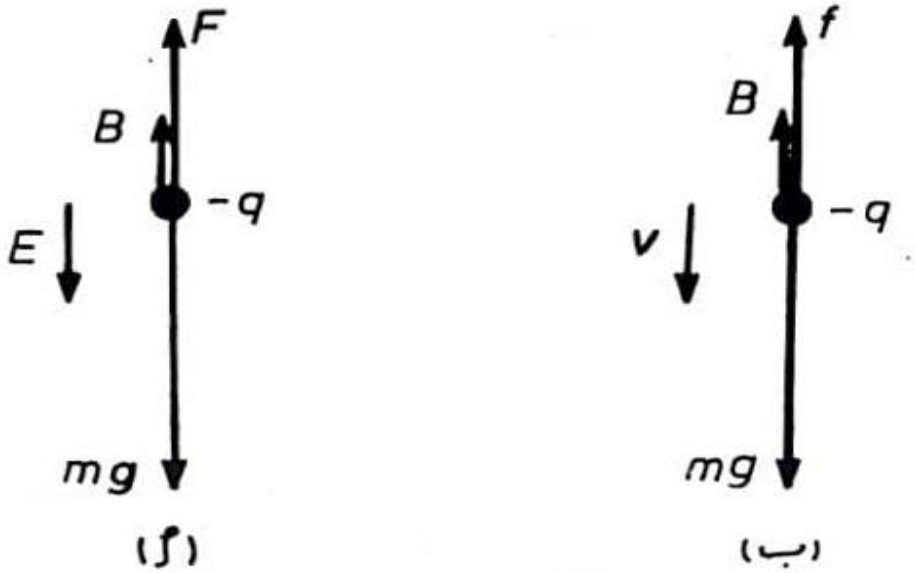
لقد قيست شحنة الالكترون لأول مرة بدقة من قبل العالم مليكان ومساعديه (١٩٠٩-١٩١٣) بعد أكثر من عشر سنوات من اكتشافه من قبل تومسون . والشكل (٢-١٤) يبين رسما تخطيطيا للجهاز الذي استعمله مليكان.فهو يتكون من لوحين معدنيين متوازيين ومعزولين عن بعضهما ويفصلهما الهواء ويولد بينهما مجالا كهربائيا منتظما وذلك بربطهما الى بطارية كهربائية ذات فولتية عالية.ويتطاير رذاذ من الزيت من مرشه (Spray) بشكل قطرات صغيرة جدا فوق اللوح العلوي . ثم يسمح لقسم من هذه القطرات بالدخول من خلال ثقب في اللوح العلوي الى المنطقة بين اللوحين حيث تسلط حزمة ضوئية أفقيا . عندئذ يمكن مشاهدة هذه القطرات المضاءة وتتبع حركتها بواسطة مجهر Microscope



الشكل ٢-١٤
تجربة قطرة الزيت لميلكان

لقد لوحظ أن قطرات الزيت تكتسب شحنات كهربائية . غالبا ما تكون سالبة . نتيجة لاحتكاكها بالهواء أثناء عملية الرش (ولكنها قد تشحن أيضا نتيجة لتأين الهواء بين اللوحين وذلك بتسليط أشعة اكس مثلا) .

لنفرض ان احدى هذه القطرات قد اكتسبت شحنة كهربائية سالبة قدرها q . وان المجال الكهربائي المنتظم بين اللوحين كان متجها نحو الاسفل . لوجدنا أن هناك ثلاث قوى تؤثر على هذه القطرة . كما مبين في الشكل (٢-١٥أ) وهي :



الشكل ٢-١٥
(أ) قطرة الزيت وهي ساكنة
(ب) قطرة الزيت تسقط بسرعة v

١- القوة الكهربائية F نحو الاعلى .
٢- وزن القطرة mg نحو الاسفل .
٣- القوة الدافعة للهواء buoyant force (B) نحو الاعلى .

وبتغيير شدة المجال الكهربائي يمكننا موازنة القطرة وابقائها معلقة في المجال بين اللوحين عند نقطة معينة . عندئذ يكون :

$$q E + B = m g$$

وبالتعويض عن m التي تساوي حجم القطرة مضروباً في كثافتها وعن B التي تساوي حجم الهواء المزاح (الذي حجمه بقدر حجم القطرة) مضروباً في كثافة الهواء وفي التعجيل الارضي g ينتـــــج :

$$q E + (4/3) \pi R^3 d g = (4/3) \pi R^3 D g$$

حيث R تمثل نصف قطر القطرة و D كثافة الزيت و d كثافة الهواء . وبتبسيط هذه المعادلة نحصل على

$$q E = (4/3) \pi R^3 g (D - d) \qquad (٢٠-٢)$$

ولحساب مقدار الشحنة q التي تحملها القطرة . نجد ان جميع الكميات في هذه المعادلة يمكن قياسها بسهولة . عدا R التي تمثل نصف قطر هذه القطرة الصغيرة جداً . والتي لا يمكن قياسها بصورة مباشرة . وقد استخدم مليكان قانون ستوكس Stoke's law في اللزوجة لحساب R . وينص هذا

القانون على ان قوة الاحتكاك التي تؤثر على كرة نصف قطرها R ، تسقط في مائع fluid معامل لزوجته η بسرعة مقدارها v هي

$$f = 6\pi\eta R v$$

فاذا أزيل المجال الكهربائي وتركت القطرة تسقط بفعل الجاذبية الارضية لوجدنا ان سرعتها تزداد حتى تصل قيمة ثابتة هي v ، عندها يحدث التوازن ويصبح مجموع القوى المؤثرة عليها صفراً ، (انظر الى الشكل ٢-١٥ب) . وهذه القوى هي :

١- وزن القطرة mg نحو الأسفل ،

٢- القوة الدافعة للهواء B نحو الاعلى

٣- قوة اللزوجة f نحو الاعلى

أي أن

$$f + B = mg$$

وبالتعويض عن كل قوة بما تساويه ينتج

$$6\pi\eta R v + \frac{4}{3}\pi R^3 dg = \frac{4}{3}\pi R^3 D g$$

وبتبسيط هذه المعادلة نحصل على

٢١ - ٢

$$2R^2 g(D - d) = 9\eta v$$

وبقياس سرعة سقوط القطرة يمكن حساب نصف قطرها R . حيث أن كل من D، d، g، η هي كميات معلومة . وعندئذ يصبح بالامكان حساب الشحنة q التي تحملها القطرة من المعادلة (٢-٢٠) .

لقد قاس مليكان ومساعدوه شحنات بضع آلاف من قطرات الزيت . ووجدوا أن شحنة أي قطرة لا يمكن أبداً أن تكون أقل من كمية معينة . كما أن شحنة كل قطرة دائماً تساوي مضاعفات صحيحة لهذه الكمية الأساسية . وبذلك استنتجوا أنه لا يمكن الحصول على شحنة أقل من هذه الشحنة الأساسية التي يجب أن تكون شحنة الالكترون (e) وقدرها

$$e = 1.6 \times 10^{-19} C$$

قانون كاوس (Gauss's Law)

قبل دراسة قانون كاوس واستخداماته يجب التعرف على ما يسمى بفيض المجال الكهربائي (φ_E) الذي يعرَّف بأنه **عدد خطوط القوة الكهربية التي تخترق بصورة عمودية مساحة (A)** ، أي:

$$\varphi_E = \int \mathbf{E}.\mathbf{dA} = E \,.\, A$$

أما **قانون كاوس** فإن نصه هو:

العلاقة بين فيض المجال الكهربائي (φ_E) التي تنفذ عمودياً من سطح افتراضي مغلق ، وقيمة الشحنة الكلية التي يحتويها هذا السطح داخله.

ويمكن كتابته بالصورة الرياضية التالية:

$$\varphi_E = \oint E.dA = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

اشتقاق قانون كاوس من قانون كولوم

نفرض شحنة نقطية (q)، داخل سطح مغلق على شكل كرة نصف قطرها (R).

وعليه فان شدة المجال الكهربي عند أية نقطة على سطح الكرة تساوي:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{q}{R^2}$$

أما فيض المجال الكهربي من السطح (الكروي) المغلق فهو:

$$\varphi_E = \oint E.dA = E.A = E.(4\pi R^2)$$

حيث ان $A = 4\pi R^2$ المساحة السطحية للكرة، وبتعويض قيمة (E) من قانون كولوم نجد:

$$\varphi_E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{q}{R^2}(4\pi R^2)$$

$$\therefore \varphi_E = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

وهو قانون كاوس.

تطبيقات قانون كاوس:

بإستخدام قانون كاوس يمكن حساب شدة المجال الكهربي الناتج عن توزيع منتظم للشحنات وبتماثل تام. وبناءاً على هذا يمكننا حساب شدة المجال الكهربي للكرات المشحونة وللأسطوانات الطويلة وكذلك للصفائح المستوية الواسعة، لحساب شدة المجال الكهربي هناك بعض الخطوات العامة التي من الممكن إتباعها، وهي:

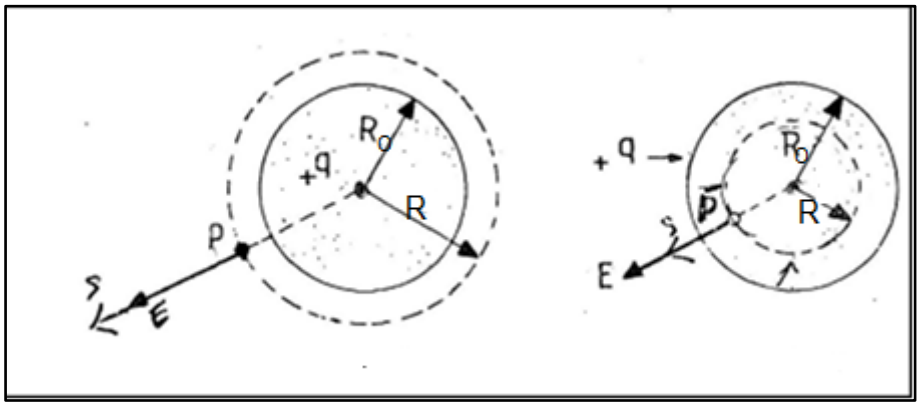
(1) نفترض وجود سطح مغلق- وفق الشكل الهندسي - يحيط بالشحنات المعينة ويمر بالنقطة المراد حساب شدة المجال عندها.

(2) حساب التكامل الخاص بفيض المجال الكهربي.

(3) نحسب الشحنة الكلية (q) الموجودة داخل السطح المغلق، ثم نعوض قيمتها في قانون كاوس لنحصل على قيمة المجال.

تطبيقات لقانون كاوس:

سنحاول حساب المجال الكهربي عند نقطتين، إحداهما خارج الكرة والأخرى داخلها. في كلتا الحالتين سنفترض أن السطح المغلق هو كرة نصف قطرها(R).



الشكل يوضح : أ- المجال خارج الكرة ، ب- المجال داخل الكرة

١ ـ المجال الكهربائي لكرة مصمتة من مادة عازلة:

نفترض أن نصف قطر الكرة هو (R_0) وأن شحنتها موجبة وكثافتها الحجمية (ρ). سنحاول حساب شدة المجال الكهربي لنقطة تقع خارج الكرة وأخرى داخلها وثالثة على سطحها.

أ- المجال داخل الكرة:

نختار سطحاً كروياً مغلقاً نصف قطره (R) أصغر من نصف قطر الكرة، ($R_O<R$). ونلاحظ هنا أن السطح المغلق يحوي جزءاً من الشحنة الكلية يمكن تحديده بنفس الطريقة السابقة، لنفرض لهذا الجزء من الشحنة (q_1)، أي:

$$q_1 = (4/3\,\pi R^3).\rho$$

بالتعويض في قانون كاوس، نجد:

$$\varphi_E = \oint E.dA = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

ومنه فإن:

$$E(4\pi R^2) = \frac{q_1}{\varepsilon_0} = \frac{4\pi R^3 \rho}{3\varepsilon_0}$$

$$E(4\pi R^2) = \frac{4\pi R^3 \rho}{3\varepsilon_0}$$

$$\mathbf{E = (\frac{\rho}{3\varepsilon_0})\,R}$$

المعنى الفيزيائي: ان شدة المجال تتناسب تناسبا طرديا مع نصف القطر، أي كلما زاد نصف القطر زادت شدة المجال.

ب- المجال خارج الكرة:

نختار السطح المغلق الذي نصف قطرها (R) أكبر من نصف قطر الكرة، $(R > R_o)$، فنجد:

$$\oint E.dA = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

$$\because A = 4\pi R^2$$

$$\oint E.dA = E\oint dA = E(4\pi R^2) = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

وواضح أن (q) هي الشحنة الكلية للكرة وذلك لوقوعها داخل السطح المغلق. يمكن حساب (q) بضـــرب حجـــم الكـــرة $(\frac{4}{3}\pi R_0^3)$ في الكثافة الحجمية للشحنات **(ρ)**، أي ان:

$$q = (\frac{4}{3}\pi R_0^3)\ \rho$$

نعوض عن q في المعادلة السابقة لقانون كاوس نجد ان:

$$E\oint dA = E(4\pi R^2) = \frac{4}{3}\pi R_0^3 \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

وسنجد بسهولة أن:

$$\therefore\ E = (\frac{\rho}{3\varepsilon_0}).(\frac{R_0^3}{R^2})$$

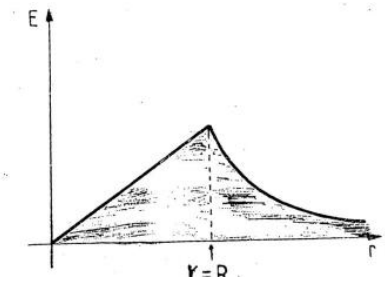
المعنى الفيزيائي: ان شدة المجال تتناسب تناسبا عكسيا مع نصف القطر، أي كلما زاد نصف القطر قلت شدة المجال.

ج- المجال على سطح الكرة:

يمكننا إيجاد المجال الكهربي على سطح الكرة، أي عندما يتساوى نصف قطر السطح المغلق مع نصف قطر الكرة، وذلك بتعويض $(R_0 = R)$، في معادلة المجال خارج الكرة، أي:

$$E = (\frac{\rho}{3\varepsilon_0})\frac{R_0^3}{R_0^2}$$

$$\therefore\ E = (\frac{\rho}{3\varepsilon_0})R_0$$



الجهد الكهربائي (Electric Potential)

يعرّف **مقدار الشغل اللازم لنقل وحدة الشحنات الكهربائية بين النقطتين بأنه مقدار فرق الجهد بين النقطتين** ويمكن التعبير عنه رياضيا كالآتي:

$$V_{a\to b} = \frac{W_{a\to b}}{q} .....[\frac{\text{Joule} \quad (J)}{\text{Coulomb} \quad (C)} = \text{Volt} \quad (V)]$$

حيث أن :

$V_{a\to b}$: فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين.

$W_{a\to b}$: الشغل الكهربائي لنقل الشحنة الكهربائية من ($a \to b$) .

إن وحدة قياس فرق الجهد هي الفولت (Volt (V)) ، ويعبّر عن فروق الجهد الصغيرة بالملي فولت ورمزه (mV) وتساوي (10^{-3}V) ، أو مايكرو فولت (μV) وتساوي ($10^{-6}V$) ، أما فروق الجهد الكبيرة فيعبّر عنها بالكيلو فولت (kV) وتساوي (10^{3}V) أو ميكا فولت (MV) وتساوي (10^{6}V) .

أما بالنسبة لفرق الجهد الكهربائي لشحنة عند نقطة (شحنة نقطية) فإنه يعطى بالعلاقة الآتية:

$$E = \frac{V}{r} \quad \to \quad V = E\,r$$

$$V = E\,r \quad \to \quad V = k\frac{q}{r^2}\,r$$

$$V = k\frac{q}{r}$$

مثال : إذا كان فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي يساوي $(3V)$ ، فما هو الشغل اللازم لتحريك شحنة مقدارها $(5C)$ بين هاتين النقطتين ؟

الحل :

$$V_{a\to b} = \frac{W_{a\to b}}{q}$$

مقدار الشغل اللازم هو :

$$W = Vq = 3\times 5$$

$$\boxed{W = 15 \quad \text{Joule}}$$

مثال : شحن سطح كروي مجوف بشحنة مقدارها $(2\mu C)$. جد الجهد في نقطة تبعد $(10cm)$ عن مركز الكرة ، مع العلم أن هذه المسافة هي أكبر من نصف قطر الكرة ؟

الحل :

مقدار الجهد في نقطة :

$$V = k\frac{q}{r}$$

$$V = (9\times 10^{9})\frac{(2\times 10^{-6})}{(0.1m)}$$

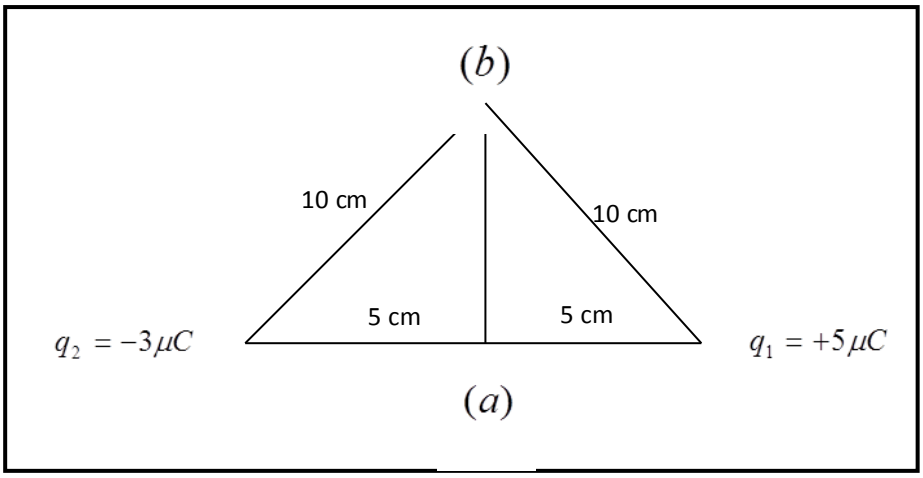
$$\boxed{V = 1.8\times 10^{5} \quad \text{Volt}}$$

مثال : وضعت الشحنتان ($+5\mu C$ و $-3\mu C$) على رأسي مثلث متساوي الأضلاع طول ضلعه ($10cm$) كما في الشكل الآتي، احسب:

١- جهد النقطة (a)؟

٢- جهد النقطة (b)؟

٣- مقدار الشغل اللازم لنقل شحنة مقدارها ($6\mu C$) من النقطة (a) إلى النقطة (b) ؟



الحل : -

$$V_a = V_1 + V_2$$

١ - حساب جهد النقطة (a) :

$$V_a = k\frac{q_1}{r_1} + k\frac{q_2}{r_2}$$

$$V_a = (9\times10^9)\frac{(5\times10^{-6})}{(5\times10^{-2})} + (9\times10^9)\frac{(-3\times10^{-6})}{(5\times10^{-2})}$$

$$\boxed{V_a = 3.6\times10^5 \text{Volt}}$$

٢ - حساب جهد النقطة (b) :

$$V_b = k\frac{q_1}{r_1} + k\frac{q_2}{r_2}$$

$$V_b = (9\times10^9)\frac{(5\times10^{-6})}{(10\times10^{-2})} + (9\times10^9)\frac{(-3\times10^{-6})}{(10\times10^{-2})}$$

$$\boxed{V_b = 1.8\times10^5 \text{Volt}}$$

٣ - حساب مقدار الشغل اللازم لنقل شحنة مقدارها ($6\mu C$) من النقطة (a) إلى النقطة (b) :

$$W_{ab} = q(V_b - V_a)$$

$$W_{ab} = (6\times10^{-6})(1.8\times10^{5} - 3.6\times10^{5})$$

$$\boxed{W_{ab} = -1.08 \quad \text{Joule}}$$

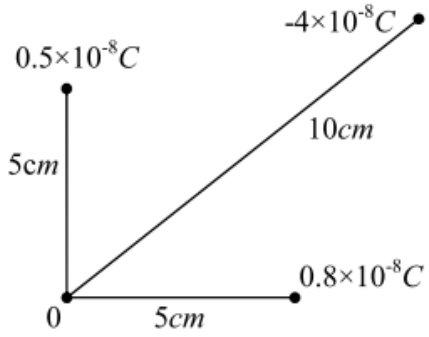
مثال

ثلاث شحنات نقطية $0.5\times10^{-8}C$ و $-4\times10^{-8}C$ و $0.8\times10^{-8}C$ جميعها واقعة في المستوي xy ومثبتة في المواقع المؤشرة في الشكل (9-4). جدْ مقدار

1- الجهد الكهربائي عند نقطة الأصل 0 الناشئ عن الشحنات.

2- الشغل اللازم إنجازه لإحضار إلكترون إلى النقطة 0 من مسافة بعيدة جداً.

الحل :



الشكل (9-4).

1- الإسهامات المختلفة في الجهد عند النقطة 0 هي :

$$V_1=9\times10^9\frac{0.5\times10^{-8}}{0.05}=900\ V$$

$$V_2=9\times10^9\frac{-4\times10^{-8}}{0.1}=-3600\ V$$

$$V_3=9\times10^9\frac{0.8\times10^{-8}}{0.05}=1440\ V$$

والجهد الكلي عند 0 هو:

$$V=V_1+V_2+V_3$$

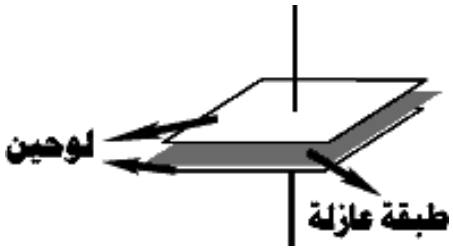
$$V=900+(-3600)+1440=-1260\ V$$

2- الشغل المطلوب إنجازه لإحضار إلكترون بعيد جداً هو :

$$W=qV=(-1.6\times10^{-19})(-1260)=2\times10^{-16}J$$

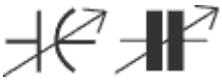
المتسعات (المكثفات) Capacetors

تتركب **المتسعة** في أبسط اشكالها من لوحين من مادة موصلة يفصل بينهما اما الهواء او مادة عازلة. والمتسعات تعتبر من العناصر المهمة في تركيب الدوائر الكهربائية والإلكترونية، وذلك للاسباب التالية:



- خزن الطاقة الكهرومغناطيسية.
- توليد الموجات الكرومغناطيسية.
- في دوائر تقويم الموجات.
- التوليف او التنغيم في دوائر الراديو.
- احداث شرارة الاشتعال في السيارات.

اضافة الى العديد من الاستخدامات الاخرى.



متسعة متغيرة

متسعة ثابتة

سعة المتسعة:

نعني بسعة المتسعة (C) مقدرتها على تخزين الشحنة الكهربائية لوحدة الجهد (V)، أي أن:

$$C = \frac{Q}{V}$$

- تقاس السعة الكهربائية بوحدة تسمى الفاراد (F)، الذي يمثل النسبة بين الكولوم والفولت.
- سطحا المتسعة يحمل أحدهما شحنة (+ Q) والآخر شحنة (Q -). وتعتمد كمية الشحنة المخزونة داخل المتسعة على جهد المصدر V، وعلى سعة المتسعة C، حيث: $Q=C\times V$
- و الفاراد وحده كبيره حيث يطلق على المتسعة أن سعته تساوي 1 فاراد ، إذا قام بتخزين شحنة قدرها 1 كولوم عند توصيله بمصدر جهد شدته 1 فولت .

لحساب سعة أي متسعة يجب أن نحسب شدة المجال الكهربائي (E) من أجل حساب قيمة فرق الجهد بين السطحين، ثم نعوِّض في معادلة السعة السابقة.

العوامل المؤثرة على سعة المتسعة:

يوجد ثلاثة عوامل أساسية تؤثر على سعة المتسعة بصورة مباشرة وهذه العوامل هي:

أ- المساحة السطحية لألواح المتسعة (A):

إن سعة المتسعة تتناسب طرديا مع المساحة السطحية للألواح، فإذا زادت مساحة سطح اللوح زادت سعة المتسعة وذلك لزيادة استيعابه للشحنات الكهربائية، وبالعكس تقل سعة المكثف كلما قلت هذه المساحة.

ب- المسافة بين الألواح (d):

تقل السعة عندما تزداد المسافة بين الألواح وتزداد كلما قلت تلك المسافة أي أنه يوجد تناسب عكسي بين سعة المتسعة والمساحة بين ألواح المتسعة.

ج- الوسط العازل (المادة العازلة) ε:

تتغير سعة المكثف بتغير المادة العازلة بين الألواح ويعتبر الهواء الوحدة الأساسية لمقارنة قابلية عزل المواد الأخرى المستعملة في صناعة المتسعة. يوجد لكل مادة ثابت عزل يطلق عليه ابسلون ε

مما سبق نجد أن سعة المتسعة بدلالة المساحة السطحية للألواح (A) والمساحة بين الألواح d وثابت العزل للمادة العازلة **ε** يكون:

$$\mathbf{C = \frac{\varepsilon \times A}{d}}$$

أنواع المتسعات:

تصنف المتسعات أما وفقاً لشكلها الهندسي أو وفقاً لنوع المادة العازلة أو وفقاً للقطبية.

أولاً: وفقاً لنوع العازل:

* متسعة هوائية (المادة العازلة هي الهواء)
* متسعة ورقية (المادة العازلة هي الورق)
* متسعة سيراميكية (المادة العازلة هي السيراميك)
* متسعة كيميائية (المادة العازلة هي حامض كيميائي)

ثانياً: وفقاً للقطبية:

تنقسم المتسعات حسب قطبيتها إلى نوعين هما المتسعة **المستقطبة** و المتسعة غير **المستقطبة** التي ليس **لها** قطب موجب وآخر سالب.

ثالثاً: حسب الشكل الهندسي:

١ـ المتسعة ذو اللوحين المتوازيين:

يتكون من لوحين معدنيين متوازيين تفصل بينهما مسافة صغيرة (d) مقارنة بأبعادهما. فإذا كانت مساحة اللوح الواحد (A) والشحنة على اللوح الأول (+Q) وعلى الآخر (-Q)، فإن شدة المجال الكهربي بين اللوحين، حسب قانون كاوس، تساوي:

$$E.A = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 . A}$$

لنحسب فرق الجهد (V) بين اللوحين:

$$V = \int_0^d E.dx$$

$$V = E.d$$

$$V = \frac{Q}{\varepsilon_0 . A} . d$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{Q.\ d}{\varepsilon_0 . A}}$$

وعليه فإن سعة المتسعة في الفراغ تساوي:

$$\mathbf{C = \frac{\varepsilon_0 \times A}{d}}$$

ويتبين من هذه العلاقة أن سعة المكثف متوازي اللوحين تزيد بزيادة مساحة اللوح الواحد وتنقص بزيادة المسافة بين اللوحين.

٢ـ المتسعة متعددة الألواح:

هو متسعة بها عدد (N) من الألواح المتوازية. ولما كانت الشحنة تخزن في المادة العازلة وعدد العوازل في هذا المتسعة هو (N-1)، فإن سعة هذا المتسعة هي:

$$\mathbf{C = (N-1)\frac{\varepsilon_0 A}{d}}$$

٣ـ المتسعة الكروية:

المتسعة الكروية هي عبارة عن موصلين كرويين متحدي المركز نصفي قطريهما الداخلي (a)، والخارجي (b).

نتصور سطحاً مغلقاً نصف قطره (R) حيث (a > R > b) فيكون:

$$\mathbf{\int_0^{4\pi R^2} E.dA = \frac{Q}{\varepsilon_0}}$$

$$\mathbf{E(4\pi R^2) = \frac{Q}{\varepsilon_0}}$$

$$\mathbf{E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} . \frac{Q}{R^2}}$$

أما فرق الجهد بين الكرتين فهو:

$$V = -\int_b^a E.dR = \int_a^b \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R^2}.dR = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\int_b^a \frac{dR}{R^2} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}(\frac{1}{a} - \frac{1}{b})$$

وعليه فإن سعة هذا المتسعة الكروية هي:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q \times 4\pi\varepsilon_0}{Q(\frac{1}{a} - \frac{1}{b})} = \frac{4\pi\varepsilon_0}{(\frac{1}{a} - \frac{1}{b})}$$

$$C = 4\pi\varepsilon_0 \frac{ab}{(b-a)}$$

٤ـ المتسعة الأسطوانية:

يتركب من أسطوانتين متحدتي المركز نصفي قطريهما الداخلي والخارجي (a) و(b) على الترتيب وطول كل منهما (L).

الآن لنفرض سطحاً مغلقاً أسطوانياً طوله (L) ونصف قطره (R) حيث(a > R > b).

وعليه فإن:

$$\oint E.dA = E(2\pi RL) = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

ومنه:

$$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0 R}.\frac{Q}{L}$$

إذن:

$$V = -\int_b^a E.dR = \int_a^b E.dR$$

$$V = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}.\frac{Q}{L}\int_a^b \frac{dR}{R} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}.\frac{Q}{L}(\ln b - \ln a)$$

$$V = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 L}.\ln\frac{b}{a}$$

وعليه فإن سعة هذا المتسعة الاسطوانية تعطى بالعلاقة التالية:

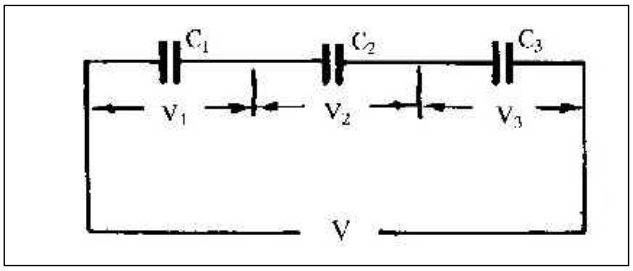
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q \times 2\pi\varepsilon_0 L}{Q \times \ln\frac{b}{a}}$$

$$\therefore\ C = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\ln\frac{b}{a}}$$

توصيل المتسعات:

يمكن توصيل المتسعات بطرق مختلفة وذلك للحصول على قيم كبيرة أو صغيرة مقارنة بالقيم الأصلية للسعة الكهربائية.

أولاً: التوصيل على التوالي:



مميزات هذا الربط هي:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

ولكن، $(V = Q/C)$، وعليه فإن:

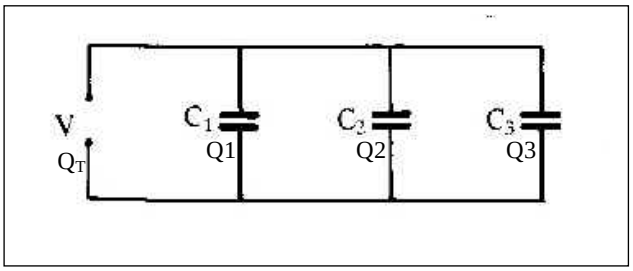
$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

وبالقسمة على (Q) نجد السعة الكلية:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

ثانياً:التوصيل على التوازي:

مميزات هذا الربط هي:



$$\mathbf{V = V_1 = V_2 = V_3}$$

$$\mathbf{Q = Q_1 + Q_2 + Q_3}$$

ولكن (Q = C V) ومنه نجد:

$$CV = C_1V + C_2V + C_3V$$

وبالقسمة على (V) نجد:

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

طاقة المتسعة المشحونة:

لنفترض في لحظة ما أن الشحنة على أيٍ من سطحي المتسعة هي (Q)، وأن فرق الجهد بين السطحين هو (V). إذا مرت شحنة صغيرة (dQ) بين السطحين عبر فرق الجهد (V) فإن الشغل اللازم لذلك هو:

$$\mathbf{dW = V.dQ}$$

أما الشغل (**W**)، فهو يساوي:

$$\mathbf{W = \int V.dQ}$$

ولكن **(V = Q/C)** :

$$\therefore\ \mathbf{W = \int_0^Q \frac{Q}{C}.dQ}$$

$$\mathbf{W = \frac{1}{2}.\frac{Q^2}{C}}$$

وبتعويض (Q = V C) نجد:

$$\mathbf{W = \frac{1}{2}.V^2\,C}$$

وكذلك بتعويض **(C = Q/V)** :

$$W = \frac{1}{2}.QV$$

ويرمز، عادة، للطاقة المخزونة بالرمز (U)، أي أن:

$$U = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}V^2C = \frac{1}{2}QV$$

فقدان الطاقة بين متسعتين:

إذا فرضنا وجود سطح متسعة شحنتها موجبة وسعته (C_1) وجهده (V_1) ووصلت بسطح آخر شحنته موجبه وسعته (C_2) وجهده (V_2)، حيث ($V_1>V_2$)، فإن هذين السطحين سيتقاسمان الشحنة، مما يجعل الجهد متساوي عند جميع نقاط اللوح.

الجهد المشترك (V) يمكن حسابه كالآتي:

$$C_1V_1 + C_2V_2 = (C_1 + C_2)V$$

$$V = \frac{C_1V_1 + C_2V_2}{C_1 + C_2}$$

وتكون الطاقة قبل التوصيل هي:

$$\frac{1}{2}C_1V_1^2 + \frac{1}{2}C_1V_1^2$$

أما الطاقة بعد التوصيل فهي:

$$\frac{1}{2}(C_1 + C_2)V^2$$

وبتعويض قيمة (V) نجد أن الطاقة بعد التوصيل تساوي:

$$\frac{1}{2}(C_1 + C_2)V^2 = \frac{1}{2}\frac{(C_1V_1 + C_2V_2)}{(C_1 + C_2)}$$

ولهذا فإن الفرق في الطاقة (ΔU) قبل وبعد التوصيل هو:

$$\Delta U = \frac{1}{2}C_1 V_1^2 + \frac{1}{2}C_2 V_2^2 - \frac{1}{2}\frac{(C_1 V_1 + C_2 V_2)^2}{(C_1 + C_2)}$$

$$\Delta U = \frac{(C_1 + C_2)(C_1 V_1^2 + C_2 V_2^2) - (C_1 V_1 + C_2 V_2)^2}{2(C_1 + C_2)}$$

بإجراء الحسابات المعتادة نجد أن الفقد في الطاقة، يساوي:

$$\Delta U = \frac{C_1 C_2 (V_1^2 - V_2^2)}{2(C_1 + C_2)}$$

وهذا المقدار يكون موجباً عندما $(V_1 \neq V_2)$.

والفرق في الطاقة يظهر على صورة شرارة أو إرتفاع في درجة الحرارة.

مثال:

متسعتان سعة الأولى $(20\ \mu F)$، وفرق الجهد بين طرفيها $(1000\ V)$، والآخرى سعتها $(10\ \mu F)$وفرق الجهد بين طرفيها $(100\ V)$، أحسب:

(i) الطاقة الكلية قبل توصيلهما.

(ii) الفقد في الطاقة بعد توصيلهما.

(iii) الجهد العام.

الحل:

(I) شحنة المتسعة الأولى هي:

$$Q_1 = C_1 V_1 = 20\times10^{-6}\times1000 = 0.02C$$

شحنة المتسعة الثانية هي:

$$Q_2 = C_2 V_2 = 10\times10^{-6}\times100 = 0.001C$$

أما السعة الكلية فهي:

$$C = C_1 + C_2 = 30\times10^{-6}\ C$$

الطاقة قبل التوصيل هي:

$$U_1 = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 + \frac{1}{2} C_2 V_2^2 =$$

$$U^1 = \frac{1}{2}\times20\times10^{-6}\times(1000)^2 + \frac{1}{2}\times10\times10^{-6}\times(100)^2$$

$$U^1 = 10.05\ J$$

الطاقة بعد التوصيل هي:

$$U_2 = 1/2\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}\frac{(0.02+0.001)^2}{30\times10^{-6}}$$

$$U_2 = 7.55\ J$$

(II) الفقد في الطاقة هو:

$$dU = dU_1 - dU_2 = 10.05 - 7.5 = 2.5\ J$$

(III) الجهد العام هو:

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{(0.02+0.001)}{30\times10^{-6}} = 700\ V$$

مثال/ متسعة ذات صفيحتين متوازيين المسافة بين صفيحتيها (5mm) ومساحة كل منهما ($1m^2$) فاذا وضعت الصفيحتان بالفراغ وشحنتا حتى أصبح فرق الجهد بينهما (2×10^4 V) احسب :

1- سعة المتسعة 2- شحنة أي من صفيحتيها

الحل/

$$1-\quad C=\frac{\varepsilon_o A}{d}=\frac{8.85\times10^{-12}\times1}{5\times10^{-3}}=1.77\times10^{-9}\,F=1770\,pF$$

$$2-\quad Q=C\,\Delta V=1.77\times10^{-9}\times2\times10^{4}=3.54\times10^{-5}\,C$$

مثال/ متسعة ذات صفيحتين متوازيتين سعتها 5μF وصلت ببطارية فرق جهدها 200V جد :

1- الشحنة التي سوف تتكون على صفيحتي المتسعة .

2- لو ادخل بين صفيحتي المتسعة مادة عازلة ثابت عزلها (2) كم تصبح شحنة المتسعة .

3- لو قطع الاتصال بين صفيحتي المتسعة والمصدر بعد ذلك ثم اخرج العازل كم تصبح الشحنة وكم يصبح فرق الجهد بين صفيحتي المتسعة .

الحل/

1- $Q=C\,.\,\Delta V=5\times200=1000\mu C$

2- $Q_k=k\,Q=2\times1000=2000\mu C$

3- $Q=Q_k=2000\mu C$ (لان المتسعة فصلت عن المصدر)

$$\Delta V=\frac{Q}{C}=\frac{2000}{5}=400V$$

مثال/ اذا كانت سعة متسعة متصلة بمصدر 10μF ومقدار الشحنة على أي من صفيحتيها 400μC فاذا ادخل عازل ثابت عزله الكهربائي 2 بين الصفيحتين والمتسعة لا زالت متصلة بالمصدر ما مقدار:

1- سعة المتسعة بعد ادخال العازل.

٢- الطاقة المختزنة بين الصفيحتين قبل وبعد العازل.

الحل/

1- $C_k=k\,C=2\times10=20\mu F$

2- $\Delta V=\frac{Q}{C}=\frac{400}{10}=40V$

$Q_k=k\,Q=2\times400=800\mu C$

$$PE=\frac{1}{2}\Delta V.Q=\frac{1}{2}\times40\times400\times10^{-6}=8000\times10^{-6}=8\times10^{-3}\,J$$

$$PE_k=\frac{1}{2}\Delta V_k.Q_k=\frac{1}{2}\times40\times800\times10^{-6}=16000\times10^{-6}=16\times10^{-3}\,J$$

or $PE_k=kPE=2\times8\times10^{-3}=16\times10^{-3}J$

مثال/ متسعة ذات الصفيحتين المتوازيتين سعتها $20\mu F$ شحنت بوساطة بطارية فرق الجهد بين قطبيها $6V$ ثم ادخل عازل كهربائي بين صفيحتيها والمتسعة لازالت متصلة بالبطارية فاصبحت سعتها $60\mu F$ ما مقدار:

1- ثابت العزل الكهربائي للوح العازل.
2- الشحنة عل أي من صفيحتي المتسعة بعد ادخال العازل.
3- الطاقة المختزنة في المجال الكهربائي بين الصفيحتين قبل وبعد ادخال العازل.
4- المجال الكهربائي بين الصفيحتين بعد ادخال العازل اذا كان البعد بين الصفيحتين $0.5cm$.

الحل/

1- $k = \frac{C_k}{C} = \frac{60}{20} = 3$

2- $Q_k = C_k \cdot \Delta V_k = 60\times6=360\mu C$

or $Q = C \cdot \Delta V = 20 \times 6 = 120\mu C$

$Q_k = k\,Q = 3 \times 120 = 360\mu C$

3- $PE = \frac{1}{2}\Delta V.Q = \frac{1}{2}\times6\times120\times10^{-6} = 360\times10^{-6} = 36\times10^{-5}\,J$

$PE_k = \frac{1}{2}\Delta V_k.Q_k = \frac{1}{2}\times6\times360\times10^{-6} = 1080\times10^{-6} = 108\times10^{-5}\,J$

or $PE_k = kPE = 3\times36\times10^{-5} = 108\times10^{-5}\,J$

4- $E_k = \frac{\Delta V_k}{d} = \frac{6}{0.5\times10^{-2}} = 1200\,V/m$

مثال/ متسعة ذات الصفيحتين المتوازيتين البعد بينهما $0.5cm$ ومساحة الصفيحة $25cm^2$ يفصل بينهما عازل ثابت عزله 5 ربطت لمصدر فرق جهده الكهربائي $100V$ احسب :

1- سعة المتسعة 2- شحنة المتسعة 3- الطاقة المختزنة في المجال الكهربائي بين صفيحتي المتسعة

الحل/

1- $C_k = k\varepsilon_o \frac{A}{d} = 5\times8.85\times10^{-12}\times\frac{25\times10^{-4}}{0.5\times10^{-2}} = 221.25\times10^{-13}\,F$

2- $Q_k = C_k \cdot \Delta V = 221.25\times10^{-13}\times100 = 221.25\times10^{-11}C$

3- $PE_k = \frac{1}{2}\Delta V.Q_k = \frac{1}{2}\times100\times221.25\times10^{-11} = 11062.5\times10^{-11}\,J$

مثال/ متسعتان (C_1,20μF) موصولتان على التوازي وكانت السعة المكافئة لهما 30μF والمجال الكهربائي بين صفيحتي المتسعة (C_1) 5000V/m والبعد بين صفيحتيها 0.4cm احسب :

١- سعة المتسعة (C_1). 2- فرق جهد كل متسعة وفرق الجهد الكلي 3- الشحنة المختزنة في كل متسعة

4- الطاقة المختزنة الكلية .

الحل/

1- $C_{eq} = C_1 + C_2 \Rightarrow 30 = C_1 + 20 \Rightarrow C_1 = 30 - 20 = 10\mu F$

2- $E_1 = \frac{\Delta V_1}{d} \Rightarrow 5000 = \frac{\Delta V_1}{0.4\times10^{-2}} \Rightarrow \Delta V_1 = 5000\times4\times10^{-3} = 20V$

∵ الربط توازي لذلك $\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V_T = 20V$

3- $Q_1 = C_1 . \Delta V_1 = 10 \times 20 = 200\mu C$, $Q_2 = C_2 . \Delta V_2 = 20 \times 20 = 400\mu C$

$Q_T = Q_1 + Q_2 = 200 + 400 = 600\mu C$

4- $PE_T = \frac{1}{2}\Delta V_T . Q_T = \frac{1}{2}\times20\times600\times10^{-6} = 6\times10^{-3} J$

مثال/ متسعة مشحونة سعتها 6μF وفرق جهدها 30V وصلت على التوازي مع متسعة أخرى غير مشحونة فأصبح فرق جهد المجموعة بعد التوصيل 20V ما سعة المتسعة الثانية وما شحنة كل منهما بعد التوصيل ؟

الحل/

قبل التوصيل:

$Q_1 = C_1 . \Delta V_1 = 6 \times 30 = 180\mu C$, $Q_2 = 0$ (غير مشحونة)

بعد التوصيل:

$Q_T = Q_1 + Q_2 = 180 + 0 = 180\mu C$

$C_{eq} = \frac{Q_T}{\Delta V_T} = \frac{180}{20} = 9\mu F$

$C_{eq} = C_1 + C_2 \Rightarrow 9 = 6 + C_2 \Rightarrow C_2 = 9 - 6 = 3\mu F$

$Q_1 = C_1 . \Delta V_1 = 6 \times 20 = 120\mu C$, $Q_2 = C_2 \times \Delta V_2 = 3 \times 20 = 60\mu C$

مثال/ متسعتان سعة كل منهما 2μF الأولى مشحونة فرق جهدها 60V والثانية غير مشحونة وضع بين صفيحتي الثانية بدل الهواء عازل ثابت عزله (4) ثم وصلت على التوازي مع الأولى ، ما فرق جهد المجموعة وشحنة كل متسعة ؟

الحل/

$Q_1 = C_1\Delta V_1 = 2\times60 = 120\mu C$, $C_{2k} = KC_2 = 4\times2 = 8\mu F$

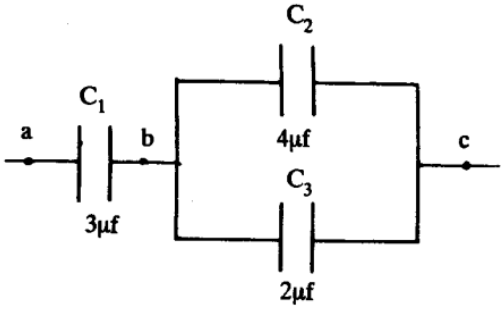
بعد ربط المتسعتين مع بعض على التوازي فان

$Q_{total} = Q_1 = 120\mu C$, $C_{eq} = C_1 + C_{2k} = 2 + 8 = 10\mu F$

$\Delta V_{total} = \frac{Q_{total}}{C_{eq}} = \frac{120}{10} = 12V$

$Q_1 = C_1\Delta V = 2\times12 = 24\mu C$, $Q_2 = C_2\times\Delta V = 8\times12 = 96\mu C$

مثال/ احسب السعة المكافئة للمتسعات والشحنة الكلية في الشكل المجاور؟



الحل/ المتسعتان C_2, C_3 مربوطة على التوازي والسعة.

المكافئة لهما C هي:

$$\therefore \quad C = C_2 + C_3 = 4 + 2 = 6\,\mu F$$

هذه السعة المكافئة متصلة على التوالي مع C_1 وبذلك تكون الـ C_0 هي كالتالي:

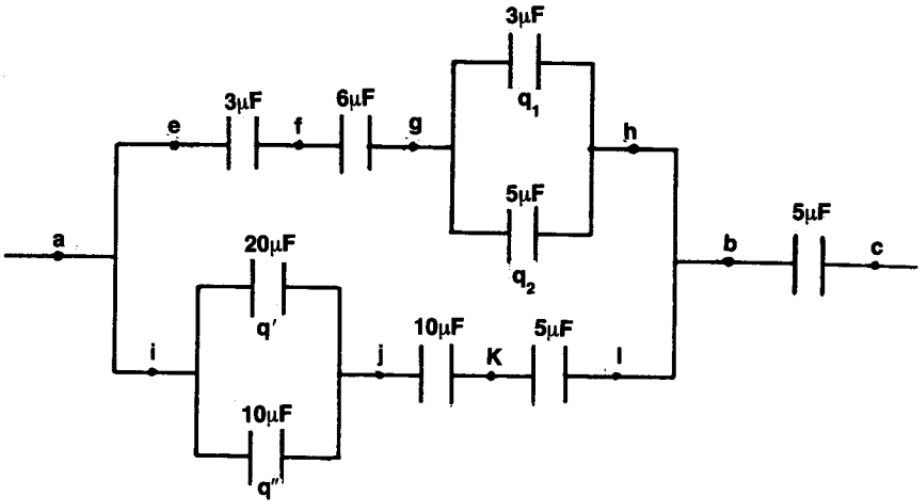
$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_1} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} = \frac{1}{2}$$

$$\therefore C_0 = 2\mu F$$

وتكون الشحنة على هذه المكثفة المكافئة هي:

$$Q = C_0 V = 2 \times 10^{-6} \times 1200 = 2.4 \times 10^{-3}\ C$$

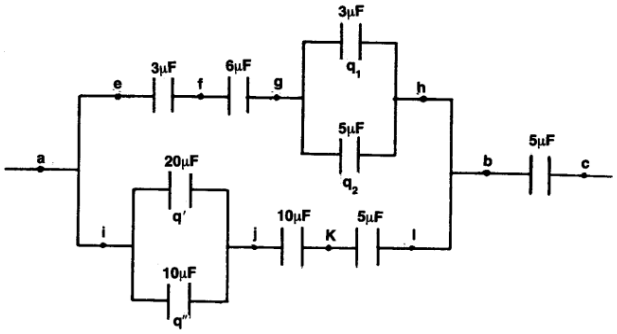
مثال/ احسب السعة المكافئة للمتسعات والشحنة الكلية في الشكل المجاور؟



الحـــل

$C_{gh}=3+5=8\mu F$ & $C_{ij}=20+10=30\mu F$

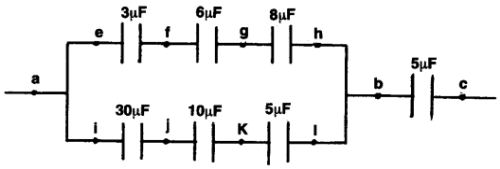
وتصبح الدائرة كما في الشكل (ب)



(أ)

$$\frac{1}{C_{eh}}=\frac{1}{3}+\frac{1}{6}+\frac{1}{8}=\frac{8+4+3}{24}=\frac{15}{24}=\frac{5}{8}$$

$$\therefore C_{eh}=\frac{8}{5}=1.6\,\mu C$$

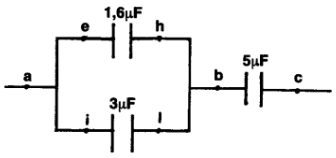


(ب)

$$\frac{1}{C_{il}}=\frac{1}{30}+\frac{1}{10}+\frac{1}{5}=\frac{1+3+6}{30}=\frac{10}{30}$$

$$\therefore C_{il}=\frac{30}{10}=3\,\mu C$$

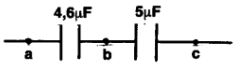
وتصبح الدائرة كما في شكل (جـ)



(جـ)

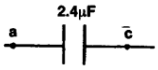
$C_{ab}=C_{eh}+C_{il}=1.6+3=4.6\mu F$

وتصبح الدائرة كما في شكل (د)



(د)

$$\frac{1}{C_{ac}}=\frac{1}{4.6}+\frac{1}{5}$$



(هـ)

$$\therefore C_{ac}=2.4\mu F$$

وتمثل هذه القيمة السعة المكافئة للدائرة (أ)، وتصبح الدائرة كما شكل (هـ).

$$q_{ab}=C_{ab}\times V_{ab}=4.6\times10^{-6}\times10=4.6\times10^{-5}\,C$$

دوائر التيار المستمر

التيار الكهربائي والقوة الدافعة الكهربية

التيار المستمر أو التيار المباشر (يرمز DC أي Direct Current) هو تدفق ثابت للإلكترونات من منطقة ذات جهد عالٍ إلي أخرى ذات جهد أقل، ويتم توليده من البطاريات الكهربائية، والخلايا الشمسية، والمزدوجات الحرارية، ومن المبادل الكهربائي المستخدم في الآلات الكهربائية. ويتم انتقاله عادة في الفلزات كالأسلاك الكهربية، ولكن قد يحدث أيضًا خلال أشباه الموصلات أو العوازل أو حتى في الفراغ كما في حالة الأشعة الأيونية أو الإلكترونية. وتتدفق الشحنة الكهربية في حالة التيار المباشر في نفس الاتجاه، وبذلك فهو يختلف عن التيار المتردد (الذي يرمز له باللاتينية AC)

يعرف **التيار الكهربائي** بأنه سيل من الالكترونات (الشحنات) التي تمر عبر موصل في دائرة كهربائية مغلقة خلال فترة زمنية معينة. والتيار المستمر هو تيار ثابت الشدة و الاتجاه اي انه يسري في اتجاه واحد فقط، وبذلك فان التيار (I):

$$I = \frac{q}{t} \rightarrow \frac{Col.}{Sec.} = Amper \quad (A)$$

وحدة التيار هي الامبير وهناك وحدات اصغر هي الملي امبير والمايكرو أمبير.

واذا كان انسياب التيار غير منتظم فأن التيار سوف يتغير من لحظة الى اخرى ويعبر عنه كما يلي :

$$I = \frac{dq}{dt}$$

كثافة التيار (J) تمثل النسبة بين مقدار التيار الكهربائي الى مساحة الموصل وهي كمية متجهة ، فإذا خد جزء مقطعي من سلك ما مساحته A وكان التيار الذي يمر من خلاله هو I فإن كثافة التيار المارة في كل هذا السلك تعطى بالعلاقة :

$$J = \frac{I}{A}$$

ووحدة كثافة التيار هي أمبير لكل متر مربع

المقاومة (R): وهي الإعاقة التي يبديها الموصل (المادة) لمرور التيار الكهربائي (الإلكترونات) خلالها

ووحدة المقاومة هي الأوم (Ω)، والمقاومة تمثل النسبة بين فرق الجهد الى التيار، اي ان:

$$R = \frac{V}{I} \qquad \frac{Volt}{Amper} = Ohm$$

والصيغة اعلاه هي قانون اوم

المقاومة النوعية (Resistivity) ويرمز لها بالحرف اللاتيني (ρ) ويقرأ رو rho . وهي صفة متأصلة للمادة، اي ان لكل مادة مقاومة نوعية حاصة بها.

تستخدم لحساب المقاومة الكهربائية لموصل منتظم الشكل والبنية.
الوحدة المستخدمة هي: Ω .m
ومقلوب المقاومة النوعية يعطينا التوصيلية الكهربائية.

عند مرور تيار كهربائي في موصل ذو مقطع متجانس، وفي درجة حرارة معينة، يمكن لنا قياس مقاومته الكهربائية بدلالة نوع المادة التي صنع منها وبمعرفة أبعاده، أي ان:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

ينتج عن مرور التيار الكهربائي في موصل معدني (أو مقاومة) انبعاث الحرارة، وتسمى هذه الظاهرة **تأثير جول** ، تعطى الطاقة الحرارية التي تنتج بفعل تأثير جول بالمعادلة التالية:

$$P = I^2 R$$

حيث ان:
P: الطاقة الناتجة عن تأثير جول.
I: شدة التيار المار في الموصل وتعطى بالأمبير.
R: مقاومة الموصل وتعطى بالأوم.

قانون اوم: وينص هذا القانون على أن فرق الجهد الكهربائي بين طرفي موصل معدني يتناسب طرديا مع شدة التيار الكهربائي المار فيه.

$$V \propto I$$

يتم تعريف النسبة الثابتة بين فرق الجهد وشدة التيار بالمقاومة الكهربائية ويرمز إليها بالحرف اللاتيني R.
ويلاحظ أن المقاومة R لموصل ما هي إلا قيمة ثابتة ، ويعبر عن هذا المبدأ من خلال المعادلة التالية:

$$R = \frac{V}{I}$$

القوة دافعة كهربائية (ε): هي الشغل المنجز من قبل المصدر لوحدة الشحنة، اي ان:

$$\varepsilon = \frac{dW}{dq}$$

ومعادلة الدائرة الكهربائية تعطى بالصيغة التالية:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

حيث ان: r- تمثل المقاومة الداخلية.

الفصل السابع
دوائر التيار المستمر

٧-١ معادلة الدائرة الكهربائية The Circuit Equation

اوضحنا في الفصل السابق أن الطاقة الكهربائية التي تزودها البطارية للدائرة المبينة في الشكل (٦-٥) تتحول الى طاقة حرارية تظهر في مقاومة الدائرة . ولو طبقنا قانون حفظ الطاقة على تلك الدائرة الكهربائية لوجدنا أن

$$\mathcal{E}\, I = I^2 R$$

وبمعنى آخر أن معدل الطاقة الكهربائية التي يمدها مصدر القوة الدافعة الكهربائية للدائرة تساوي معدل تبديد الطاقة في المقاومة الكلية R للدائرة . ومن هذه المعادلة نجد أن قيمة التيار المتكون في هذه الدائرة تصبح

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \qquad (٧-١)$$

واذا تذكرنا أن جزء من الطاقة يتبدد في داخل المصدر نظرا لكون جميع مصادر القوة الدافعة الكهربائية لها مقاومة داخلية (قد تكون ناشئة عن مقاومة اسلاك الملفات كما في الداينمو أو مقاومة المحلول داخل البطارية) نرى أنه من الأفضل أن نجزىء المقاومة الكلية في الدائرة الى جزئين ، المقاومة الداخلية للمصدر ونرمز لها بالحرف r والمقاومة الخارجية للدائرة ونرمز لها بالحرف R . وبعد الاستعاضة عن المقاومة الكلية بمجموع المقاومتين الداخلية والخارجية نحصل على

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \qquad (٧-٢)$$

وتسمى هذه العلاقة بمعادلة الدائرة الكهربائية والتي بواسطتها يمكن حساب التيار في الدائرة المغلقة Single loop circuit

مثـــــال ١

ربطت نهايتا مصدر للقوة الدافعة الكهربائية بمقاومة قدرها 10Ω وبأميتر كما مبين في الشكل . فاذا علمت أن القوة الدافعة الكهربائية للمصدر هي $24V$ ومقاومته هي 2Ω أحســـب (أ) مقدار القراءة التي يسجلها الاميتر .

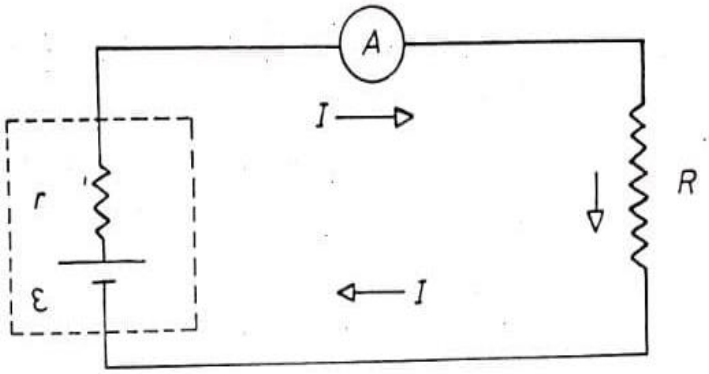
(ب) فرق الجهد بين طرفي المقاومة.

(ج)المعدل الزمني للطاقة التي يزودها المصدر للدائرة .

(د) المعدل الزمني للطاقة التي تتبدد داخل المصدر .

(هـ) المعدل الزمني للطاقة الحرارية التي تتولد بالمقاومة .

أهمـل مقاومة الاميتر .



الشكل ٧-١

الحـــل :

(أ) من المعادلة (٧-٢) نجد قيمة التيار التي يسجلها الاميتر في هذه الدائرة وهي

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{24\,V}{10\,\Omega + 2\,\Omega} = 2\,A$$

(ب) والآن أصبح بالامكان حساب فرق الجهد بين طرفي المقاومة

$$V = I\,R = 2\,A \times 10\,\Omega = 20\,V$$

(ج) ومن المعادلة (٦-١٣) نستطيع أن نحسب المعدل الزمني للطاقة التي يزودها المصدر للدائرة

$$P = \mathcal{E}\,I = 24\,V \times 2\,A = 48\ \text{watts}$$

(د) وأما المعدل الزمني للطاقة التي تتبدد داخل المصدر فمقدارها يساوي

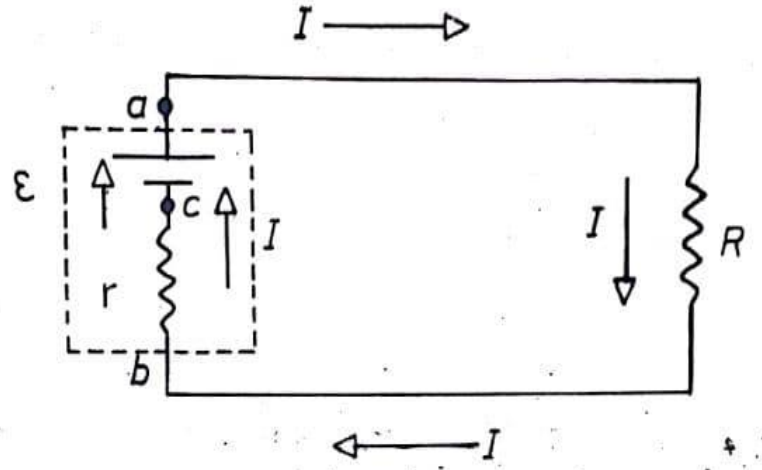
$$I^2 r = (2\,A)^2 \times 2\,\Omega = 8\ \text{watts}$$

(هـ) واخيرا نجد المعدل الزمني للطاقة الحرارية التي تظهر في المقاومة الخارجية وتساوي

$$I^2 R = (2A)^2 \times 10\,\Omega = 40\ \text{watts}$$

٧-٢ حساب فرق الجهد في الدوائر الكهربائية

يبين الشكل (٧-٢) دائرة كهربائية مكونة من مصدر قوته الدافعة الكهربائية $\mathcal{E}$ ومقاومته الداخلية r يتصل مع مقاومة R . أما التيار فيدور باتجاه عقرب الساعة clockwise كما هو واضح في الشكل .



الشكل ٧-٢

لحساب فرق الجهد بين طرفي البطارية a و b (V_{ab}) مثلا نعتبر التغيرات التي تحصل في فروق الجهد عبر عناصر الدائرة بين هاتين النقطتين . فعند السير من النقطة b (وجهدها V_b) باتجاه التيار عبر المقاومة r الى النقطة c (جهدها V_c) نلاحظ أنه يحدث هبوط في الجهد potential drop ، وهذا يعني أن الجهد في b هو أعلى منه في c . ذلك أن الشحنات الموجبة تنساب من الجهد العالي الى الجهد الواطىء . وعند عبور مصدر القوة الدافعة الكهربائية من النقطة c الى a نجد أنه يحدث ارتفاع بالجهد Potential rise قدره $\mathcal{E}$. ان هذه الزيادة في الجهد ناتجة عن كون المصدر يبذل شغلا على الشحنات الموجبة عند نقلها خلاله من القطب السالب الى القطب الموجب فيرتفع بذلك الجهد .

ولو اتفقنا ان نعطي اشارة موجبة للارتفاع في الجهد وسالبة للانخفاض في الجهد يصبح علينا من السهل جدا حساب فرق الجهد V_{ab} . وذلك بأخذ المجموع الجبري للتغيرات الحاصلة في الجهد عبر هذا المسار أي

$$V_b - ir + \mathcal{E} = V_a$$

أو

$$V_{ab} = V_a - V_b = +\mathcal{E} - ir \qquad (٧-٣)$$

وهكذا نستطيع أن نحسب فرق الجهد بين أية نقطتين في دائرة كهربائية مهما كانت معقدة وذلك باحتساب المجموع الجبري للتغيرات الحاصلة في الجهد عبر عناصر أي مسار موصل conducting path يربط بين هاتين النقطتين آخذين بنظر الاعتبار القاعدتين التاليتين

١ . عند اجتياز المقاومة باتجاه التيار فانه يحدث هبوط في الجهد قدره (IR -). أما اذا كان الاجتياز بعكس انسياب التيار فانه يحدث إرتفاع في الجهد قدره (IR +) .

٢ . عند اجتياز القوة الدافعة الكهربائية من قطبها السالب الى قطبها الموجب (اي بنفس اتجاه القوة الدافعة الكهربائية) فانه يحدث ارتفاع في الجهد قدره (+ε) . اما اذا كان الاجتياز بالعكس أي من القطب الموجب الى القطب السالب فانه يحدث هبوط في الجهد قدره (−ε) .

والآن لو بدأنا من نقطة a وانتهينا الى نفس النقطة عبر مسار الدائرة المغلق وجمعنا جبريا التغيرات الحاصلة في الجهد لحصلنا على نفس الجهد عند نقطة البداية . أي أن

$$V_a - IR - Ir + \varepsilon = V_a$$

أو

$$- IR - Ir + \varepsilon = 0 \qquad (٧-٤)$$

ومن هذه العلاقة نستنتج أن المجموع الجبري للتغيرات الحاصلة في الجهد عبر اية دائرة كهربائية مغلقة Closed loop يجب أن يساوي صفراً . ان هذا النص يعرف بقانون كيرشوف الثاني Kirchhoff's second law أو loop theorem . ويجب أن نتذكر دائما أن هذه النتيجة ما هي الا نمط خاص للتعبير عن قانون حفظ الطاقة في الدوائر الكهربائية .

والآن نعود الى العلاقة (٧-٤) فنجد منها أن قيمة التيار في الدائرة المبينة في الشكل (٧-٢) تصبح .

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \qquad (٧-٥)$$

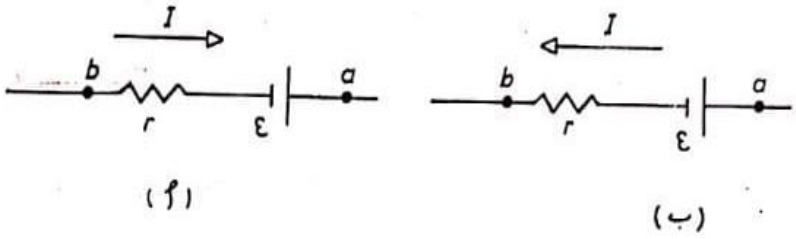
وهي نفس المعادلة (٧-٢) التي اطلقنا عليها معادلة الدائرة الكهربائية Circuit equation والتي حصلنا عليها من قانون حفظ الطاقة .

وهكذا تتجلى لنا أهمية قانون كيرشوف الثاني في استنتاج معادلة الدائرة وحساب التيار الكهربائي ليست في هذه الدائرة البسيطة فحسب بل وحتى في الدوائر الكهربائية المعقدة كما سيتضح لنا عند مناقشة بعض الأمثلة في هذا الفصل .

مثـــــال ٢

حساب فرق الجهد بين طرفي البطارية Terminal Voltage

الشكل (٧-٣) يبين جزئين من دائرة كهربائية . كل جزء يمثل بطارية مع مقاومتها الداخلية والمطلوب حساب فرق الجهد بين النقطتين a و b .



الشكل (٧-٣) .

الحـــل

عند تطبيق القاعدة الآنفة الذكر لحساب فرق الجهد وذلك بالسير من b الى a وباتجاه التيار (أنظر الى الشكل ٧-٣أ) ، وبعد جمع التغيرات الحاصلة في الجهد عبر المقاومة الداخلية والبطارية نحصل على نفس النتيجة التي حصلنا عليها في المعادلة (٧-٣) وهي

$$V_{ab} = V_a - V_b = \mathcal{E} - Ir \qquad (٧-٦)$$

نلاحظ من هذه النتيجة أن فرق الجهد V_{ab} بين طرفي البطارية terminal voltage هو أقل من القوة الدافعة الكهربائية للبطارية . حيث أن البطارية تقوم بانجاز شغل وذلك على حساب طاقتها الكيميائية المخزونة والتي تتحول بالتدريج الى طاقة كهربائية تجهز الى الدائرة . ونطلق على هذه العملية « تفريغ البطارية » discharging

ولحساب فرق الجهد بين طرفي البطارية في الشكل (٧-٣ ب) نطبق نفس القاعدة وذلك بالسير ايضا من b الى a ولكن بعكس التيار في هذه الحالة . فنحصل على

$$V_b + Ir + \mathcal{E} = V_a \qquad (٧-٧)$$

أو

$$V_{ab} = V_a - V_b = \mathcal{E} + Ir \qquad (٧-٨)$$

وهنا نجد أن فرق الجهد بين طرفي البطارية terminal voltage يكون في هذه المرة اكبر من القوة الدافعة الكهربائية . ففي هذه الحالة ينجز شغل على البطارية وذلك من قبل مصدر آخر للقوة الدافعة الكهربائية غير مبين في الشكل ، فتتحول الطاقة الكهربائية المجهزة الى طاقة كيمياوية تخزن في البطارية . ونطلق على هذه العملية « شحن البطارية » .

في كلتا الحالتين نجد أن فرق الجهد بين قطبي المصدر terminal voltage يتساوى مع قوته الدافعة الكهربائية فقط عندما يكون التيار المار خلال المصدر صفرا . أي عندما تكون الدائرة مفتوحة .

مثـــــال ٣

في الدائرة المبينة في الشكل ادناه أحسب

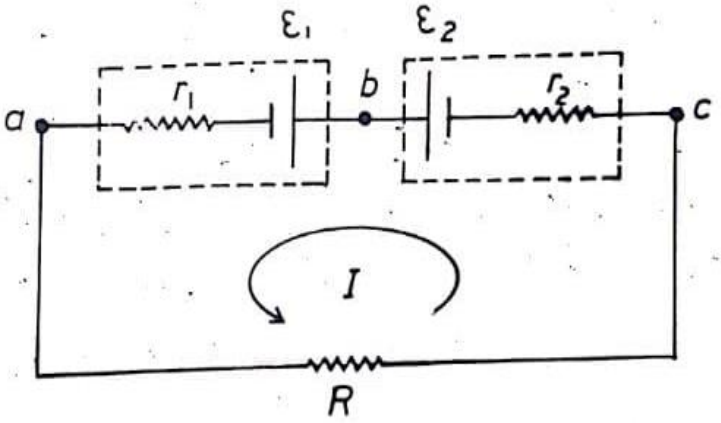
(أ) قيمة التيار في الدائرة

(ب) فرق الجهد بين النقطتين a , b

(ج) فرق الجهد بين النقطتين b , c

علما بأن

$$\mathcal{E}_1 = 6\,V,\ \mathcal{E}_2 = 12\,V$$
$$r_1 = 1\,\Omega \quad , \quad r_2 = 2\,\Omega \quad , \quad R = 9\,\Omega$$



الشكل (٧-٤)

الحـــــل

(أ) من السهل جدا تعيين اتجاه التيار في الدوائر البسيطة كهذه الدائرة التي تحتوي على مصدرين للقوة الدافعة الكهربائية وباتجاهين متعاكسين . فالقوة الدافعة الكهربائية ذات القيمة الاكبر هي التي ستحدد اتجاه التيار وعليه فان اتجاه التيار سيكون بعكس عقرب الساعة Counter clock wise

وبتطبيق قانون كيرشوف الثاني وجمع التغيرات الحاصلة في الجهد لدورة كاملة ابتداء من النقطة a وباتجاه التيار نحصل على

$$-IR - Ir_2 + \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 - Ir_1 = 0 \quad ,$$

وبذلك نجد أن التيار يساوي:

$$I = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{r_1 + r_2 + R} = \frac{12 - 6}{1 + 2 + 9} = 0{\cdot}5\ A$$

(ب) ولحساب فرق الجهد بين النقطتين a و b نسير من نقطة a الى b بعكس التيار فنحصل على

$$V_a + I r_1 + \mathcal{E}_1 = V_b$$

أو

$$V_{ab} = V_a - V_b = -\mathcal{E}_1 - I r_1$$

$$= -6 - 0{\cdot}5 \times 1 = -6{\cdot}5\ V$$

(ج) وأما لحساب فرق الجهد بين النقطتين b و c فنسير من نقطة b الى c بعكس التيار فنجد أن

$$V_b - \mathcal{E}_2 + I r_2 = V_c$$

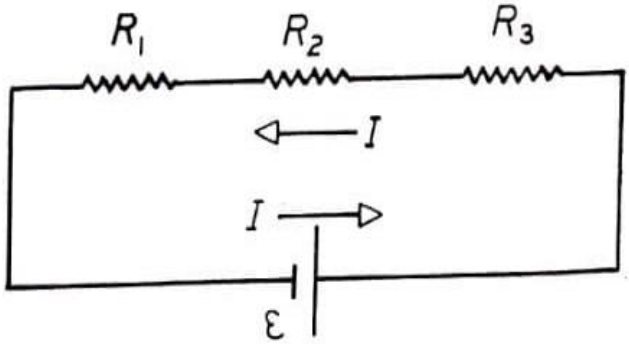
أو

$$V_{bc} = V_b - V_c = \mathcal{E}_2 - I r_2$$

$$= 12 - 0{\cdot}5 \times 2 = 11\ V$$

٧-٣ توصيل المقاومات Grouping of Resistances

قد يتطلب الغرض من تصميم دائرة كهربائية معينة أن نوصل اكثر من مقاومة واحدة بحيث توصل جميعها بمسار موصل conducting path واحد ويمر فيها نفس التيار . كما هو مبين في الشكل (٧-٥) . ان توصيل المقاومات بهذا الشكل يسمى التوصيل على التوالي Connection in series



الشكل (٧-٥)
التوصيل على التوالي

ولايجاد المقاومة المكافئةلهذه المجموعة من المقاومات الثلاث المبينة في الشكل نأخذ المجموع الجبري للتغيرات الحاصلة في الجهد عبر الدائرة المغلقة باتجاه التيار فنجد

$$\mathcal{E} - IR_1 - IR_2 - IR_3 = 0$$

أو

$$\mathcal{E} = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

والآن لو أستعضنا عن هذه المقاومات الثلاثة بالمقاومة المكافئة R فان نفس التيار سيمر فيها بمعنى ان

$$\mathcal{E} = IR$$

وبذلك نحصل على قيمة المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاث المتصلة على التوالي وهي

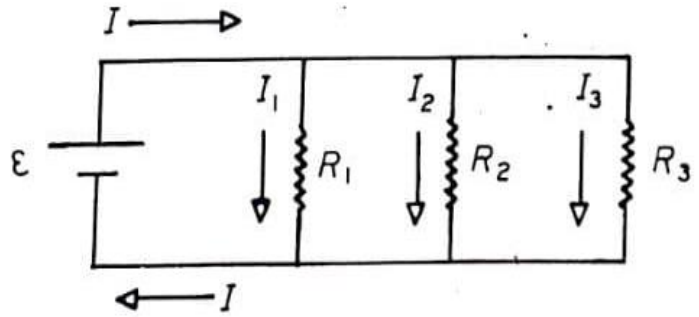
$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

وبصورة عامة فان المقاومة المكافئة لأي عدد من المقاومات يمكن ايجادها من مجموع هذه المقاومـــات .

أي

$$R = \sum_i R_i \qquad (٧-٩)$$

وقد تربط المقاومات بشكل آخر في الدائرة الكهربائية كما مبين في الشكل (٧-٦) بحيث أن فرق الجهد لهذه المقاومات يكون متساوياً . ان توصيل المقاومات بهذا الشكل يسمى التوصيل على التوازي Connection in parallel



الشكل (٧-٦)
التوصيـل عـلى التـوازي

ان التيار الكلي I يجب أن يساوي مجموع التيارات المارة في المقاومات الثلاث .

أي

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

أو

$$I = \frac{\varepsilon}{R_1} + \frac{\varepsilon}{R_2} + \frac{\varepsilon}{R_3}$$

$$= \varepsilon \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

ولكن المقاومة المكافئة R لهذه المجموعة من المقاومات هي تلك المقاومة المنفردة التي يمكننا الاستعاضة بها عن هذه المقاومات بحيث تبقى قيمة التيار الكلي نفسها . لذلك فان

$$I = \frac{\varepsilon}{R}$$

وبالتعويض عن قيمة التيار هذه بالمعادلة السابقة نحصل على العلاقة التالية

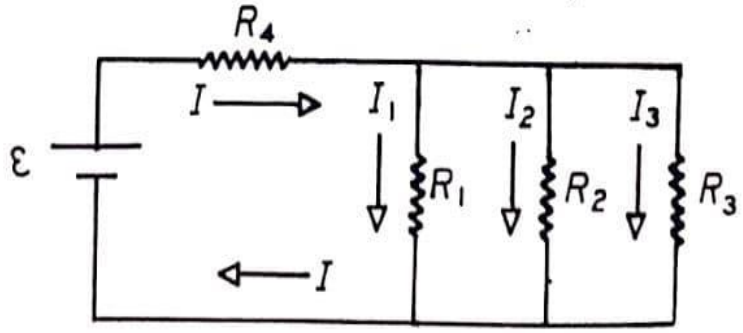
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

وبتعميم هذه النتيجة على أي عدد من المقاومات المتصلة على التوازي نجد أن المقاومة المكافئة للمجموعة يمكن ايجادها من العلاقة .

$$\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i} \qquad (١٠-٧)$$

ومن هذه المعادلة يتضح ان المقاومة المكافئة لمجموعة من مقاومات مربوطة على التوازي هي دائما أقل من أي من هذه المقاومات . بينما نجد أن المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات المتصلة على التوالي هي دائما اكبر من أي من مقاومات المجموعة .

وقد نجد دائرة كهربائية قد وصلت مقاوماتها بشكل يجمع كلتا الطريقتين في تو صيل المقاومات (التوالي والتوازي) كتلك المبينة في هذا الشكل .



هنا نرى أن مجموعة المقاومات الثلاث R_1 و R_2 و R_3 متصلة فيما بينها على التوازي. وقد وصلت هذه المجموعة مع المقاومة R_4 على التوالي . ومن السهل اختصار مثل هذه الدوائر والاستعاضة عنها بمقاومة مكافئة واحدة كما موضح في المثال الآتي .

مثـــال ٤

اذا علمت ان

$$R_1 = 16\Omega , R_2 = 16\Omega , R_3 = 8\Omega , \quad \mathcal{E} = 6\,V$$

في الدائرة المبينة في الشكل (٧-٧أ) . أحسب

(أ) المقاومة المكافئة لهذه المجموعة من المقاومات

(ب) التيار المار في المقاومة R_4

(ج) التيار المار في المقاومة R_1

الحـــل

(أ) نجد أولا المقاومة المكافئة للمقاومات الثلاثة المتصلة على التوازي وذلك باستخدام المعادلة (٧-١٠):

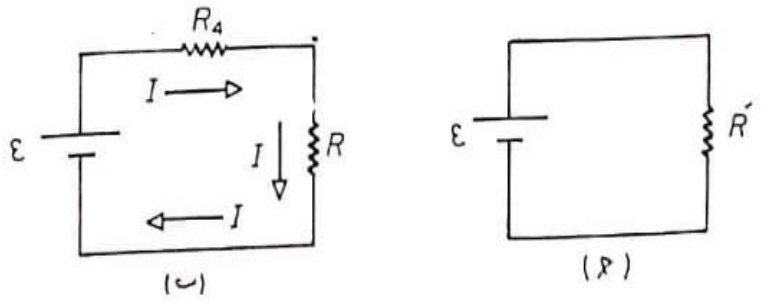
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{16} + \frac{1}{16} + \frac{1}{8} = \frac{4}{16}$$

ومنها نجد أن

$$R = 4\Omega$$

والآن يصبح بالامكان اختصار هذه الدائرة ورسمها كما هو مبين في الشكل (٧-٧ب) . وفيها نجد أن المقاومتين R_4 , R مربوطتان على التوالي . وبجمع هاتين المقاومتين نحصل على المقاومة المكافئة للشبكة الكهربائية (network)

$$R' = 2 + 4 = 6\Omega$$



الشكل ٧-٧

عندئذ تأخذ الدائرة الشكل المبسط المبين في الشكل (٧-٧ج) .

(ب) أما التيار المار في المقاومة R_4 . فكما هو واضح من الشكل (٧-٧ب) . قيمتـــــه تســـاوي

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_4 + R} = \frac{6}{2 + 4} = 1\ A$$

(ج) ولحساب التيار المار في المقاومة R_1 نجد أولا فرق الجهد بين طرفي المقاومة R

$$V = RI = 4 \times 1 = 4\ V$$

وهذا هو نفس فرق الجهد بين طرفي المقاومة R_1 . أي

$$R_1 I_1 = RI$$
$$16 \times I_1 = 4$$

لذلك نجد أن

$$I_1 = 0{\cdot}25\ A$$

لاحظ ان التيار المار في R_2 كذلك يساوي ربع أمبير . أما التيار المار في المقاومة R_3 فيساوي نصف أمبير . ومجموع التيارات الثلاث يجب أن يكون بالطبع امبيراً واحداً .