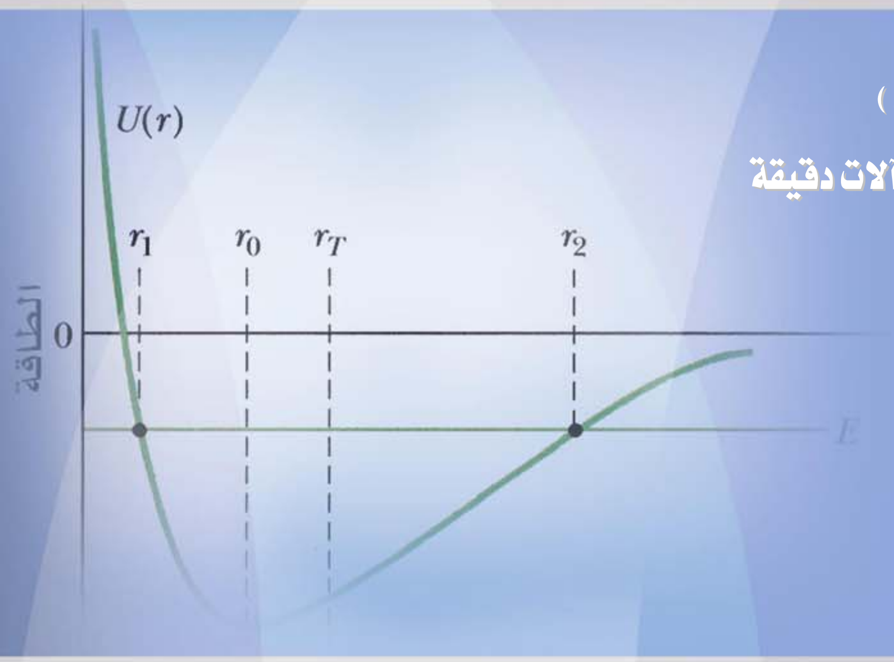
المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج



الفيزياء التخصصية (نظري)

الالكترونيات / أجهزة طبية / أجهزة وآلات دقيقة

الكهرباء

١١٧ فيز

طبعة ١٤٢٩ هـ

المقدمة

An Introduction

الحمد لله، ربٌ خلقَ الكونَ وسخَّره للكائنات، وخصَّ الإنسان بنعمة العقل كي يستخدمه في التأمل والتفكير، وجعل كل ذلك عمقاً عقائدياً لمعنى التسبيح: ﴿سُبْحَانَ الَّذِي سَخَّرَ لَنَا هَٰذَا وَمَا كُنَّا لَهُ مُقْرِنِينَ ﴿١٣﴾﴾ [الزخرف: ١٣]، ﴿رَبَّنَا مَا خَلَقْتَ هَٰذَا بَاطِلًا سُبْحَانَكَ فَقِنَا عَذَابَ النَّارِ ﴿١٩١﴾﴾ [آل عمران: ١٩١]، وصلى الله وسلّم وبارك على معلم البشرية ورافع راية التوحيد، سيد الخلق محمد وعلى آله وصحبه وسلم أجمعين.

هذا كتاب الفيزياء التخصصية لطلبة الكليات التقنية، وهو ترجمة لقرارات الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج في المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني، التي تسعى جاهدةً إلى تنمية القوى البشرية في وطننا الحبيب وإمدادها بكل الخبرات والمهارات الفنية لمواكبة التطور العلمي العالمي.

يحتوي هذا الكتاب على سبع وحدات دراسية، وهي: الكميات العددية والكميات المتجهة، قوانين القوة والحركة، الشغل والطاقة ، الكهرباء الساكنة، التيار والكهربائي والدائرة الكهربائية، المجال المغناطيسي، أشباه الموصلات، وهذه الوحدات تغطي مقرَّرات الفيزياء التخصصية لقسمي التقنية الكهربائية والتقنية الالكترونية (قوى كهربائية/آلات ومعدات/الكترونيات)

وإننا إذ نقدم هذا الكتاب لأبنائنا الطلبة وزملائنا المدرسين، نود أن نؤكد على المسائل الآتية:

١- لا بد من الرجوع إلى مقررات الفيزياء الصادرة عن الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج، وذلك لتحديد الوحدات الدراسية المطلوبة لكل تخصص، أي أنَّ لكل قسم من أقسام الكليات التقنية مقرره الخاص به، على الرغم من وجود بعض الوحدات المشتركة بين بعض الأقسام.

٢- لقد تعمدنا الإيضاح والتبسيط واستخدام كل الوسائل المساعدة على ذلك مثل تفصيل المعادلات الرياضية، استخدام الجداول، استخدام الرسوم، استخدام الأمثلة المحلولة، استخدام طريقة الامتحان الذاتي، استخدام اللغة الإنكليزية عند اللزوم بجانب اللغة العربية دون الحاجة إلى مسرد خاص بالمفردات الإنكليزية في نهاية الكتاب، بالإضافة إلى مجموعة من التمرينات والأسئلة العامة في نهاية كل وحدة دراسية، ونترك لزملائنا الأساتذة اختيار ما يسمح به الوقت منها، وأخيراً خصصنا عدداً من الأسئلة الاختيارية الإضافية في نهاية كل وحدة لاستخدامها عند الحاجة.

٣- نود التنبيه إلى أن الملخص الموجود في نهاية كل وحدة دراسية لا يغني بحال من الأحوال عن الوحدة نفسها، إلا أنه مناسب للتركيز والبيان العام، وهو شامل لكنه يبقى موجزاً يحتاج إلى التفصيل الموجود في حيثيات الوحدة المقصودة.

ونؤكد لأبنائنا الطلبة في مقدمة هذا الكتاب بأن علم الفيزياء هو علم أساسي له صلة عميقة وكبيرة بالعلوم الأخرى، وعلى وجه الخصوص العلوم الهندسية، إذ أنها تُعتبر أساساً للعلوم التطبيقية وتقنياتها الحديثة (التقنية الإلكترونية، التقنية الكهربائية، التقنية الميكانيكية، التقنية الكيميائية، ...)، لكل ذلك فإننا نؤكد على ضرورة استيعاب مفاهيمها الأساسية والتعامل معها كمادة تخصصية. كما أنَّ علم الفيزياء هو جهد إنساني متصل عبر التاريخ يتجلى ذلك في جانبه التجريبي، الذي يقوم على الملاحظة ودقتها والقياس وأهميته والتطبيق ومكانته وصولاً إلى الفهم الصحيح والتفسير المناسب والمقبول للظواهر الطبيعية.

ونجدها مناسبة طيبة كي نذكّر زملائنا المدرسين بضرورة اتباع المنهجية العلمية المتمثلة في البحث والحوار والاستقصاء، وبناء المفاهيم الجديدة على المفاهيم السابقة لدى الطالب وإفساح المجال ضمن ما يسمح به وقت المحاضرة للسؤال والاستفسار والحوار كي تكون العملية التعليمية مثيرة ومشوقة، وتحوز على حب الطالب وشغفه بها.

وهنا ننصح الإخوة المدرسين باصطحاب ما يتمكنون من الحصول عليه من وسائل الإيضاح الخاصة بكل موضوع توخياً للفائدة، ومن الممكن الاستعانة والاستفادة بما هو موجود في معامل الفيزياء التجريبية لهذا الغرض.

وأخيراً نأمل أن نكون قد وفقنا في تقديم هذا الكتاب بصورة مناسبة ومقبولة، آملين من جميع زملائنا المدرسين موافاتنا بملاحظاتهم مكتوبة إلى الإدارة العامة للمناهج، كي نستفيد منها في الطبعات القادمة.

وفق الله الجميع لما يحب ويرضى، وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين.

فيزياء عامة

الكهرباء الساكنة

الوحدة الأولى

الكهرباء الساكنة

The Electrostatics

١-١ المقدمة *Introduction*:

إنَّ دراسة الكهرباء الساكنة *electrostatics* تشتمل على مجموعة من المفاهيم الأساسية *fundamentals concepts* في هذا الموضوع، مثل الشحنة الكهربائية *electric charge* كميتها وطبيعتها، حفظ الشحنة الكهربائية *conservation of electric charge*، الشحنة الأولية، دور سماحية الفضاء الحر *permitivivty* في التأثير على الشحنات الكهربائية، استخدام قانون كولوم *Coulomb's law* في تحديد القوة الكهروستاتيكية *electrostatic force*، الأجسام الناقلة *conductors*، والأجسام العازلة *insulators* للتيار الكهربائي، المجال الكهروستاتيكي *electrostatic field*، الجهد الكهروستاتيكي *electrostatic potential*.

لقد أصبح مألوفاً لدينا وجود علاقة بين دلك الأجسام الناقلة أو العازلة بمادة صوفية أو حريرية وظاهرة التكهرب الساكن، وذلك بسبب نشوء القوة الكهروستاتيكية المتبادلة بينهما بعد أن تفتقد أو تكتسب الأجسام المدلوكة شحنات كهربائية. إنّ ظاهرة التجاذب *attraction* أو التنافر *repulsion* بين تلك الأجسام أدت من الناحية العملية إلى تمييز نوعين من الشحنات الكهربائية، سالبة *negative charges* وموجبة *positive charges*، كما أدت إلى تمييز الجسم بوصفه فيما إذا كان متعادلاً كهربائياً أم لا، وسنحاول أن نتناول هذه المفاهيم بطريقة مباشرة وميسرة.

وبعد أن يكمل الطالب دراسة هذه الوحدة، ويستوعب المفاهيم والأفكار والمبادئ التي وردت خلالها، ويقوم بنفسه بحل أسئلة الامتحان الذاتي الموجودة في نهايتها، ويقارن حلوله مع الحلول النموذجية المرفقة في الملحق (د)، بعد ذلك كله نتوقع أن يكون الطالب قادراً على:

١- أن يميِّز ما هو المقصود بالشحنة الكهربائية، ويصف طبيعتها ويضبط مقدارها ويشرح دورها في كلٍ من: القوة الكهروستاتيكية، شدة المجال الكهروستاتيكي، الجهد الكهروستاتيكي.

٢- أن يّخبرَ الاستخدام الصحيح لقانون كولوم في حساب القوة الكهروستاتيكية، فيما بين الشحنات الكهربائية الساكنة.

٣- أن يوضّح بدراية تامة طبيعة الكميات الثلاثة: القوة، المجال، الجهد الكهروستاتيكي.

٤- أن يفسِّر طبيعة عمل المكثف الكهربائي، ويُعبِّر عن علاقة سعته الكهربائية بكل من شحنته وفرق الجهد بين لوحيه.

٥- أن يربط بين كلٍ من سعة المكثف ومقدار شحنته الكهربائية وفرق الجهد بين لوحيه من جهة، وحساب الطاقة الكهربائية المختزنة فيه من جهة أخرى.

١-٢ الشحنة الكهربائية *The Electric Charge*:

ربما تكون الأجسام المتعادلة كهربائياً *electric neutral* من حولنا ولاسيَّما ما يمكننا أن نراه منها، مسألةً غير ملفتة للانتباه، إلا أنها في حقيقة الأمر تحتوي على أعداد هائلة من الشحنات الكهربائية، ومعنى ذلك أن الشحنات الموجبة تعادل وتساوي الشحنات السالبة ويقال عن الجسم في هذه الحالة أنه متعادل كهربائياً، وأما إذا كانت كمية الشحنات غير متساوية فإننا ننتقل إلى حالة عدم التعادل *imbalance*، عندئذٍ نحصل على أجسام مشحونة كهربائياً إما بشحنة سالبة أو شحنة موجبة. وبناءً على ذلك تم تصنيف الشحنات الكهربائية إلى سالبة أو موجبة. كما أنّ التأثير المتبادل لهذين النوعين المختلفين من الشحنات الكهربائية أدى إلى صياغة الظاهرتين المعروفين الآتيين:

١- الظاهرة الأولى: الشحنات المتشابهة تتنافر فيها بينها *Like charges repel each other*.

٢- الظاهرة الثانية: الشحنات غير المتشابهة تتجاذب فيما بينها *Unlike charges attract each other*.

وباعتماد الحقيقة العلمية حول البنية الذرية للمادة *atomic structure of matter* واكتشاف كل من النواة *nucleus* ذات الطبيعة الكهربائية الموجبة والإلكترون *electron* ذو الطبيعة الكهربائية السالبة أصبحت المعلومات في هذا الصدد متوافرة وبشكل مفيد للغاية، فقد ترتب على ذلك معرفة الشحنة الأولية *elementary charge* والمقصود بها شحنة الإلكترون، وتم تحديد مقدارها بشكل مضبوط للغاية، وأصبحت معروفة القيمة، كما اعتُمِدَ الحرف الإنكليزي بشكله الصغير *(e)* للتعبير عن الإلكترون، وأصبح معروفاً أن:

$$\boxed{e = 1.60 \times 10^{-19}\, C}$$

حيث (C) هي وحدة قياس الشحنة الكهربائية وهي الكولوم، ويمكننا تعريف الكولوم بواسطة مقدار الشحنة الأولية، ذلك أنَّ الواحد كولوم هو عبارة عن شحنة عدد من الإلكترونات يساوي (6.25×10^{18}) ، كما تمَّ تحديد كتلة الإلكترون وهي:

$$\boxed{m_e = 9.1 \times 10^{-31}\, kg}$$

كل ذلك أدى إلى التخلي عملياً عن الاعتقاد القديم بأن التيار الكهربائي هو عبارة عن سيل متدفق متصل *continuous fluid* من الإلكترونات، إذ أن الحقيقة العلمية أكثر دقة من ذلك، فالتيار الكهربائي هو عبارة عن تكرار لعدد من المرات المعلومة للشحنة الأولية ذات المقدار المعلوم، وقد تكون سالبة أو موجبة، والتعبير الصحيح عن الشحنة الكهربائية هو:

$$q = n\, e, \; (n = \pm ١, \pm ٢, \ldots) \qquad (١-١)$$

ومن الواضح تماماً في هذه المعادلة أن (e) هي الشحنة الأولية، كما توضح أن الشحنة الكهربائية مكممة *charge is quantized*.

إنَّ الدراسات المستفيضة عن البنية الذرية للمادة أدت إلى التمييز بين الشحنات الأولية وطبيعتها، ومعرفة شحنة البروتون *proton* وهو من مكونات النواة، وكذلك التعرف على كتلة كل من هذين الجسمين، كما أدت إلى التأكد بأن النيوترون *neutron* وهو الآخر من مكونات النواة متعادل كهربائياً، بينما تقترب كتلته من كتلة البروتون، وبهدف تكوين فكرة أولية عن مكونات الذرة تأمل الجدول (١-١).

Particle الجسيم	**Symbol** الرمز	**Charge (e)** الشحنة	**Mass (m)** الكتلة
electron إلكترون	*e*	-١	١
proton بروتون	*p*	+١	١٨٣٦,١٥
neutron نيوترون	*n*	٠	١٨٣٨,٦٨

الجدول (١-١) ويبين بعضاً من خصائص أجزاء مكونات الذرة

ويلاحظ أن كتل وشحنات المكونات تم قياسها نسبة إلى كتلة وشحنة الإلكترون

وكواحدة من النتائج الهامة لدراسة البنية الذرية للمادة، هي تصنيف المواد الموجودة في الطبيعة من ناحية سلوكها الكهربائي إلى ثلاثة أصناف:

١- المواد الناقلة (الموصلة) *conductors*: وهي المواد التي تمتلك أعداداً هائلة من الإلكترونات الحرة *free electrons* في درجة حرارة الغرفة *room temperature*، مما يجعل هذه المواد ناقلةً جيدةً للكهرباء، مثل الحديد *iron*، النحاس *cooper*، الألومونيوم *aluminum*.

٢- المواد العازلة *non conductors or insulators*: وهي المواد التي لا تمتلك جسيمات مشحونة حرة الحركة، ونلاحظ هنا ارتباط هذه الجسيمات (الإلكترونات) بقوى كبيرة مع النواة تمنعها من الحركة، مثل الخشب *wood*، المطاط *rubber*، والبلاستيك *plastic*، والزجاج *glass*.

٣- المواد شبه الموصلة (شبه الناقلة) *semi conductors*: وهي المواد التي تتصف بالحالة المتوسطة بين المواد الناقلة والمواد العازلة، إذ أنها تسمح بمرور التيار الكهربائي عند معالجتها صناعياً، وذلك بتحضير بلورات موجبة وأخرى سالبة من هذه المواد بعد تطعيمها بعناصر مناسبة لهذه الغاية، كما سنناقش ونشرح ذلك مفصلاً في الوحدة التاسعة من هذا الكتاب، ومن أشهر هذه المواد الجيرمانيوم *germanium* والسيليكون *silicon*، ومن المعروف أن اكتشاف هذه المواد أحدث ثورة هائلة في عالم الأجهزة الإلكترونية التي تعتمد في صناعتها على الخصائص الفريدة لهذا الصنف من المواد.

١-٣ قانون كولوم *Coulomb's Law*:

الكولوم: هو مقدار الشحنة الكهربائية التي إذا وضعت في الفراغ على مسافة متر واحد من شحنة ثانية مماثلة لها، كانت القوة الكهروستاتيكية المتبادلة بينهما مساويةً إلى ($٩ \times ١٠^{٩}\ N$). وهو الوحدة الدولية لقياس مقدار الشحنة الكهربائية.

لقد تمكن العالم الفرنسي *Coulomb Charles Augustus* في العام ١٧٩٥ للميلاد من دراسة القوى المتبادلة بين الشحنات الكهربائية الساكنة دراسةً تجريبية، وذلك باستخدام ميزان اللي الذي صممه لهذا الغرض *Coulomb's torsion balance*، حيث تمكن من التوصل إلى القانون الذي يعطي العلاقة الرياضية بين القوة الكهروستاتيكية -وسُميت بهذا الاسم بسبب بقاء الشحنات الكهربائية ثابتةً في مكانها- ومقدار هذه الشحنات والمسافة الفاصلة بينها، انظر الشكل (١-١).

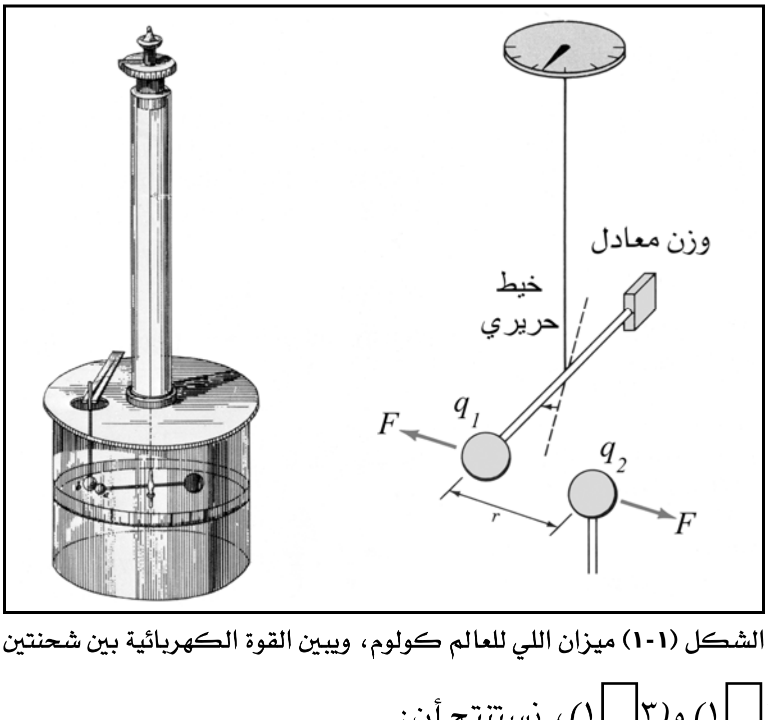
إن ميزان اللي المكون من كرة معدنية صغيرة تحمل شحنة كهربائية مقدارها (q_1) متصلة بوزن يعادلها لغرض الاستقرار بواسطة محور متصل بقرص مدرج مثبت عليه مؤشر يقيس زاوية الانحراف بسبب التأثير المتبادل بين الشحنة المعلقة وأية شحنة أخرى، حيث أن مقدار زاوية الانحراف يتناسب مع قوة التنافر بين الشحنتين. وبتغيير مقدار الشحنتين والمسافة بينهما في الفراغ *vacuum* توصل كولوم إلى ما يلي:

١- تتناسب القوة الكهروستاتيكية المتبادلة (F) تناسباً طردياً مع مقدار الشحنتين (q_2, q_1) وهما شحنتان نقطيتان *point charges* أي أنّ أبعادهما صغيرة إذا ما قورنت بالمسافة الفاصلة بينهما.

$$F \propto q_1\, q_2 \qquad (١□٢)$$

٢- تتناسب القوة الكهروستاتيكية المتبادلة (F) عكسياً مع مربع المسافة الفاصل بينهما (r^2)، ومعنى ذلك أنَّ:

$$F \propto \frac{1}{r^2} \qquad (١□٣)$$



الشكل (١-١) ميزان اللي للعالم كولوم، ويبين القوة الكهربائية بين شحنتين

من العلاقتين (٢□١) و(٣□١)، نستنتج أن:

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (١-١)$$

وبتحويل التناسب إلى مساواة، نجد أنَّ:

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

حيث (k) هو ثابت التناسب، ويطلق عليه الثابت الكهروستاتيكي، ويعتمد على الوحدات المستخدمة لقياس القوة والشحنة والمسافة، كما يعتمد أيضاً على الوسط الفاصل بين الشحنات الكهربائية، ولتحديد مقدار الثابت وباستخدام النظام العالمي للقياس (SI)، استخدم كولوم(تعريف الكولوم) المقادير الآتية:

$$q_١ = q_٢ = ١C$$

$$r = ١\ m$$

فوجد أن قوة التنافر الكهروستاتيكية المتبادلة *repulsion force* بينهما تساوي:

$$F = ٩ \times ١٠^{٩}\ N$$

وبالرجوع إلى العلاقة الرياضية (١□٥) نجد أن ثابت التناسب يساوي:

$$k = \frac{Fr^2}{q_1 q_2}$$
$$= \frac{(9\times10^9\ N)(1m^2)}{1C^2} = 9\times10^9\ N.m^2.C^{-2}$$

وعليه، يمكننا إعادة كتابة العلاقة الرياضية (١□٥) على النحو الآتي:

$$F = 9\times10^9\ \frac{q_1 q_2}{r^2}\,\hat{r}$$

حيث يؤكد المتجه $(\hat{r})$ أن القوة الكهروستاتيكية المتبادلة (F) هي كمية اتجاهية، كما يمكننا إعادة كتابة الثابت (k) على الشكل الآتي:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}$$

حيث (ε_o) هو ثابت نفاذية الفراغ أو الهواء *permittivity of vacuum*، ويمكن إيجاد مقداره العددي على النحو الآتي:

$$\varepsilon_o = \frac{1}{4\pi k} = \frac{1}{4\pi(9\times10^9)} = 8.85\times10^{-12}\ N^{-1}.m^{-2}.C^2$$

واستنتاجاً من كل ما تقدم فإن العلاقة الرياضية (٥□١) تأخذ الصيغة الآتية:

$$F = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon_o}\frac{q_1\,q_2}{r^2}$$

والصيغة الرياضية المتداولة لحساب القوة الكهروستاتيكية المتبادلة هي:

(٥□١) (تعريف قانون كولوم) $$\boxed{F = k\,\frac{q_1\,q_2}{r^2}}$$

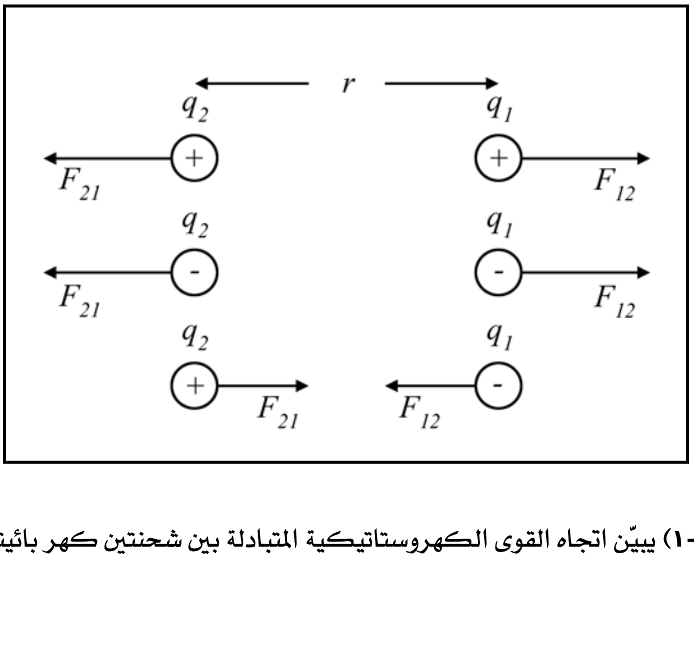
قانون كولوم: القوى المتبادلة بين أي شحنتين كهربائيتين نقطيتين تتناسب تناسبا طرديا مع مقدار كل منهما، وعكسيا مع مربع المسافة بينهما.

أما إذا كان الوسط المحيط بالشحنات وسطاً آخراً غير الفراغ فإننا نحتاج إلى إضافة ثابت السماحية النسبية لمادة هذا الوسط، ويُعرَّف ثابت السماحية النسبية *relative permittivity* على الشكل الآتي:

(٦□١) $$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} = \frac{\text{ثابت سماحية الوسط}}{\text{ثابت سماحية الفراغ}}$$

ونلاحظ من العلاقة (٦□١) أن (ε_r) ليس له وحدة قياس.

وأخيراً لا بد من الانتباه إلى ضرورة تحديد اتجاه تأثير القوة الكهروستاتيكية، وذلك لكي يكتمل تعريفنا للكمية الاتجاهية. وبهدف تبسيط هذه المسألة الهامة، تأمَّل بدقة الشكل (٢-١).



الشكل (٢-١) يبيّن اتجاه القوى الكهروستاتيكية المتبادلة بين شحنتين كهربائيتين نقطيتين

لاحظ عزيزي الطالب أن قوى التأثير المتبادلة في الحالات الثلاثة متساوية في المقدار ومتعاكسة في الاتجاه، وهو ما يذكرنا بقانون نيوتن الثالث الذي سبق ذكره في الوحدة الثالثة من هذا الكتاب. وأخيراً لا بد أن نؤكد على أن الشحنتين المتماثلتين تتنافران فيما بينهما، وأنَّ الشحنتين المختلفتين تتجاذبان فيما بينهما، كل ذلك بسبب القوى الكهروستاتيكية.

ونأمل من طلابنا الأعزاء الانتباه إلى أنَّ:

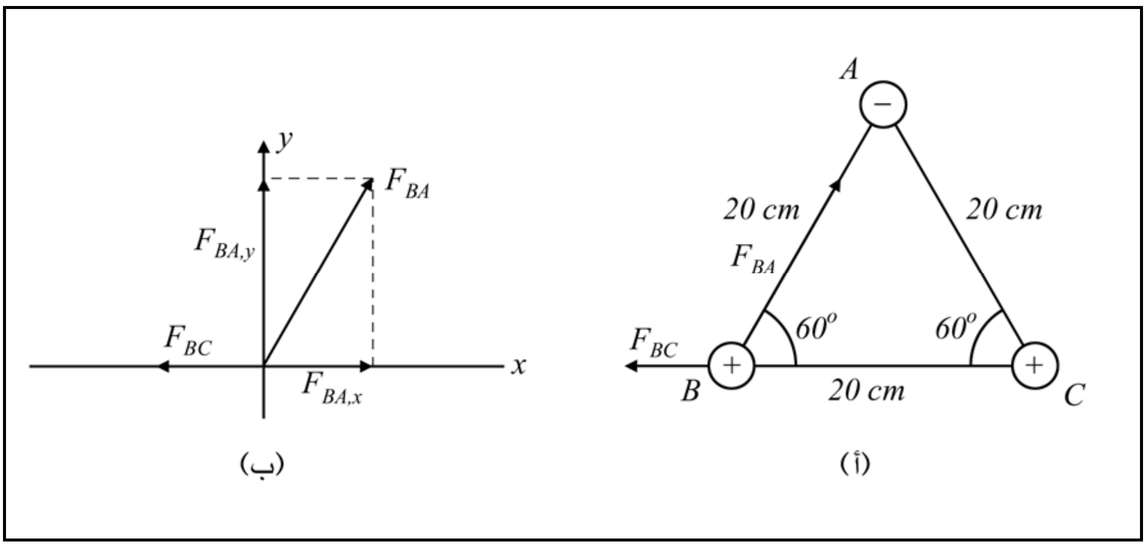
١- قوة التنافر ذات إشارة موجبة.

٢- قوة التجاذب ذات إشارة سالبة.

وبهدف ترسيخ هذه المهارة، تأمل التطبيق (١-١)

تطبيق (١-١)

وضعت ثلاث شحنات على رؤوس مثلث متساوي الأضلاع *(ABC)*، تأمل الشكل (٣-١)، مقاديرها $(\square 10 \times 10^{\square 6}\ C)$، $(+1 \times 10^{\square 6}\ C)$، $(+2 \times 10^{\square 6}\ C)$ على التوالي، أوجد حسابياً القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على الشحنة الموجودة عند النقطة *(B)*.



الشكل (٣-١)، تطبيق (١-١)

الحل *Solution*:

$$F_{BA} = 9\times 10^{9}\,\frac{(-10\times 10^{-6})(+4\times 10^{-6})}{(20\times 10^{-2})^{2}} = -9\,N$$

$$F_{BC} = 9\times 10^{9}\,\frac{(+2\times 10^{-6})(+4\times 10^{-6})}{(20\times 10^{-2})^{2}} = 1.8\,N$$

ولإيجاد المحصلة نحتاج إلى تحليل القوة (F_{BA}) إلى مركبتيها السينية والصادية، الشكل (٣-١ ب)، مع ملاحظة أنَّ القوة (F_{BC}) واقعة على المحور السيني.

$$F_{BA,x} = F_{BA}\cos 60 = 4.5\,N$$
$$F_{BA,y} = F_{BA}\sin 60 = 7.79\,N$$
$$\sum F_x = F_{BA,x} - F_{BC} = 4 - 1.8 = 2.2\,N$$
$$\sum F_y = 7.79\,N$$
$$F = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} = 8.09\,N$$
$$\tan(\theta) = \frac{\sum F_y}{\sum F_x} = \frac{7.79}{2.2} = 3.54$$
$$\theta = \tan_o^{-1}(3.54) = 74.2$$

ونلاحظ في التطبيق (١-١) أننا استخدمنا المحاور الديكارتية (x, y) لدراسة مجموعة القوى المؤثرة في ذات الوقت على شحنة محددة، وذلك باستخدام الطريقة التحليلية، حيث يكون مركز المحاور المتعامدة عند نقطة التأثير، ونأمل من أعزائنا الطلبة اعتماد هذه الطريقة المبسطة لتحديد مقدار واتجاه المحصلة للقوى المؤثرة باعتبارها كمية اتجاهية، وذلك في أي مسألة مشابهة لهذا التطبيق.

تطبيق (١-٢)

إذا كانت شحنة نواة ذرة الهيليوم تساوي $(2\,e)$، وشحنة نواة ذرة النيون تساوي $(10\,e)$، والمسافة الفاصلة بين النواتين تساوي $(3\,nm)$. أوجد مقدار القوة الكهروستاتيكية بينهما.

الحل *Solution*:

هذا تطبيق مباشر على قانون كولوم، وبما أن ثابت السماحية النسبية لم يذكر في هذا التطبيق فإن:

$$F=\frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1q_2}{r^2}$$
$$r=3nm=3\times10^{-9}\,m$$
$$q_1=2e=2(1.6\times10^{-19}\,C)$$
$$q_2=10e=10(1.6\times10^{-19}\,C)$$
$$\varepsilon_o=8.85\times10^{-12}\,N^{-1}.m^{-2}.C^2$$
$$F=\frac{1}{4\pi\left(8.85\times10^{-12}\right)}\frac{2\left(1.6\times10^{-19}C\right)10\left(1.6\times10^{-19}C\right)}{\left(3\times10^{-9}m\right)^2}=5.12\times10^{-10}\,N$$

وهي قوة ذات إشارة موجبة، أي أنها قوة تنافر لأن الشحنتين متماثلتين.

> ملاحظة: حاول إعادة حل هذا التطبيق باستخدام الثابت $(k=9\times10^9\,N\,m^2\,C^{-2})$، وستجد أنك ستحصل على النتيجة نفسها.

٤-١ المجال الكهربائي *The Electric Field*:

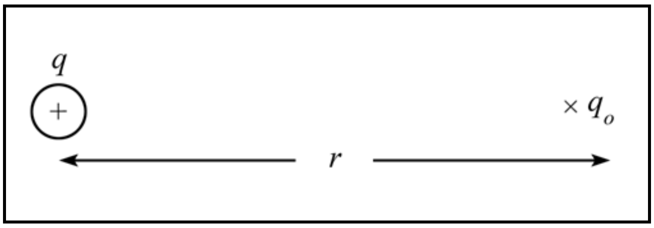
المجال الكهربائي هو عبارة عن حيِّز مكون من مجموعة من المتجهات أو حقل من المتجهات *vectors field* بمعدل متجه واحد لكل نقطة حول الشحنة الكهربائية، ويُختبر المجال الكهربائي بواسطة وضع شحنة اختبارية *test charge* (q_o) بالقرب من جسم مشحون كهربائياً بشحنة مقدارها (q)، ثم نقوم بحساب القوة الكهروستاتيكية $(\vec{F})$ المؤثرة على الشحنة الاختبارية (q_o)، وهكذا نجد أنّ المجال الكهربائي الناشئ عن تأثير الجسم ذي الشحنة (q) على الشحنة (q_o)، هو عبارة عن القوة الكهروستاتيكية التي تنشأ بين هاتين الشحنتين والمؤثرة على الشحنة الاختبارية (q_o)، وباستخدام النظام الدولي للقياس نعرِّف المجال الكهربائي بأنَّه القوة الكهروستاتيكية المساوية لواحد نيوتن والتي تؤثر على شحنة كهربائية مقدارها واحد كولوم، وهذا ما يمكننا التعبير عنه رياضياً بالعلاقة الآتية:

$$\boxed{\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q_o}}$$ (تعريف المجال الكهربائي) (١-٧)

حيث $(\vec{E})$ هي شدة المجال الكهربائي، وهو كمية اتجاهية مقدارها $(\vec{F}/q_o)$ واتجاهها هو اتجاه القوة $(\vec{F})$ نفسه، أما وحدة قياسه في النظام العالمي (SI) فهي (N/C).

ومن الجدير بنا أن نؤكد على أن الشحنة الاختبارية سميت بهذا الاسم لأن مهمتها هي اختبار وجود المجال الكهربائي فقط، وليس لها أثر يذكر على طبيعته أو مقداره، إنما ينشأ المجال الكهربائي بسبب شحنة الجسم (q)، ولبيان ذلك تأمل الشكل (١-١)، حيث أن القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على (q_o) هي:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq_0}{r^2}\hat{r}$$



الشكل (١-١)

الشحنة الاختبارية (q_o) تقع داخل حيِّز المجال الكهربائي للشحنة (q)

حيث (r) المسافة الفاصلة بين الشحنتين، أما شدة المجال الكهربائي فهو:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_o} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\hat{r} \qquad (١□٨)$$

وهكذا نتبين أن الشحنة الاختبارية لا علاقة لها بالمجال الكهربائي. ومتجه الوحدة $(\hat{r})$ يشير إلى أنَّ اتجاه المجال $(\vec{E})$ باتجاه القوة $(\vec{F})$.

وتختلف شدة المجال الكهربائي $(\vec{E})$ بحسب اختلاف الظروف الفيزيائية للشحنة التي تسببه[١]، والجدول (٢-١) يوضح شدة المجال $(\vec{E})$ لمجموعة من هذه الحالات. كما أن شكل خطوط المجال الكهربائي يختلف باختلاف الطبيعة الكهربائية للشحنة، انظر الشكل (٥-١) و(٦-١).

---

(١) تعمدنا وضع الجدول (٢-٤) بهدف إعطاء الطالب أمثلة على بعض حالات المجال الكهربائي.

المقدار (N/C)	المجال الكهربائي ***Electric Field***	
٣×١٠^{٢١}	على سطح نواة اليورانيوم	*at the surface of uranium nuclus*
٥×١٠^{١١}	على مدار الإلكترون في ذرة الهيدروجين	*within a hydrogen atom, at the electron orbit*
٣×١٠^{٦}	مجال الانهيار الكهربائي في الهواء	*electric breakdown occurs in air*
$١٠^{٣}$	ماسح آلة التصوير الضوئي	*at the charged drum of a photocopier*
$١٠^{٣}$	مجال تسريع الإلكترونات في التلفزيون	*the electron beam accelerator in a TV set*
$١٠^{٣}$	حول مشط بلاستيكي	*near a charged plastic comb*
$١٠^{٢}$	طبقة الغلاف الجوي السفلى	*in the lower atmosphere*
$١٠^{٢}$	المجال على سلك من النحاس داخل البيت	*inside the copper wire of household circuits*

الجدول (٢-١) يبين شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$) لمجموعة من الحالات المختلفة

١-٥ المجال الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية *The Electric Field Due To A Point Charge*:

إن المجال الكهربائي $(\vec{E})$ الناشئ عن شحنة نقطية مقدارها (q)، عند نقطة تبعد عنها مسافة مقدارها (r) هو:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\hat{r}$$

والصيغة الرياضية المتداولة لحساب شدة المجال الكهربائي هي:

(١-٩) (تعريف المجال الكهربائي لشحنة) $\boxed{E = k\frac{q}{r^2}}$

حيث $(\hat{r})$ يمثل متجه الوحدة *unit vector* لمتجه المسافة الواصل بين الشحنة والنقطة المطلوب تعيين مقدار المجال الكهربائي عندها، أما اتجاه $(\vec{E})$ فهو بالاتجاه الذي يبدو مبتعداً عن الشحنة إذا كانت موجبة، انظر الشكل (٥-١) ومقترباً منها إذا كانت الشحنة سالبة، انظر الشكل (٦-١).

تطبيق (٣-١)

إذا كان نصف قطر *radius* نواة ذرة اليورانيوم (r) يساوي $(6.8\ fm)$ وإذا ما افترضنا أن شحنة النواة تتوزع بشكل منتظم في داخلها. أوجد حسابياً شدة المجال الكهربائي عند نقطة على سطح النواة.

الحل *Solution*:

باستخدام العلاقة الرياضية (١٠-١) نجد أنَّ:

$$E = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon_0}\frac{Z\,e}{r^2} = k\frac{Z\,e}{r^2}$$

$$= (9\times10^9\ N.m^2.C^{-2})\frac{(92)(1.6\times10^{-19}C)}{(6.8\times10^{-15}m)^2}$$

$$E = 2.9\times10\,N^{21}/C$$

حيث (Z) تمثل عدد البروتونات داخل نواة اليورانيوم.

١-٦ الجهد الكهربائي *The Electric Potential*:

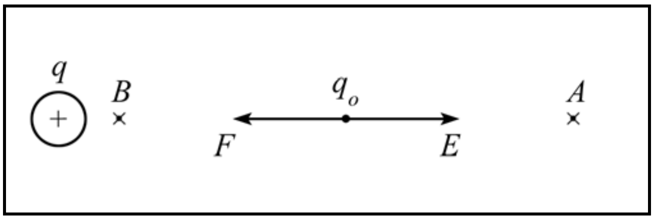
إذا قمنا بوصل جسمين مشحونين كهربائياً، فإن الشحنات تبدأ بالانتقال من أحدهما إلى الآخر، وهذا لا يحدث إلا إذا كان الجهد الكهربائي لأحدهما أعلى من الآخر، إذاً:

١- ماذا نقصد بمفهوم الجهد الكهربائي؟

٢- ما هي الكميات الفيزيائية التي يعتمد عليها الجهد الكهربائي؟

٣- ما هي العلاقة بين كلٍ من الجهد الكهربائي في نقطة ما والمجال الكهربائي لها؟

وللإجابة على هذه التساؤلات دعنا نتأمل الشكل (٧-١).



الشكل (٧-١) فرق الجهد لشحنة كهربائية اختبارية (q_o)

إذا تحركت الشحنة الكهربائية الاختبارية *test charge* (q_o) من النقطة *(A)* إلى النقطة *(B)* وبسرعة ثابتة داخل مجال تأثير الشحنة الموجبة *(+q)*، فإن مقداراً من الشغل يُبذل عليها ويُختزن فيها على شكل طاقة تسمى الطاقة الكامنة الكهربائية *electric potential energy*، والمقدار الناتج عن قسمة الشغل المبذول في تحريك هذه الشحنة الاختبارية بين نقطة البداية *(A)* ونقطة النهاية *(B)* على الشحنة الاختبارية ذاتها يسمى فرق الجهد بين هاتين النقطتين *potential difference*. ونستطيع التعبير رياضياً عن هذا المفهوم بالعلاقة الآتية:

$$V_{BA} = V_B - V_A = \frac{W_{A\to B}}{q_o}$$
$$W_{A\to B} = (V_B - V_A)q_o = \Delta U \qquad (١٠□١)$$

حيث أن:

$W_{A\to B}$: الشغل المبذول بواسطة القوة الخارجية *(F)* لنقل الشحنة (q_o) من *(A)* إلى *(B)*.

V_B : الجهد الكهربائي عند النقطة *B*.

V_A : الجهد الكهربائي عند النقطة *A*.

ΔU : التغير في الطاقة الكامنة للشحنة (q_o).

ولبيان العلاقة بين الشغل المبذول على الشحنة (q_o) وطاقتها الكامنة الكهربائية، نتأمل مرة أخرى الشكل (٨-١) لنجد أن القوة (F) تساوي المقدار $(E\,q)$ وتعاكسه في الاتجاه وهذا ما يفسر لنا أن الشغل هو مقدار سالب، أي أن:

$$-W_{A\to B} = -\Delta U$$

ونستطيع الآن أن نُعرّف حاصل ضرب الشحنة في الجهد عند نقطة ما، بأنّه الطاقة الكامنة للشحنة في تلك النقطة، فمثلاً الطاقة الكامنة للشحنة (q_o) عند النقطة B تساوي $(V_B\,q_o)$. وبناءً على ما تقدم فإن فرق الجهد بين نقطتين $(V_B - V_A)$ يساوي مقدار التغير الحاصل في طاقة الوضع الكهربائية مقسوماً على مقدار الشحنة المنقولة ومعنى ذلك:

$$V_B - V_A = \frac{\Delta U}{q_o} = \frac{U_B - U_A}{q_o}$$

وبصفة عامة يمكننا إيجاد مقدار الشغل الكهربائي المبذول بين نقطتين داخل المجال الكهربائي للشحنة النقطية (q) والمؤثر على شحنة اختبارية (q_o) من العلاقة الرياضية:

$$\begin{aligned} W &= F.r \\ &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{qq_o}{r^2}r = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{qq_o}{r} \end{aligned}$$

حيث (r) هي المسافة الفاصلة بين النقطتين (A) و(B)، نلاحظ أيضاً أن كلاً من (F) لهما ذات الاتجاه أي أن الزاوية بينهما تساوي الصفر.

تعريف الجهد الكهربائي في نقطة: هو الشغل المبذول لتحريك وحدة الشحنات الكهربائية(الكولوم) من الـ "مالا نهاية" إلى النقطة المطلوبة دون إحداث أي تغيير في طاقتها الحركية. ويقاس الجهد بوحدة (J/C) وهي عبارة عن الفولت (V).

الفولت:هو جهد نقطة يلزم جولا واحدا لنقل كولوم واحد إليها من الـ "مالا نهاية". وهو أيضا فرق الجهد بين نقطتين يلزم جولا واحدا لتحريك كولوم واحد بينهما.

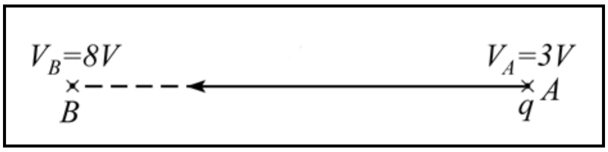
تطبيق (١-١)

شحنة كهربائية مقدارها $(1 \times 10^{-6}\ C)$ موجودة في نقطة يبلغ مقدار جهدها $(3V)$ تأمل الشكل (٨-١)، ثم أوجد حسابياً:

١- الطاقة الكامنة للشحنة الكهربائية.

٢- مقدار الشغل المطلوب لنقلها إلى نقطة أخرى يبلغ مقدار جهدها $(٨V)$.

٣- مقدار التغير في الطاقة الكامنة للشحنة عند نقلها من الموضع (A) إلى الموضع (B).



الشكل (٨-١)، التطبيق (١-١)

الحل *Solution*:

١- الطاقة الكامنة:

$$U = q\,V$$
$$= (١ \times ١٠^{-٦}\ C)(٣V) = ١٢ \times ١٠^{-٦}\ J$$

٢- الشغل المطلوب لنقل الشحنة من (A) إلى (B).

$$W = q(V_B - V_A)$$
$$= (١ \times ١٠^{-٦}\ C)(٨V - ٣V) = ٢٠ \times ١٠^{-٦}\ J$$

٣- التغير في الطاقة الكامنة للشحنة:

$$\Delta U = U_B - U_A = ٢٠ \times ١٠^{-٦}\ J$$

ملاحظة: ماذا نستنتج من مقارنة نتائج المطاليب (٢ و٣)؟

وبالرجوع إلى العلاقة الرياضية التي تعبّر عن القوة الكهربائية الناشئة بين الشحنة (q) وشحنة اختبارية (q_o) ومفهوم الشغل خلال المسافة (r) عن الشحنة الكهربائية (q)، ومقدار الشغل المطلوب إنجازه، نجد أن:

$$W = Fr = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{qq_o}{r^2}r = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{qq_o}{r}$$

$$V = \frac{W}{q_o} = \frac{\frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{qq_o}{r}}{q_o} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r}$$

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r}$$

والصيغة الرياضية المتداولة لحساب الجهد الكهربائي هي:

(١١□٦) (تعريف الجهد الكهربائي لشحنة) $\boxed{V = k\frac{q}{r}}$

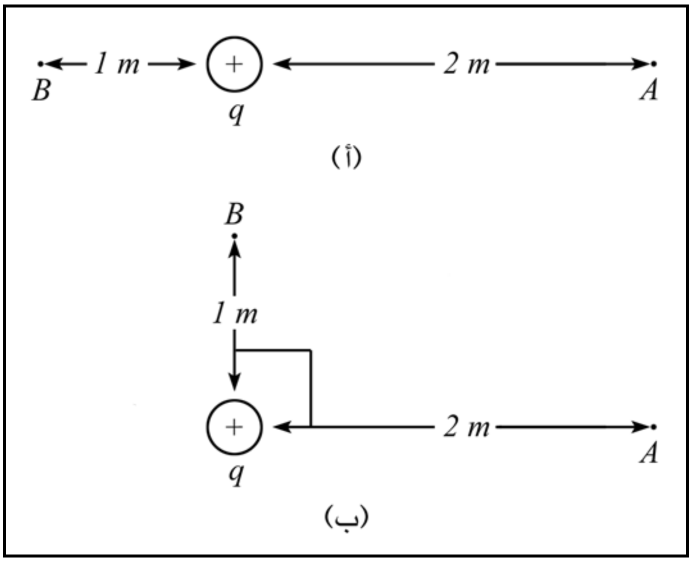
وهي العلاقة الرياضية التي تعبِّر عن الجهد الكهربائي عند نقطة تبعد مسافة (r) عن الشحنة (q)، وهو كمية عددية وليست اتجاهية.

تطبيق (٥-١)

إذا كان مقدار الشحنة النقطية *point charge*، الموضحة في الشكل (١٠-١) يساوي $(١\ \mu C)$، وتبعد النقطة (A) عنها مسافة قدرها $(٢\ m)$، أما النقطة (B) فتبعد $(١\ m)$.

١- أوجد فرق الجهد $(V_A - V_B)$ في الشكل (١٠-١ أ).

٢- أوجد فرق الجهد $(V_A - V_B)$ في الشكل (٩-١ ب).



الشكل (٩-١)، التطبيق (٥-١)

الحل ***Solution***:

-١

$$V_A - V_B = k\frac{q}{r_A} - k\frac{q}{r_B}$$
$$= kq\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$
$$= \left(9\times 10^9\ N\,m^2\,C^{-2}\right)\left(1\times 10^{-6}\ C\right)\left(\frac{1}{2m} - \frac{1}{1m}\right)$$
$$= -4500V$$

٢- بما أن الجهد الكهربائي يعتمد على مقدار المسافة (r) وليس على اتجاهها إذاً:

$$V_A - V_B = -4500V$$

٧-١ السعة الكهربائية *Capacitance*:

تعتبر السعة الكهربائية مفهوماً هاماً للغاية، وهو من أهم التطبيقات المباشرة على مفهوم الكهرباء الساكنة، وذلك بعد وصل طرفي المكثف الكهربائي *capacitor* بفرق جهد مناسب. إنَّ السعة *capacitance* صفة من صفات المكثف والذي يُصمم بأشكال مختلفة تناسب الغرض المقصود من استعمالها، إذ أن هذا الاستعمال يؤدي إلى تخزين الطاقة الكهربائية في المكثف، كما يؤدي إلى نشوء مجال كهربائي بين لوحيه له تطبيقات عديدة في الدوائر الكهربائية والإلكترونية. وكما نعلم، فإنَّ المكثف هو عبارة عن لوحين متوازيين مصنوعين من مادة ناقلة للكهرباء يفصل بينهما وسط عازل، يحمل الوجهان الداخليان للوحين المتوازيين شحنات كهربائية متعاكسة بسبب فرق الجهد الكهربائي (V) بينهما. إنَّ كمية الشحنة المختزنة *storage charge* (q) في المكثف تتناسب تناسباً طردياً مع فرق الجهد بين لوحيه، أي أنَّ:

$$q \propto V$$

حيث أنَّ ثابت التناسب هنا هو ما نطلق عليه "السعة الكهربائية" للمكثف (C)، والتي يعتمد مقدارها على الأبعاد الهندسية[1] للمكثف ونوع المادة العازلة بين اللوحين، أي أن:

$$q = CV \qquad (١\square١٢)$$

(١) المقصود بالأبعاد الهندسية للمكثف، مساحة اللوحين وشكلهما الهندسي، والمسافة الفاصلة بينهما.

ولغرض التعرف على الشكل المبسط للمكثف الكهربائي، انظر الشكل (١٠-١ أ ، ب). إن وحدة قياس السعة الكهربائية في النظام الدولي *(SI)* هي الكولوم لكل فولت، أو ما يعرف بالفاراد *Farad* حيث أن:

$$1\ Farad = 1\ Coulomb/1\ Volt$$

$$1\ F = 1\ C/1\ V$$

الفاراد :هو مقدار السعة الكهربائية لموصل إذا أعطي شحنة كهربائية مقدارها كولوم واحد تغير جهده بمقدار فولت واحد.

ويعتبر الفاراد وحدة كبير جداً لقياس السعة الكهربائية للمكثف ولهذا نلجأ عادةً إلى استعمال أجزاء الفاراد ونذكر هنا أكثرها تداولاً، مايكروفاراد، نانوفاراد، وبيكوفاراد.

إن سعة المكثف ذي اللوحين المتوازيين السابق الذكر، يمكن حسابها وذلك بحساب شدة المجال الكهربائي ($\vec{E}$) الناشئ بين اللوحين وذلك باعتماد قانون كاوس *Gaus's low* الذي يربط بين كل من المجال الكهربائي والشحنة الكهربائية بالعلاقة الرياضية:

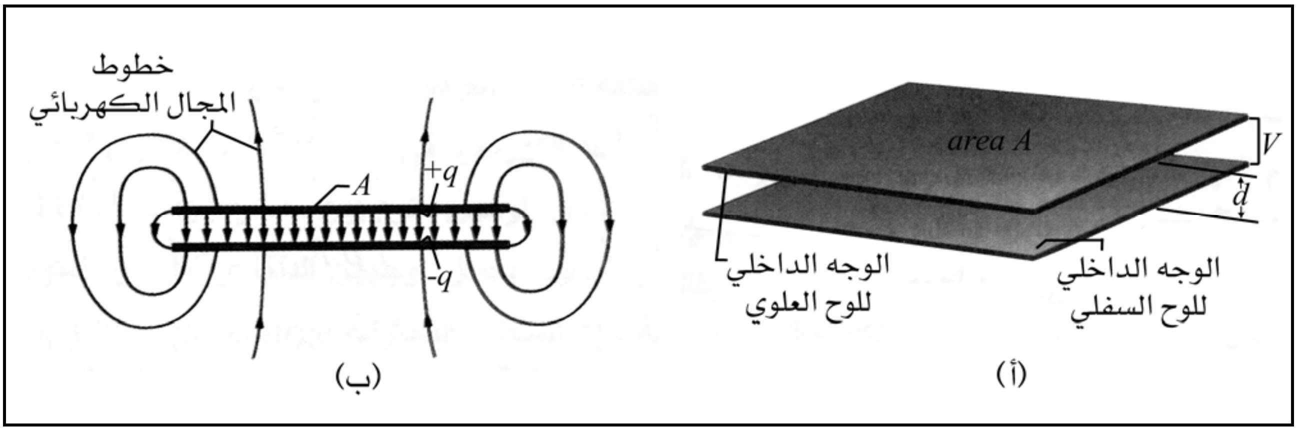
$$\varepsilon_0 \oint \vec{E}.\vec{d}A = q \qquad (١\square١٣)$$

حيث *(q)* هي الشحنة الكهربائية الموضوعة على السطح، والتكامل هنا يشمل السطح الكلي للوح الناقل، أما *(dA)* فهو الجزء التفاضلي من السطح الكلي ذي المساحة *(A)*، بينما يمثل المتجه ($d\vec{A}$) متجه المساحة العمودي عليها، أما إذا لم يكن عمودياً، فنلاحظ أنَّ علامة الضرب القياسي الموجودة بين متجه المجال ($\vec{E}$) ومتجه المساحة ($d\vec{A}$)، هي التي تضبط هندسياً هذه العلاقة. وباعتبار أن كلاً من ($\vec{F}$) و(ε_0) من جهة و($\vec{E}$) و*(dA)* من جهة أخرى موازية لبعضها البعض، أي أن الزاوية بين ($\vec{E}$) و($d\vec{A}$) تساوي الصفر، إذاً يمكننا إعادة صياغة المعادلة (١١\square١) على النحو الآتي:

$$\varepsilon_0 \vec{E} A = q \qquad (١\square١١)$$

ذلك أن تكامل الجزء التفاضلي من المساحة *(dA)* هو المساحة الكلية *(A)*، كما يمكننا حساب فرق الجهد *(V)* بين لوحي المكثف وذلك بعد أن عرفنا مقدار المجال الكهربائي من المعادلة المعروفة:

$$V = Ed \qquad (١\square١٥)$$



الشكل (١٠-١)

أ- وفيه يظهر شكل المكثف ذي اللوحين المتوازيين، والمتساويين في المساحة *(A)* وتفصلهما عن بعضهما مسافة *(d)*، بينما يظهر فرق الجهد بينهما *(V)*، وكذلك الشحنتين على الوجهين الداخليين *(+q)* و*(-q)*.

ب- وفيه تظهر خطوط المجال الكهربائي ($\vec{E}$) وهو مجال منتظم في وسط المكثف بينما يتهدب *(fringes)* عند حافتي المكثف، ويتم إهمال مجال منطقة التهدب لصغر المسافة ***(d)*** مقارنة بالمسافة ***(A)***

وهكذا، ومن المعادلات (١٢□١)، (١١□١)، (١٥□١) نجد أن:

$$\varepsilon_o E A = C E d$$

$$C = \varepsilon_o \frac{A}{d} \qquad (١٦□١)$$

وبما أن الحالة العامة تقتضي وجود ثوابت عزل لمواد عازلة أخرى غير الفراغ ولهذا لا بد من إعادة صياغة المعادلة (١٦□١) على الشكل الآتي:

$$\boxed{C = \varepsilon_o \varepsilon_r \frac{A}{d}} \qquad \text{(سعة المكثف)} \qquad (١٧□١)$$

حيث (ε_r) هو ثابت السماحية النسبية للمادة العازلة التي يمكن أن تملأ الفراغ بين لوحي المكثف، كالزجاج والمايكا، وقد مر ذكره عند مناقشة قانون كولوم. ويفضل البعض استخدام السماحية الكهربائية التي تساوي إلى ($\varepsilon = \varepsilon_o \varepsilon_r$)

٨-١ توصيل المكثفات على التوازي *Capacitors in Parallel*:

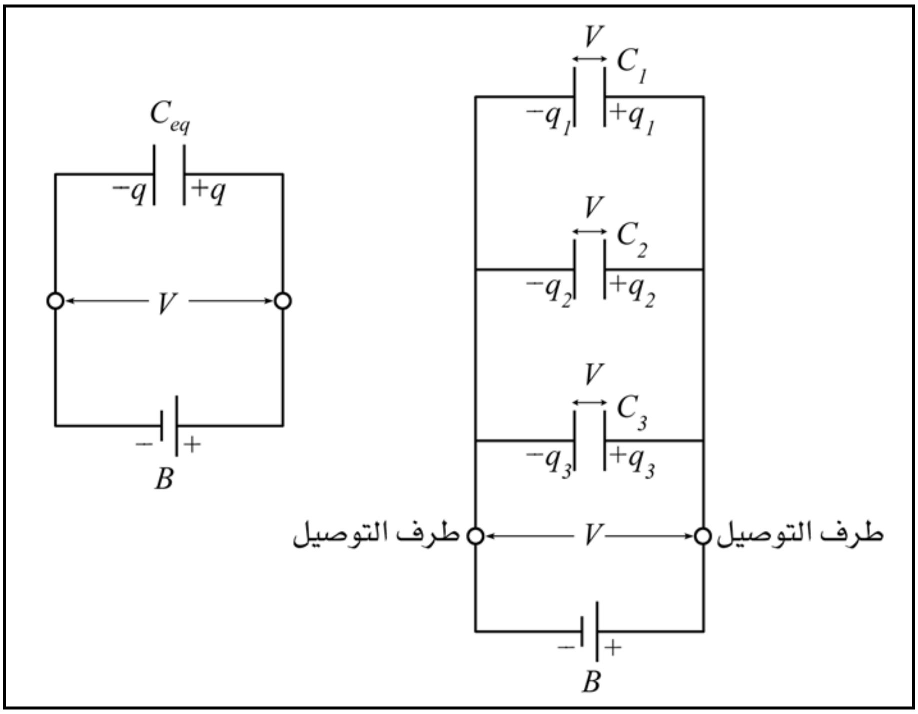
إن الاستخدامات العملية للمكثفات الكهربائية تقتضي استخدام مجموعة منها، وهذه المجموعة يتم وصل عدد منها على التوازي *in parallel* وذلك عند الحاجة إلى فرق جهد كبير، وأحياناً أخرى وصل

عدد منها على التوالي *in series* عند الحاجة إلى سعة كبيرة، وأحياناً أخرى على التوازي والتوالي معاً في آن واحد، وسوف نبدأ بإيجاد السعة المكافئة لمجموعة من المكثفات الموصولة على التوازي، بحيث توصل الألواح المشحونة بشحنة سالبة مع بعضها البعض وتوصل الألواح المشحونة بشحنة موجبة مع بعضها البعض، انظر الشكل (٥-١ أ ، ب)، تجد أن جميع المكثفات (C_1,C_2,C_3) لها الجهد (V) نفسه، أي أن:

$$V_1 = V_2 = V_3 = V$$

أما الشحنة الكلية (q):

$$q = q_1 + q_2 + q_3$$



الشكل (١١-١ أ، ب)

أ- يبين ثلاثة مكثفات (C_1,C_2,C_3) تم وصلها على التوازي *connected in parallel*، إلى مصدر فرق الجهد البطارية (B) والذي يساوي (V).

ب- ويبين المكثف (C_{eq}) المكافئ لمجموع المكثفات الثلاثة وكذلك يبين أن الشحنة الكلية هي عبارة عن مجموع الشحنات الثلاث $(q_1+q_2+q_3)$.

تمعن مرة أخرى بالشكل (١٠-١ ب)، تجد أنه يمثل المكثف المكافئ لمجموعة المكثفات الثلاثة، ولبيان ذلك تابع ما يلي:

$$q_1 = C_1V,\ q_2 = C_2V,\ q_3 = C_3V$$
$$q = q_1 + q_2 + q_3 = C_1V + C_2V + C_3V = V(C_1 + C_2 + C_3)$$

وهكذا نجد أن:

$$C = C_{eq} = \frac{q}{V} = C_1 + C_2 + C_3 + ... = \sum_{i=1}^{n} C_i ... \qquad (١□١٩)$$

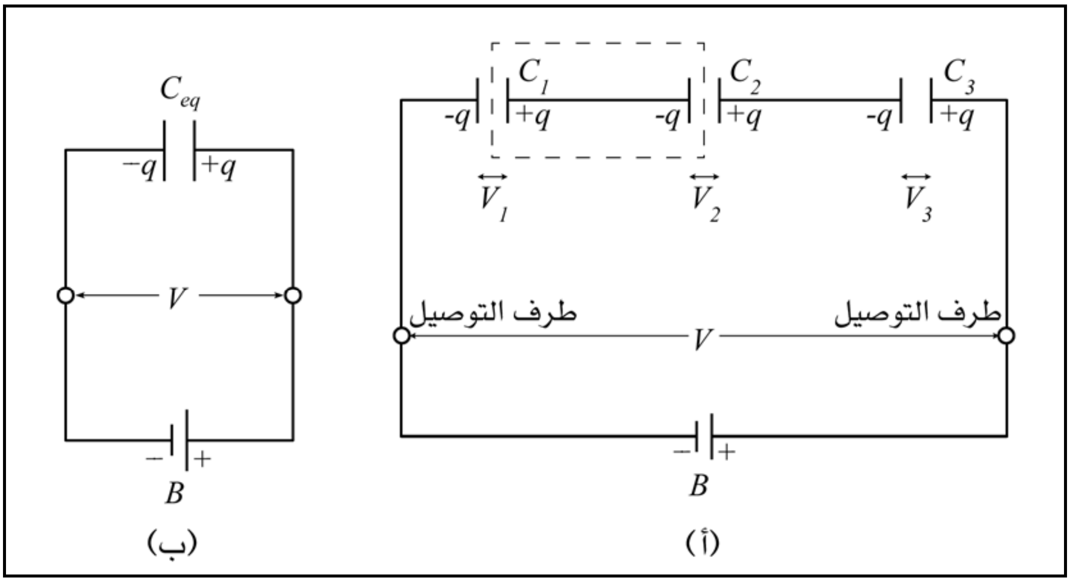
حيث (n) هو عدد المكثفات الموصولة على التوازي.

وهكذا نجد أنَّ السعة المكافئة في الشكل (١-١١) هي (C):

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

١-٨ توصيل المكثفات على التوالي *Capacitors in series*:

يمكننا عملياً توصيل مجموعة من المكثفات ببعضها البعض على التوالي *in series*، أي توصيل الألواح بطريقة متوالية اللوح الثاني للمكثف الأول مع اللوح الأول للمكثف الثاني، واللوح الثاني للمكثف الثاني مع اللوح الأول للمكثف الثالث، وهكذا إلى نهاية الأمر، انظر الشكل (١-١٢ أ، ب).



الشكل (١-١٢ أ، ب)

أ- يبين ثلاثة مكثفات (C_1, C_2, C_3) تم وصلها على التوالي *connected in series*، إلى مصدر فرق الجهد البطارية (B) والذي يساوي (V).

ب- يبين المكثف المكافئ (C_{eq}) كما يوضح أن فرق الجهد (V) عبر هذا المكثف المكافئ هو عبارة عن حاصل جمع فرق الجهد $(V_1 + V_2 + V_3)$ عبر المكثفات الموضحة في الجزء (ب) من هذا الشكل.

إنَّ ملاحظة الشكل (١-١٢) تبيِّن لنا أن مجموعة من المكثفات وعددها ثلاثة، تم وصلها على التوالي، وهذا ما يؤدي بالضرورة إلى وجود ثلاث قيم مختلفة لفرق الجهد بعدد المكثفات الموصولة على

التوالي، أي أنَّ لكل مكثف فرق الجهد الخاص به، (V_1, V_2, V_3) ، بينما نلاحظ أنَّ الشحنات الكهربائية متساوية لجميع هذه المكثفات، أي أن:

$$q = q_1 = q_2 = q_3$$

$$V_1 = \frac{q}{C_1}, V_2 = \frac{q}{C_2}, V_3 = \frac{q}{C_3}$$

أما فرق الجهد الكلي:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

وأخيراً فإن السعة المكافئة هي:

$$C_{eq} = \frac{q}{V} = \frac{q}{\frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}} = \frac{\cancel{q}}{\cancel{q}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)}$$

$$1 = C_{eq}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \qquad (١\square٢٠)$$

كما يمكن إعادة صياغتها بشكلها العام:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i-1}^{n} \frac{1}{C_i} \qquad (١\square٢١)$$

حيث (n) عدد المكثفات في الدائرة الموصلة على التوالي.

١٠-١ الطاقة الكهربائية المختزنة في مكثف مشحون *Storage Energy In A Charged Capacitor*:

إن مقدار الشحنة الكهربائية (q) في المكثف يتناسب مع فرق الجهد (V) بين طرفي المكثف الكهربائي، ومن المعلوم أن الجهد الكهربائي بين طرفي المكثف يبدأ من القيمة $(V = 0)$ عندما تكون الشحنة الكهربائية $(q = 0)$ ثم يزداد تدريجياً إلى القيمة $(V = V)$ عندما يكتمل شحن المكثف وتصل الشحنة الكهربائية إلى المقدار (q)، أي أن القيمة المتوسطة للجهد(معدل الجهد) بين طرفي المكثف هي:

$$\bar{V} = \frac{V + 0}{2} = \frac{1}{2}V \qquad (١\square٢٢)$$

حيث (V) هو فرق الجهد بين طرفي البطارية.

أما الشغل اللازم إنجازه لنقل الشحنة الكلية (q) عبر متوسط الجهد $(\bar{V})$ فهو:

$$W = q\left(\frac{1}{2}V\right) = \frac{1}{2}qV$$ (٢٣□١)

ويتم بعد ذلك تخزين هذا الشغل كطاقة كهربائية كامنة في المجال الكهربائي بين لوحي المكثف، ويمكن حسابه على النحو الآتي:

$$U = W = \frac{1}{2}qV = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2}CV^2$$ (٢١□١)

ويلاحظ بأن للمعادلة (٢١□١) لها ثلاث صيغ رياضية يمكن استخدامها حسب المعلومات المتوافرة عن الدائرة الكهربائية.

تطبيق (٦-١)

مكثفان سعة كل منهما $(C_1 = 200\,PF)$ ، $(C_2 = 600\,PF)$ تم وصلهما على التوازي، ثم شحنا حتى صار فرق الجهد بين لوحي كلٍ منهما (١٢٠ *volt*).

١- أوجد حسابياً الشحنة الكهربائية على كل مكثف.

٢- أوجد حسابياً السعة المكافئة للمجموعة.

الحل *Solution*:

-١

$$\begin{aligned}
q_1 &= C_1 V \\
&= (200\times10^{-12}\,F)(120V) \\
&= 2.4\times10^{-8}\,C \\
q_2 &= C_2 V \\
&= (600\times10^{-12})(120V) \\
&= 7.2\times10^{-8}\,C \\
q &= q_1 + q_2 \\
&= (2.4+7.2)\times10^{-8} = 9.6\times10^{-8}\,C
\end{aligned}$$

-٢

$$C = C_1 + C_2$$
$$= (200\times10^{-12}) + (600\times10^{-12})$$
$$= 800\times10^{-12}\ F$$
$$C = 8\times10^{-10}\ F$$

تطبيق (٧-١)

مكثفان سعة كل منهما $(C_1 = 3\,PF)$ ، $(C_2 = 6\,PF)$ تم وصلهما على التوالي، ثم وصلت المجموعة بفرق جهد مقداره $(V = ١٠\ volt)$.

١- أوجد حسابياً السعة المكافئة للمجموعة.

٢- أوجد حسابياً الشحنة الكلية على المجموعة والشحنة على كل مكثف.

٣- أوجد حسابياً فرق الجهد عبر كل مكثف.

الحل ***Solution***:

-١

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$
$$= \frac{1}{3\,PF} + \frac{1}{6\,PF} = \frac{(6+3)}{18\,PF}\ \frac{1}{2\,PF}$$
$$C = 2\,PF = 2\times10^{-12}F$$

-٢

$$q = CV$$
$$= (2\times10^{-12}\ F)(10V) = 2\times10^{-11}\ C$$

وبما أن التوصيل على التوالي:

$$q = q_1 = q_2 = 2\times10^{-11}C$$
$$V_1 = \frac{q}{C_1} = \frac{2\times10^{-11}C}{3\times10^{-12}F} = 6.67V$$
$$V_2 = \frac{q}{C_2} = \frac{2\times10^{-11}C}{6\times10^{-12}F} = 3.33V$$

ونلاحظ هنا أن توصيل المكثفات على التوالي يعمل على توزيع الجهد على المكثفات، أي أن:

$$V_t = V_1 + V_2$$
$$10 = 6.67 + 3.33 = 10\,volt$$

الخلاصة

Summary

- قانون كولوم: هو العلاقة الرياضية التي يمكننا استخدامها لحساب مقدار القوة الكهروستاتيكية بين شحنتين كهربائيتين، تفصلهما عن بعضهما مسافة معلومة، وصيغته الرياضية:

$$F(N)=\frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q_1 q_2}{r^2}=k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- الكولوم: هو مقدار الشحنة الكهربائية التي إذا وضعت في الفراغ على مسافة متر واحد من شحنة ثانية مماثلة لها، كانت القوة الكهروستاتيكية المتبادلة بينهما مساويةً إلى (N ١٠^٩ × ٩). وهو الوحدة الدولية لقياس مقدار الشحنة الكهربائية.

- المجال الكهربائي السكوني: هو عبارة عن حيِّز من الفراغ يحيط بشحنة كهربائية معلومة، يظهر ضمن حدوده تأثير القوة الكهروستاتيكية على شحنة اختبارية موجبة، إذا وضعت في أي نقطة داخل المجال، ويعبَّر عنه رياضياً بالمعادلة:

$$E(N/C)=\frac{F}{q_o}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r^2}=k\frac{q}{r^2}$$

- الجهد الكهربائي: هو الشغل الكهربائي المطلوب لنقل وحدة الشحنات الموجبة من الـ "مالا نهاية" إلى نقطة معلومة. ويعبَّر عنه رياضياً بالعلاقة:

$$V(volt)=\frac{-W_{\infty\to A}}{q_o}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r}=k\frac{q}{r}$$

- السعة الكهربائية لمكثف: هي كمية الشحنة الكهربائية اللازمة لإحداث تغير في جهد نظام معين (مكثف) بمقدار فولت واحد، ونعبِّر عنها رياضياً بالعلاقة:

$$C(\,farad\,)=\frac{q}{V}$$

ويمكننا حساب سعة المكثف إذا عرفنا أبعاده الهندسية والمسافة بين لوحيه، وطبيعة المادة العازلة بينهما من العلاقة الرياضية:

$$C = \varepsilon_o \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

كما يمكننا إيجاد السعة المكافئة لمجموعة من المكثفات موصولة على التوالي من القانون:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ...$$

أما إذا كانت مجموعة المكثفات موصولة على التوازي فإن السعة المكافئة هي:

$$C_{eq} = C_{١} + C_{٢} + ...$$

أما الطاقة الكهربائية المختزنة في المكثف الكهربائي فيمكن حسابها من العلاقة الرياضية:

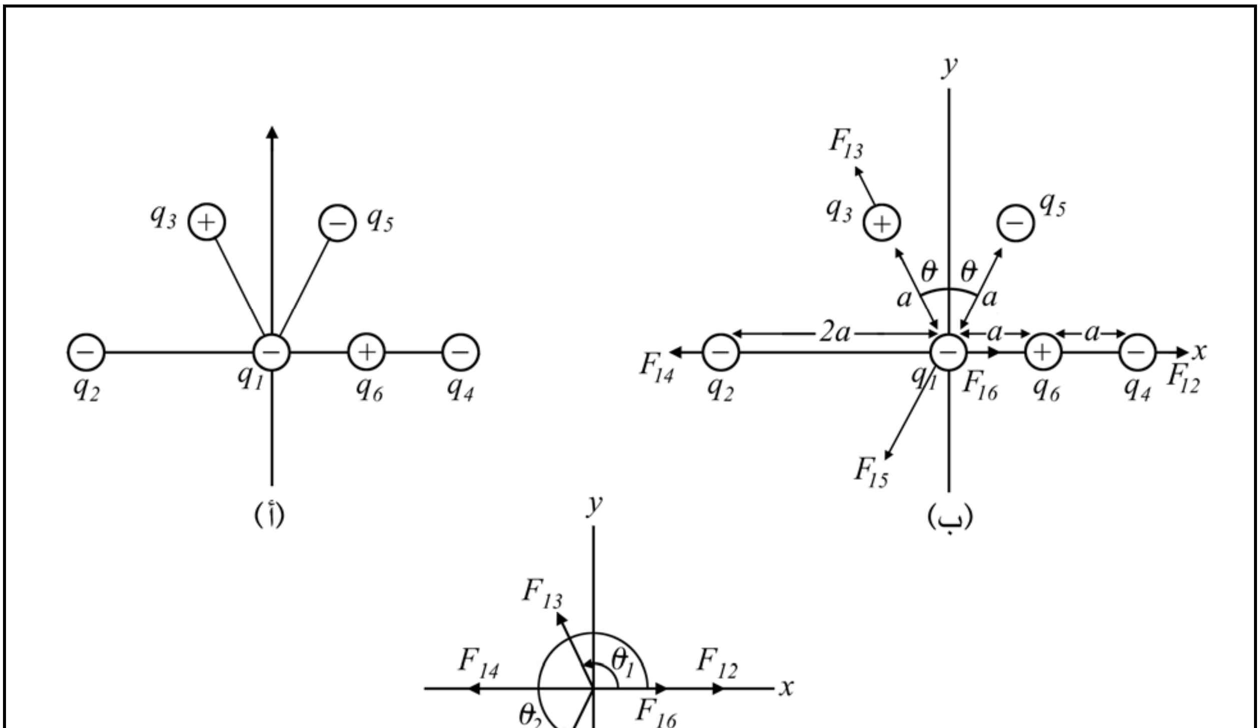
$$U = \frac{1}{2} qV$$

الامتحانات الذاتية
Self Test Exam

ولغرض التدريب العملي على اختبار الطالب لنفسه، والتأكد من جدارته في المقدرة الفعلية على فهم واستيعاب موضوع الكهرباء الساكنة، تم تخصيص خمسة امتحانات ذاتية.

الامتحان الذاتي الأول:

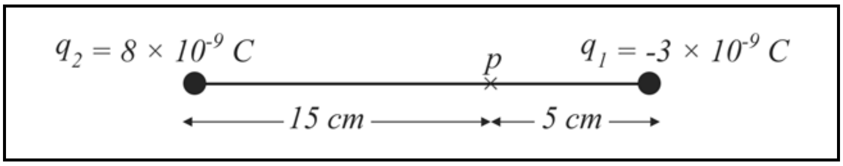
الشكل (١٣-١ أ، ب، جـ) يمثل ترتيباً لست شحنات كهربائية، حيث تبلغ المسافة (a) $(٢\ cm)$ والزاوية (θ) $(٣٠°)$، أما مقدار كل من الشحنات الست فهو $(٣,٠ \times ١٠^{-٦}\ C)$ وطبيعتها الكهربائية موضحة على الشكل. أوجد القوة الكهروستاتيكية (F_1) المؤثرة على الشحنة (q_1) من باقي الشحنات الأخرى.



الشكل (١٣-١ أ، ب، جـ)

الامتحان الذاتي الثاني:

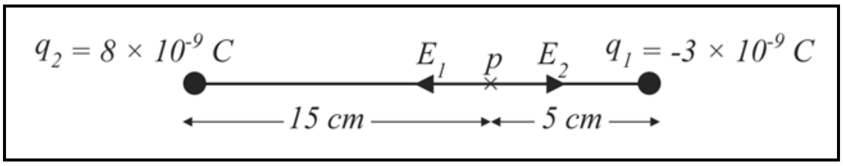
تأمل الشكل (١١-١)، ثم أوجد حسابياً مقدار الجهد الكهربائي عند النقطة (p).



الشكل (١١-١) الامتحان الذاتي الثاني

الامتحان الذاتي الثالث:

تأمل الشكل (١٥-١)، ثم أوجد حسابياً مقدار شدة المجال الكهربائي عند النقطة (p)، ثم حدّد اتجاهه.



الشكل (١٥-١) الامتحان الذاتي الثالث

الامتحان الذاتي الرابع:

مكثف كهربائي *capacitor* متوازي اللوحين، والمسافة الفاصلة بينهما $(d = 1 \times 10^{-3}\ m)$، ومقدار سعته $(C = 6 \times 10^{-6}\ F)$.

قمنا بربط لوحيه بفرق جهد كهربائي (V)، حتى أصبح مقدار شحنته الكهربائية $(q = 6 \times 10^{-6}\ C)$، أوجد حسابياً:

١- مقدار فرق الجهد الكهربائي بين لوحي المكثف (V).

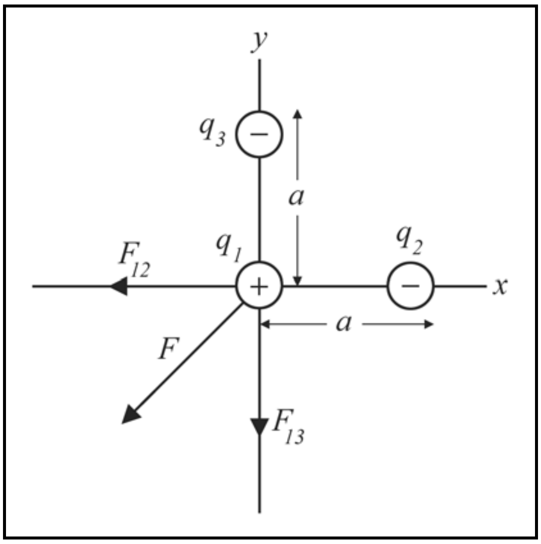
٢- مقدار المجال الكهربائي داخل المكثف (E).

٣- مقدار الشغل اللازم لنقل شحنة كهربائية مقدارها $(0.5 \times 10^{-6}\ C)$ من اللوح الموجب للمكثف إلى اللوح السالب.

الامتحان الذاتي الخامس:

في الشكل (١٦-١) ترتيب لثلاث شحنات كهربائية $(q_1 = 10\,nC)$ و $(q_2 = -20\,nC)$ و $(q_3 = -20\,nC)$، أما المسافة الفاصلة $(a = 30\,cm)$.

أوجد حسابياً مقدار القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على الشحنة (q_1).



الشكل (١٦-١) الامتحان الذاتي الخامس

ملاحظة: نتمنى على أبنائنا الطلبة المحاولة الجادة في حل مسائل الامتحان الذاتي على ورقة خارجية، ثم إجراء المقارنة بين ما توصلوا إليه مع الحل النموذجي المرفق آخر الكتاب في الملحق (د).

مسائل وتمارين الوحدة الأولى

Unit One Exercises & Problems

١-١ شحنتان كهربائيتان مقدار الأولى ($2\ \mu C$) ومقدار الثانية ($3\square\ \mu C$)، المسافة الفاصلة بينهما ($30\ cm$). أوجد مقدار القوة الكهروستاتيكية التي تؤثر على الشحنة الثانية. هل هي قوة تجاذب أم تنافر؟ لماذا؟

١-٢ إذا كانت شحنة نواة ذرة الأرغون تساوي ($18\ e$). أوجد القوة الكهروستاتيكية بين نواتي ذرتي أرغون المسافة الفاصلة بينهما ($1\ nm$). هل هي قوة تجاذب أم تنافر؟ لماذا؟

١-٣ كرتان من نخاع البيلسان تحمل الأولى شحنة مقدارها ($3\times10^{-9}\ C$) والثانية شحنة مقدارها ($120\times10^{-9}\ C$)، تفصلهما عن بعضهما مسافة قدرها ($3\ nm$) في الهواء، أوجد مقدار القوة الكهروستاتيكية بينهما. هل هي قوة تجاذب أم تنافر؟

١-١ ما هو مقدار الشحنة الكهربائية النقطية التي تولد مجالاً كهربائياً مقداره ($1\ N/C$) عند نقطة تبعد عنها مسافة مقدارها ($1\ m$)؟

١-٥ جسيم مقدار كتلته ($0.5\times10^{-3}\ kg$) يحمل شحنة سالبة مقدارها ($5\times10^{-6}\ C$)، تحرك هذا الجسيم بدءاً من السكون بتأثير مجال كهربائي مقداره ($0.5\times10^{5}\ N/C$) مسافة قدرها ($10\times10^{-2}\ m$) أوجد حسابياً:

١- مقدار القوة الكهروستاتيكية التي أثر بها المجال الكهربائي في الجسيم.

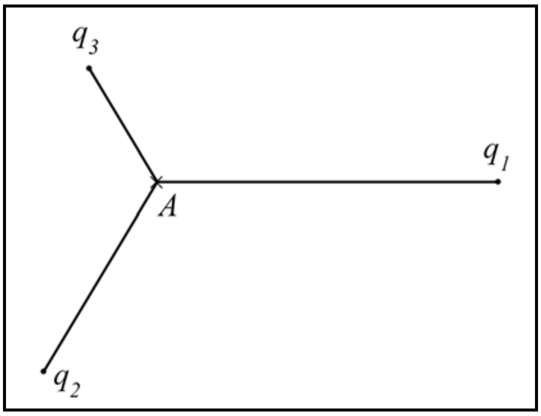
٢- مقدار السرعة النهائية للجسيم.

٣- مقدار الشغل الذي بذله المجال الكهربائي لتحريك الجسيم.

ملاحظة: هل يمكنك أن تفسّر أين ذهب هذا الشغل؟

مساعدة بسيطة: يمكنك عزيزي الطالب استخدام قانون نيوتن الثاني في الحركة وكذلك قوانين الحركة على خط مستقيم لحل هذه المسألة.

١-٦ ثلاث شحنات كهربائية مقاديرها على التوالي $(q_1 = -5\times10^{-9}\ C)$ ، $(q_2 = 6\times10^{-6}\ C)$ ، $(q_3 = 3\times10^{-6}\ C)$ تبعد عن النقطة (A) على التوالي $(r_1 = 10\times10^{-2}\ m)$ ، $(r_2 = 5\times10^{-2}\ m)$ ، $(r_3 = 3\times10^{-2}\ m)$ ، انظر الشكل (١٧-١)، أوجد حسابياً مقدار الجهد الكهربائي عند النقطة (A).



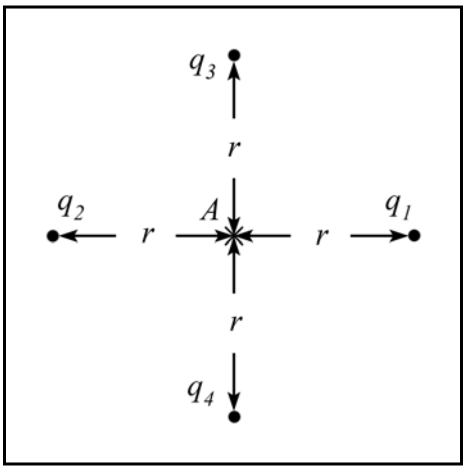
الشكل (١٧-١)، المسألة (١-٦)

١-٧ أربعة شحنات كهربائية مقاديرها على التوالي $(q_1 = -3\times10^{-9}\ C)$ ، $(q_2 = q_3 = q_4 = 3\times10^{-9}\ C)$ ، تبعد عن النقطة (A) مسافات متساوية مقدارها $(r = 3\times10^{-2}\ m)$ ، انظر الشكل (١٨-١)، أوجد حسابياً:

١- مقدار الجهد الكهربائي عند النقطة (A).

٢- مقدار (محصلة) المجال الكهربائي عند النقطة (A)، ثمَّ حدِّد اتجاهها.

٣- وضعنا شحنة خامسة $(q_5 = 9\times10^{-6}\ C)$ عند النقطة (A)، أوجد مقدار القوة الكهربائية الساكنة (F_{15}) بينها وبين الشحنة (q_1) ، ثم حدِّد اتجاهها.



الشكل (١٨-١)

١-٨ مكثف يتكون من لوحين متوازيين مساحة كل منهما ($٢٠٢\ cm^٢$)، تفصلهما طبقة من الهواء سمكها ($٠.١\ cm$).

١- أوجد مقدار سعة المكثف الكهربائية.

٢- تم وصل هذا المكثف بمصدر قوته الدافعة الكهربائية ($٥٠٠\ V$). أوجد مقدار الشحنة الكهربائية على كل لوح.

٣- أوجد مقدار الطاقة الكهربائية المختزنة في المكثف، وشدة المجال الكهربائي بين لوحيه.

١- تم إدخال لوح من المايكا سمكه ($٠.١\ cm$) وسماحيته النسبية تساوي (٨). أوجد مقدار الشحنة الكهربائية الإضافية على المكثف. ثم أوجد مقدار الطاقة الكهربائية الكلية المختزنة فيه.

١-٩ مكثف مقدار سعته ($٣\ \mu F$) وذلك عندما يكون الهواء هو الوسط العازل بين لوحيه، أوجد مقدار سعة هذا المكثف عندما يكون الشمع هو الوسط العازل بين اللوحين، إذا السماحية النسبية للشمع تساوي ($٢,٨$).

١-١٠ مكثف مقدار سعته ($٦٠\ P F$) أوجد الطاقة الكهربائية المختزنة فيه وذلك:

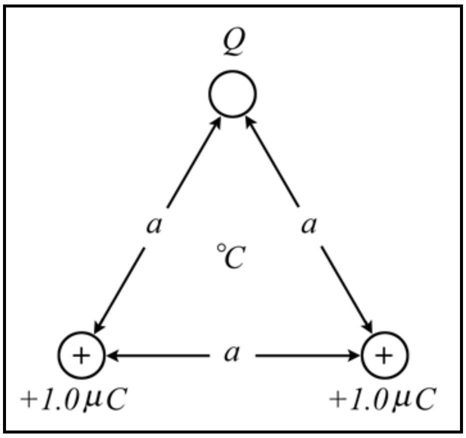
١- عندما يُشحن حتى يصل فرق الجهد بين لوحيه ($٢\ kV$).

٢- عندما تكون الشحنة التي يحملها كل لوح ($٣ \times ١٠^{\square ٨}\ C$).

مسائل اختيارية

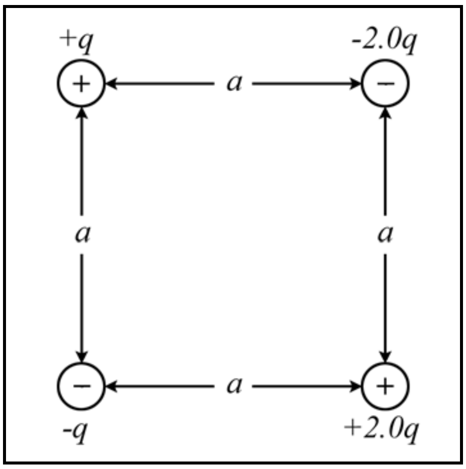
Optional Problems

١-١   في الشكل (١-١٩) وضعت الشحنات الثلاثة على رؤوس مثلث متساوي الأضلاع طول ضلعه (a)، حدد مقدار وإشارة الشحنة (Q) وذلك حتى يصبح مقدار المجال الكهربائي في مركز المثلث عند النقطة (C) مساوياً إلى الصفر.



الشكل (١-١٩)

١-٢   في الشكل (١-٢٠) لديك أربع شحنات كهربائية وضعت على رؤوس مربع طول ضلعه يساوي $(5\ cm)$، ومقدار الشحنة $(q = 1\times 10^{-8}\ C)$ أوجد مقدار واتجاه المجال الكهربائي في مركز الشكل المربع.



التيار الكهربائى والدائرة الكهربائية

الوحدة الثانية
التيار الكهربائي والدائرة الكهربائية
Current & The Electric Circuit

٢-١ المقدمة *Introduction*:

درسنا في الوحدة السادسة من هذا الكتاب أن المواد تُصنف من حيث سلوكها الكهربائي إلى ثلاثة أصناف، وهي: مواد موصلة ومواد عازلة، وأخرى شبه موصلة، إلا أنّ حركة الشحنات الكهربائية في المواد الموصلة هي حركة عشوائية ما لم تتأثر بقوة كهربائية ناشئة عن المجال الكهربائي الذي تخضع لتأثيره.

لقد أصبح مألوفاً لدينا أن التيار الكهربائي هو في حقيقة الأمر عبارة عن سيل من الشحنات المتحركة *a stream of moving changes*، ولكن هذه الشحنات المتحركة لا تُكوّن تياراً كهربائياً ما لم يكن لها محصلة محددة خلال السطح الذي تمر فيه، فعلى سبيل التطبيق تتحرك إلكترونات التوصيل في سلك معزول من النحاس حركة عشوائية في مختلف الاتجاهات بسرعة من رتبة ($١٠^{٦}$ *m/s*)، وبفرض أن هناك سطحاً نظرياً عبر السلك النحاسي تمر خلاله هذه الإلكترونات في الاتجاهين المتعاكسين وبعدد يصل إلى البلايين خلال الثانية الواحدة، نجد أنَّ محصلتها (التيار الكهربائي) تساوي الصفر، ولهذا السبب فإننا لا نستطيع القول: إن تياراً كهربائياً يمر عبر السلك النحاسي، ولكننا إذا ربطنا بطارية بين طرفي السلك تؤمن فرقاً في

الجهد مقداره *(V)* فإن مجالاً كهربائياً مقداره *(E)* سوف يحدد اتجاه حركة الإلكترونات، أي أننا نحصل على تيار كهربائي يمكن التأكد من وجوده باستخدام أميتر *ammeter* لقراءة مقداره المار عبر السلك النحاسي، باعتباره مقياساً للتيار الكهربائي، وسنوضح مفهوم التيار الكهربائي في الدائرة الكهربائية وعلاقته بالمقاومة وأبعادها الهندسية، ثمّ نقدم مفهوماً لكثافة التيار والمقاومة النوعية، كما سنناقش استخدام قانون أوم ونبيّن مدى صلاحيته في الدائرة الكهربائية، ثمَّ سنقدم مفهوماً مبسطاً للتيار الكهربائي خلال الثنائي البلوري كونه مصنوعاً من مادة شبه موصلة، وأخيراً سنوضح معنى انعدام المقاومة أمام التيار الكهربائي، أو ما نطلق عليه فرط التوصيل.

وبعد أن يكمل الطالب دراسة هذه الوحدة، ويستوعب المفاهيم والأفكار والمبادئ التي وردت خلالها، ويقوم بنفسه بحل أسئلة الامتحان الذاتي الموجودة في نهايتها، ويقارن حلوله مع الحلول النموذجية المرفقة في الملحق (د)، بعد ذلك كله نتوقع أن يكون الطالب قادراً على:

١- أن يشرح عملية توصيل المواد الناقلة للتيار الكهربائي.

٢- أن يضبط المفهوم الصحيح لشدة التيار الكهربائي.

٣- أن يميِّز المعنى المقصود بالمقاومة الكهربائية تمييزاً صحيحاً، ويوضِّح علاقتها بالمقاومة النوعية وعلاقة المقاومة النوعية لناقل بناقليته الكهربائية.

٤- أن يعدد مجموعة العوامل الفيزيائية التي تعتمد عليها مقاومة الناقل الكهربائي.

٥- أن يميِّز مفهوم القوة الدافعة الكهربائية وفرق الجهد الكهربائي.

٦- أن يفسِّر معادلة الدائرة الكهربائية ويتعلم كيفية استخدام قانوني كيرشوف فيها.

٧- أن يميِّز بشكل صحيح قوانين إيجاد المقاومة المكافئة في حالتي التوصيل على التوالي والتوازي، لمجموعة من المقاومات.

٨- أن يشرح حقيقة هبوط مقاومة بعض المواد إلى الصفر، من خلال معرفة ظاهرة فرط التوصيل واعتماد ذلك على درجة حرارة المادة.

٢-٢ شدة التيار الكهربائي *Electric Current*:

أصبح معروفاً لدينا أنَّ المواد الناقلة هي المواد التي تمتلك شحنات كهربائية حرة الحركة (الإلكترونات الحرة) وبوفرة عالية، وهي تتحرك حركة عشوائية *random motion* وتمتلك مقداراً متساوياً من الجهد الكهربائي، كما نلاحظ انعدام المجال الكهربائي في هذه الحالة، وبالتالي انعدام القوة الكهربائية المؤثرة عليها.

ولكننا إذا وصلنا مصدراً للجهد بين طرفي سلك ناقل، فإن الجهد الكهربائي سوف يختلف من نقطة لأخرى داخل السلك، كما يؤدي ذلك إلى نشوء مجال كهربائي يؤثر داخل السلك بقوة كهربائية تجعل الشحنات الموجبة تتحرك باتجاه المجال، والشحنات السالبة تتحرك بعكس اتجاه المجال. إنَّ هذه القوة سوف تجعل التيار الكهربائي المار في السلك مستقراً *established current* بعد فترة زمنية، منتقلاً بعد ذلك إلى حالة الاستقرار الدائم *steady state condition*، هذا بالنسبة للتيار المستمر *direct current*، أي أن التيار لا يتغير بالنسبة للزمن، أما إذا كان التيار يغير اتجاهه مع الزمن فإنه يسمى في هذه الحالة بالتيار المتناوب *alternating current*.

وخلاصة القول: إنّ التيار الكهربائي قد سرى في السلك الناقل عندما ربطنا مصدر الجهد الكهربائي بين طرفيه، وهذا هو شكل أولي مبسط للدائرة الكهربائية، ويمكننا الآن أن نعرِّف شدة التيار الكهربائي على النحو الآتي:

هو عبارة عن معدل مقدار الشحنة الكهربائية (Δq) الذي يعبر مقطعاً محدداً في الناقل خلال فترة زمنية (Δt). ونعبِّر عن ذلك بالعلاقة الرياضية الآتية[١]:

$$\boxed{I = \frac{\Delta q}{\Delta t}}$$

(تعريف التيار الكهربائي) (١□٢)

(١) تأخذ العلاقة الرياضية (١□٧) الشكل $I = (q/t)$، وذلك إذا كانت الشحنة الكلية معروفة، وكذلك الزمن اللازم لمرورها.

شدة التيار الكهربائي: هو مقدار الشحنة الكهربائية التي تعبرمقطعا معينا في وحدة الزمن.

ويقاس التيار في النظام العالمي *(SI)* بوحدة الأمبير، ونشير له بالحرف الإنكليزي *(A)*، وقد مر بنا تعريفه في الوحدة الأولى من هذا الكتاب.

أما إذا كان معدل انسياب الشحنات الكهربائية متغيراً بالنسبة للزمن، فإننا نسمي التيار حينئذ بالتيار اللحظي *instantaneous current* ونعبِّر عنه بالعلاقة الرياضية التفاضلية الآتية:

$$I = \frac{dq}{dt}$$
(٢□٢)

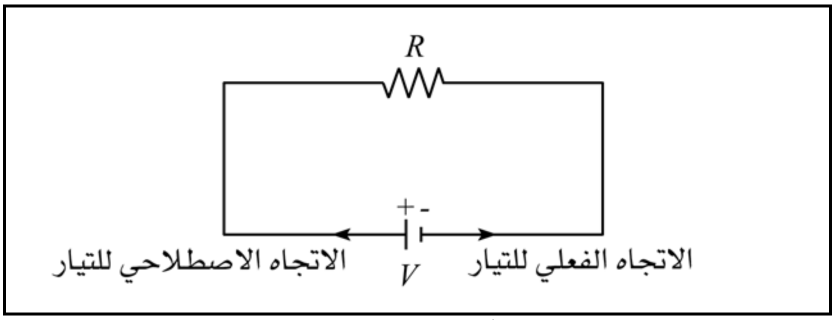
كما يمكننا أن نعبّر عن الشحنة الكهربائية *(q)* بصفة عامة بدلالة عدد الإلكترونات لوحدة الحجوم *(n)* وشحنة الإلكترون الواحد، وذلك بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$q = ne \;, \qquad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots,$$
(٢□٣)

وتعبِّر العلاقة الرياضية عن تكمم الشحنة *quantized*، أي أنها حاصل الضرب لعدد *(n)* -وقد يكون سالباً أو موجباً- بمقدار الشحنة الكهربائية *(e)*،والتي يُصطلح على تسميتها بالشحنة الأولية *elementary charge*.

ومن الجدير بالذكر أنّ التيار الكهربائي هو كمية عددية، إلا أننا نحتاج دائماً إلى تحديد اتجاهه في الدارات الكهربائية. إن حركة الشحنات الموجبة تكون دائماً كما أسلفنا في اتجاه المجال الكهربائي *(E)*، كما أن حركة الشحنات السالبة تكون دائماً في اتجاه معاكس للمجال الكهربائي، ولقد اتُفق اصطلاحياً على أن يكون اتجاه التيار الكهربائي في الدارات الكهربائية هو اتجاه حركة الشحنات الموجبة، ومعنى ذلك أنه يتجه اصطلاحياً من منطقة الجهد المرتفع إلى منطقة الجهد المنخفض.

ولكن لا بد لنا أن نؤكد دائماً أن اتجاه حركة الشحنات الكهربائية يكون بعكس الاتجاه الاصطلاحي. ذلك أنّ القطب الموجب للبطارية *positive terminal* يدفع حاملات التيار الموجبة بعيداً عنه وباتجاه قطب البطارية السالب *negative terminal* الذي يجذبها بدوره نحوه، وهذا هو الذي يجعل الشحنات تدور في الدارة الكهربائية بعكس الاتجاه الاصطلاحي، انظر الشكل (١-٢).



الشكل (١-٢) يوضح كلاً من الاتجاهين الاصطلاحي والفعلي للتيار

تطبيق (١-٢) *Example*

يمر تيار كهربائي مقداره $(6\times10^{-4}A)$ وذلك عندما يضغط مستخدم الحاسب الآلي على أحد أزرار لوحة المفاتيح، ويسري هذا التيار خلال زمن مقداره $(5\times10^{-3}s)$، أوجد حسابياً:

١- مقدار الشحنة الكهربائية التي نقلت هذا التيار.

٢- هل يمكنك حساب عدد الإلكترونات لوحدة الحجوم التي تحركت في هذه العملية البسيطة؟ وضِّح ذلك.

الحل *Solution*:

١- باستخدام العلاقة الرياضية (١□٢)، نجد أن:

$$I=\frac{\Delta q}{\Delta t}$$
$$\Delta q=I\Delta t$$
$$=(6\times10^{-4}A)(5\times10^{-3}s)$$
$$=30\times10^{-7}C=3\mu C$$

٢- نعم يمكننا ذلك، حيث تعبّر العلاقة الرياضية (٣□٢) عن إجابة السؤال.

$$q = ne$$

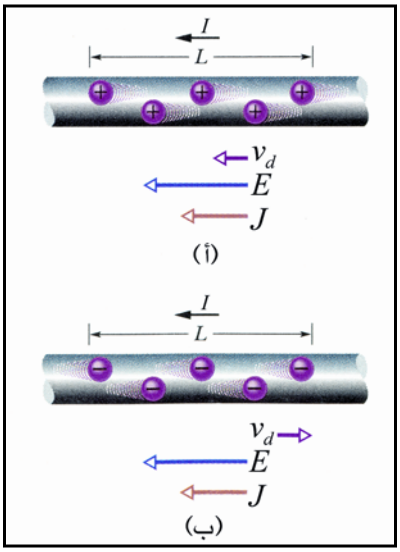
إنَّ (e) تمثل شحنة الإلكترون الواحد، و(n) عدد الإلكترونات، و(q) مقدار الشحنة الكهربائية التي أوجدناها حسابياً في الجزء الأول من هذا التطبيق:

$$30 \times 10^{-7} C = n(1.6 \times 10^{-19} C)$$

$$n = \frac{(30 \times 10^{-7} C)}{(1.6 \times 10^{-19} C)} = 1875 \times 10^{10} \, electron$$

٢-٣ كثافة التيار الكهربائي *Current Density*:

وبهدف توضيح المعنى المقصود بكثافة التيار الكهربائي، تأمل الشكل (٢-٢ أ، ب)



الشكل (٢-٢ أ، ب)

أ- يبين ناقلات موجبة للتيار الكهربائي تتجرف بسرعة (v_d) باتجاه المجال الكهربائي نفسه.

ب- يبين ناقلات سالبة للتيار الكهربائي تتجرف بسرعة (v_d) بعكس اتجاه المجال الكهربائي. ومن الملاحظ أن كثافة التيار (J) باتجاه المجال الكهربائي $(\vec{E})$.

في الشكل (٢-٢ أ)، وفي نقطة معينة من الناقل الموضّح، نلاحظ أن الشحنة الكهربائية الموجبة تسري باتجاه المجال الكهربائي $(\vec{E})$ نفسه، ولغرض التعبير

الصحيح عن هذا السريان نحتاج الآن إلى استخدام مفهوم كثافة التيار *current density* التي يرمز لها بالحرف الإنكليزي ($\vec{J}$) وهي كمية اتجاهية لها اتجاه المجال الكهربائي نفسه، ويبين الشكل (٢-٢ أ) أن التيار الكهربائي (*I*) يتوزع بشكل منتظم خلال المقطع العرضي للناقل ذي الشكل المنتظم، ويعبّر عن كثافة التيار في هذه الحالة بالعلاقة الرياضية الآتية:

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

(تعريف كثافة التيار) (٢-١)

أي أن كثافة التيار هي شدة التيار لكل وحدة مساحة، حيث (*A*) هي مساحة سطح المقطع العرضي للناقل. أما وحدة قياس كثافة التيار في النظام الدولي *(SI) unit* فهي (A/m^2). وفي الحالتين (٢- ٢ أ) و(٢- ٢ ب) يكون اتجاه كثافة التيار ($\vec{J}$) باتجاه المجال الكهربائي ($\vec{E}$)، بغض النظر عن إشارة الشحنة الكهربائية، ومن الممكن التعبير بشكل عام عن كثافة التيار خلال سطح ما -إذا كان عمودياً أم لا- بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$I = \int \vec{J} . d\vec{A}$$

(٢-٢)

حيث ($d\vec{A}$) هو متجه المساحة العمودي على عنصر المساحة التفاضلي (dA)، ونلاحظ أنَّ كلاً من ($\vec{J}$) و ($d\vec{A}$) مرتبطان بعلاقة الضرب القياسي، المبينّة في العلاقة الرياضية (٢-٢).

ومن الممكن عملياً أن نعبّر عن شدة التيار الكهربائي المار في الناقل بدلالة سرعة الانجراف للشحنات المتحركة. إنَّ المقصود بسرعة الانجراف *drift velocity* هو التدفق المباشر للإلكترونات الناقلة خلال ناقل منتظم، ويشار لها اختصاراً بالرمز ($\vec{v}_d$)، ومن المناسب ذكره هنا أن الإلكترونات الحرة لا تتحرك داخل الناقل في خطوط مستقيمة، ولكنها تتحرك حركة متعرجة نتيجة للتصادمات المتتالية بذرات

الناقل، ولكنها تبقى متحركة ببطء في اتجاه معاكس للمجال الكهربائي بسرعة متوسطة، وهي التي نطلق عليها اسم سرعة الانجراف.

ولو عدنا إلى الشكل (٢-٢ أ)، لرأينا أنَّ الشحنات الناقلة للتيار الكهربائي تسير نحو اليسار بسرعة انجراف $(\vec{v}_d)$، كما أنّ عدد الشحنات المارة خلال الطول (L) من الناقل هو (nAL)، حيث (n) هو عدد الشحنات لوحدة الحجوم (AL)، و(A) هي مساحة سطح المقطع للسلك، وهكذا نجد أن مقدار الشحنة المارة خلال الفترة الزمنية (Δt) هي (Δq):

$$\Delta q = (nAL)e$$
(٢□٦)

حيث إنَّ (e) هي شحنة الإلكترون المعروفة، وبما أن (Δq) تجتاز طولاً من السلك مقدار (L)، إذاً نجد أن الزمن اللازم لذلك هو:

$$\Delta t = L / \vec{v}_d$$
(٢□٧)

وبتعويض كلٍ من (٧□٢) و(٦□٢) في العلاقة الرياضية (١□٢) التي تعبّر عن شدة التيار، نجد أنَّ:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{(nAL)e}{(L / v_d)}$$
$$I = nAev_d$$

وبقسمة الطرفين على المقدار (A) نجد أنَّ:

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

وبملاحظة أنَّ الطرف الأيسر هو عبارة عن كثافة التيار $(\vec{J})$، نجد أنَّ:

$$\vec{J} = (ne)\vec{v}_d$$
(٢□٨)

حيث $(\vec{v}_d)$ هو متجه سرعة الانجراف.

والمعادلة (٨□٢) تشير إلى أن كلاً من ($\vec{J}$) و($\vec{v}_d$) لهما الاتجاه نفسه. أما المقدار ($n\ e$) فهو عبارة عن كثافة الشحنات الناقلة وتقاس بوحدة (C/m^3) كولوم لكل متر مكعب.

تطبيق (٢-٢) *Example*

تم لحم نهاية سلك من الألومنيوم قطره (٢.٢ mm) مع نهاية سلك آخر من النحاس قطره (١،٨ mm)، إذا كان مقدار التيار المستقر المار خلال هذه المجموعة يساوي (١،٣ A). أوجد كثافة التيار في كل من السلكين؟

الحل *Solution*:

١- الألومنيوم:

$$J_{Al} = \frac{I}{A_{Al}}$$

$$A_{Al} = \pi r_1^2$$

$$= \pi\left(1.25\times 10^{-3}\, m\right)^2$$

$$= 4.61\times 10^{-6}\, m^2$$

$$J_{Al} = \frac{1.3\ A}{4.61\times 10^{-6}\, m^2} = 2.6\times 10^5 (\, A/m^2\,)$$

٢- النحاس:

$$J_{Cu} = \frac{I}{A_{Cu}}$$

$$A_{Cu} = \pi r_2^2$$

$$= \pi\left(0.9\times 10^{-3} m\right)^2$$

$$= 2.54\times 10^{-6} m^2$$

$$J_{Cu} = \frac{1.3A}{2.54\times 10^{-6} m^2} = 5.1\times 10^5 (\, A/m^2\,)$$

وهذا تطبيق فقط لتوضيح حقيقة اعتماد كثافة التيار على مساحة المقطع (A)، إلا أن حقيقة اختلاف المادتين لم تؤخذ بعين الاعتبار.

تطبيق (٢-٣) *Example*

شريحة من السيليكون عرضها $(W = 3.2\,mm)$ وسماكتها $(x = 250\,\mu m)$ يمر خلالها تيار $(I = 5.2\,mA)$، وكما هو معلوم فإن السيليكون إذا طعم بشوائب من الفوسفور فإننا نحصل على بلورة من النوع السالب *n-type semiconductor*، وقد أدت عملية التطعيم إلى زيادة كبيرة في الشحنات السالبة عند مقارنتها ببلورة السيليكون النقية، حيث كانت $(n = 1.5\times 10^{23}\,m^{-3})$.

١- أوجد حسابياً كثافة التيار الكهربائي $(\vec{J})$.

٢- أوجد حسابياً سرعة الانجراف $(\vec{v}_d)$.

الحل *Solution*:

١-

$$\vec{J} = \frac{I}{Wx}$$

حيث إنَّ المساحة: $A = Wx$

$$\vec{J} = \frac{5.2\times 10^{-3}\,A}{(3.2\times 10^{-3}\,m)(250\times 10^{-6}\,m)} = 6500\,A/m^2$$

٢-

$$\begin{aligned} v_d &= \frac{J}{ne} \\ &= \frac{6500\,A/m^2}{(1.5\times 10^{23}\,m^{-3})(1.60\times 10^{-19}\,C)} \\ &= 0.27\,m/s = 27\,cm/s \end{aligned}$$

٤-٢ المقاومة والمقاومة النوعية *Resistance and Resistivity*:

افرض أن لديك قضيبين أحدهما من النحاس والآخر من الزجاج، لهما الأبعاد الهندسية نفسها، وقمنا بربط نهايتي كل من القضيبين بفرق جهد مقداره *(V)* ثم استخدمنا مقياس التيار *ammeter* لغرض الكشف عن التيار المار في كل منهما، سنجد عملياً أن الفرق كبير جداً بين قيمتي التيارين، وفي الحقيقة نستطيع القول بأن

قضيب الزجاج لم يمرر التيار الكهربائي إطلاقاً، بينما يمر التيار في السلك النحاسي. إن خاصية الناقل (النحاس) في هذا التطبيق هي المقاومة *resistance* حيث يمكن تحديدها بمعرفة كل من فرق الجهد (V) بين طرفيه والتيار الكهربائي المار خلاله (I)، وهكذا نجد أن تعريف المقاومة هو:

(تعريف المقاومة)

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

(٢-٩)

المقاومة :هي عبارة عن النسبة بين فرق الجهد بين طرفي عنصر كهربائي وشدة التيار الكهربائي المار فيه.

إن وحدة قياس المقاومة في النظام الدولي (SI) هي *volt/amper* ويطلق عليها اسم *ohm* نسبة إلى العالم جورج سيمون أوم (١٨٧٠) *Georg Simon Ohm* ورمزه الحرف اللاتيني (Ω) وتُقرأ باللغة العربية أوميغا.

$$١\ ohm = ١\Omega = ١\ volt/amper$$

الأوم:هو مقدار المقاومة التي يكون التيار الكهربائي المار فيهاأمبيرا واحدا ،اذا تم تسليط فرق جهد بين طرفيها مقداره فولتا واحدا.

إن الناقل الذي يُوظف في الدائرة الكهربائية أو الإلكترونية للقيام بمهمة مقاومة محددة يسمى مقاوم *resistor* ويرمز له بالرمز ، الذي يشبه أسنان المنشار.

ومن المفيد عملياً، ليس التركيز على فرق الجهد فحسب، ولكن التركيز على معرفة شدة المجال الكهربائي $(\vec{E})$ الناشئ في نقطة معينة من المقاوم بسبب فرق الجهد، كما أننا نركز على كثافة التيار الكهربائي $(\vec{J})$ بدلاً من التيار الكهربائي (I) في النقطة نفسها، وهكذا نجد أننا نبحث في العلاقة بين كثافة التيار والمجال الكهربائي بدلاً من العلاقة بين التيار وفرق الجهد.

إنَّ كلاً من شدة المجال الكهربائي وكثافة التيار الكهربائي لهما الاتجاه نفسه، كما أنَّ كثافة التيار تتناسب مع شدة المجال، وثابت التناسب هو ما نطلق عليه الناقلية *conductivity*، ويشار إليه بالرمز اليوناني (σ) وتقرأ بالعربية (سيجما). أما المقاومة النوعية فهي مقلوب الناقلية واختصاراً يشار إليها بالحرف اليوناني (ρ) وتقرأ (رو)، وهكذا نجد أنَّ:

$$\vec{J} \propto \vec{E}$$

(تعريف الناقلية)

$$\boxed{\vec{J} = \sigma \vec{E}}$$

(١٠□٢)

وهكذا نجد أن المقاومة النوعية تساوي:

(تعريف المقاومة النوعية)

$$\boxed{\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}}}$$

(١١□٢)

إن وحدة قياس المقاومة النوعية في النظام العالمي (*SI*) هي (*Ω.m*) ذلك أن وحدة قياس ($\vec{E}$) هي (*V/m*) أما ($\vec{J}$) فوحدة قياسها ($A/m^٢$).

ومما تقدم نجد أنّ:

$$\rho = \frac{(V/m)}{(A/m^2)} = \frac{(\Omega.A)}{(A/m)} = \Omega.m$$

وتُقرأ (أوم ميتر). ومن المفيد إعادة صياغة المعادلة (١١□٢) على النحو الآتي المبين في العلاقة (١٢□٢) ذلك أننا نناقش مفهوم المجال الكهربائي.

$$\vec{E} = \rho \vec{J}$$

(١٢□٢)

ونذكّر هنا أن المعادلتين (١١□٢) و(١٢□٢) تُستخدمان فقط مع المواد ذات الخصائص الكهربائية غير المتغيرة في مختلف الاتجاهات. كما أنه من المناسب التذكير هنا مرة أخرى بأن الناقلية *conductivity* هي عكس المقاومة النوعية والتي يعبّر عنها رياضياً على النحو الآتي:

(العلاقة بين الناقلية والمقاومة النوعية) $\sigma = ١/\rho$
(١٣□٢)

وتُقرأ باليونانية (سيجما) أما وحدة قياسها فهي $(\Omega.m)^{□١}$.

والجدول (١-٢) يبين مجموعة من قيم المقاومة النوعية لمجموعة من المواد.

Material المادة		Resistivity $\rho(\Omega.m)$ المقاومة النوعية	Temperature coefficient of resistivity $(k^{□١})$ معامل التوصيل الحراري
typical metals فلزات نموذجية			
silver	فضة	$١,٦٢ \times ١٠^{□٨}$	$٤,١ \times ١٠^{□٣}$
copper	نحاس	$١,٦٩ \times ١٠^{□٨}$	$٤,٣ \times ١٠^{□٣}$
aluminum	ألومنيوم	$٢,٧٢ \times ١٠^{□٨}$	$٤,٤ \times ١٠^{□٣}$
tungsten	تنغستين	$٢.٢٢ \times ١٠^{□٨}$	$٤.٢ \times ١٠^{□٣}$

الجدول (١-٢) يبين (المقاومة النوعية) لمجموعة من المواد ، عند درجة الحرارة (٢٠ ℃)

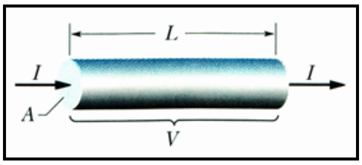
Material المادة		Resistivity $\rho(\Omega.m)$ المقاومة النوعية	Temperature coefficient of resistivity $(k^{□١})$ معامل التوصيل الحراري
iron	حديد	$٩,٦٨ \times ١٠^{-٨}$	$٦.٢ \times ١٠^{□٣}$
platinum	بلاتين	$١٠,٦ \times ١٠^{□٨}$	$٣,٩ \times ١٠^{□٣}$

Material المادة		*Resistivity* $\rho(\Omega.m)$ المقاومة النوعية	*Temperature coefficient of resistivity* $(k^{□١})$ معامل التوصيل الحراري
manganin	منغنيز	$١٨,٢ \times ١٠^{□٨}$	$٠,٠٠٢ \times ١٠^{□٣}$
أشباه موصلات نموذجية			
silicon. pure	سليكون نقي	$٢,٢ \times ١٠^{□٣}$	$□٧٠ \times ١٠^{□٣}$
silicon. n-type		$٨,٧ \times ١٠^{□٤}$	-
silicon. p-type		$٢,٨ \times ١٠^{□٣}$	-
typical insulator			-
glass	زجاج	$١٠^{١٠} - ١٠^{١٤}$	-
fused quartz	كوارتز	$\sim ١٠^{١٦}$	-

تابع الجدول (**٢-١**) يبين (المقاومة النوعية) لمجموعة من المواد، عند درجة الحرارة (*٢٠□C*)

والسؤال الآن هو: كيف يمكننا حساب المقاومة، بعد أن تعرفنا على كل من كثافة التيار وشدة المجال الكهربائي في نقطة معينة؟

للإجابة عن هذا السؤال انظر الشكل (٣-٢).



الشكل (**٣-٢**) الجهد (*V*)، والطول (*L*)، والمقطع (*A*)، والتيار مقداره (*I*)

إن طول السلك الناقل في الشكل (٣-٢) هو (*L*) أما مساحة مقطعه فهي (*A*)، حيث تمَّ تسليط فرق جهد مقداره (*V*) بين طرفيه، أدى إلى مرور تيار مستقر مقداره (*I*). إنَّ خطوط كثافة التيار المار تكون منتظمة، لذا فإن مقدار كل من $(\vec{E})$ و $(\vec{J})$ سوف يكون ثابتاً في جميع النقاط داخل الناقل، ولهذا نجد أنَّ:

(تعريف شدة المجال الكهربائي) $E = \frac{V}{L}$

وأما كثافة التيار الكهربائي فتساوي:

(تعريف كثافة التيار) $J = \frac{I}{A}$

وبتعويض قيمة كلٌ من (E) و(J) في المعادلة (١١□٢) نجد أن:

$$\rho = \frac{E}{J} = \frac{V/L}{I/A}$$

ولكن نلاحظ أنَّ المقدار (V/I) هو عبارة عن المقاومة (R) وهكذا نجد أنَّ العلاقة الرياضية بين المقاومة والمقاومة النوعية لناقل طوله (L) ومساحة مقطعه (A) هي:

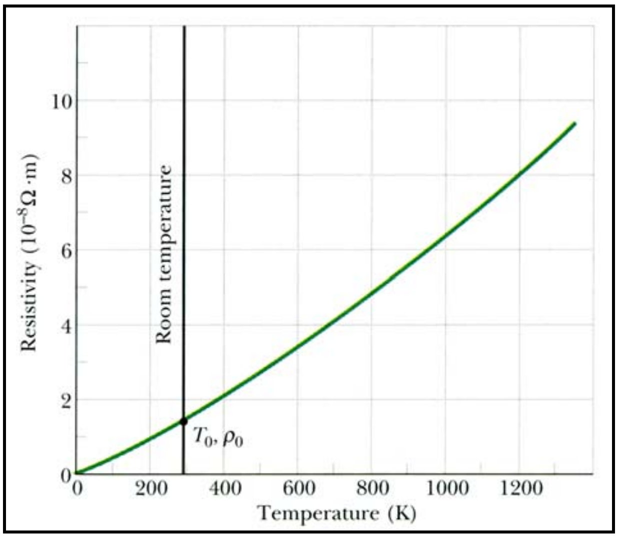
(تعريف المقاومة النوعية) $R = \rho\frac{L}{A} \Rightarrow \boxed{\rho = R\frac{A}{L}}$ (٢-١٤)

المقاومة النوعية:هي مقدار مقاومة جزء من المادة طوله متر واحد(وحدة الطول) ومساحة مقطعه متر مربع واحد(وحدة المساحة).

والتي يمكن استخدامها مع ناقل متجانس له مقطع منتظم بين طرفيه فرق جهد معلوم.

والسؤال الآخر الآن هو: هل تتغير قيمة المقاومة مع تغيُّر درجات الحرارة، شأنها شأن الخصائص الفيزيائية الأخرى للمادة؟

للإجابة عن هذا السؤال، انظر الشكل (٤-٢).



الشكل (٤-٢) يبين المقاومة النوعية للنحاس كتابع لدرجة الحرارة
بينما تظهر نقطة التقاطع عند درجة حرارة الغرفة
كنقطة مرجعية للمقاومة النوعية للنحاس والبالغة (ρ_o = ١.٦٩ × ١٠^□٨ Ωm)

إن العلاقة الرياضية التي تصف هذا التغير هي:

$$\rho - \rho_o = \rho_o \alpha (T - T_o)$$
(٢□١٢)

حيث إنَّ كلاً من (T_o) و (ρ_o) هما قيمتا درجة الحرارة والمقاومة النوعية عند درجة حرارة الغرفة والتي تساوي:

$T_o = 20°C$ (على مقياس سليزيوس)

$T_o = 293\,K°$ (على مقياس كلفن)

$\rho_o = 1.69\ \mu\Omega.cm$ للنحاس

أما (α) فهو معامل التوصيل الحراري، ويُقرأ (إلفا)، انظر الجدول (١-٢)، كما أن الشكل (٤-٢) -الذي يوضح العلاقة البيانية بين كل من المقاومة النوعية (ρ) ودرجة الحرارة (T) مقاسة بالكلفن وذلك لمعدن النحاس- يعطينا القيمة العددية

للمقاومة النوعية (ρ_o) عند درجة حرارة الغرفة من خلال النقطة ذات الإحداثيات $(T_o.\rho_o)$.

أما المقاومة فيمكننا تحديدها من العلاقة الرياضية:

(علاقة المقاومة بدرجة الحرارة) $\boxed{R - R_o = R_o\,\alpha(T - T_o)}$

(٢-١٦)

تطبيق (٢-٤) Example

سلك مصنوع من النحاس نصف قطره $(0.9\ mm)$، يسري خلاله تيار ثابت قدره $(1.3\ A)$، ما هي شدة المجال الكهربائي داخل الناقل النحاسي؟

الحل Solution:

$$\vec{E} = \rho\,\vec{J}$$

ولكن

$$J = \frac{I}{A}$$
$$A = \pi r^2$$
$$= \pi\left(0.9\times 10^{-3}\,m\right)^2$$
$$= 2.54\times 10^{-6}\,m^2$$
$$J = \frac{1.3A}{2.54\times 10^{-6}\,m^2} = 5.1\times 10^{5}\,A/m^2$$

أما (ρ) المقاومة النوعية للنحاس فكما هو واضح من الجدول (٢-١) تساوي: $1.69\times 10^{-8}\,\Omega.m$ ، إذاً:

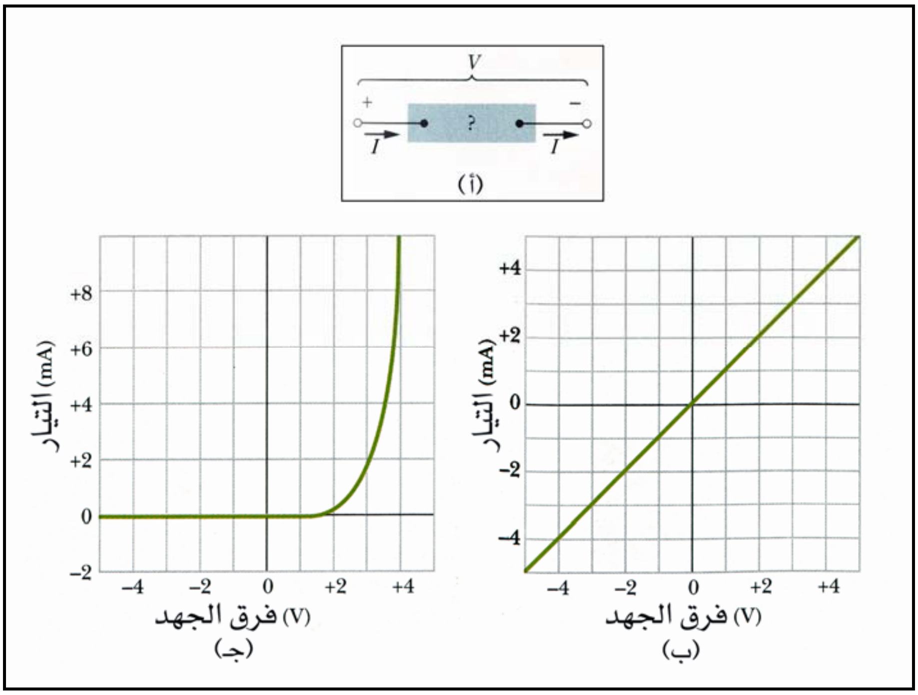
$$E = (1.69\times 10^{-8}\,\Omega.m)(5.1\times 10^{5}\,A/m^2)$$
$$E = 8.6\times 10^{-3}\,V/m$$

ملاحظة: تحقق بنفسك من صحة وحدة قياس المجال الكهربائي $(\vec{E})$ الواردة في الحل أعلاه.

٢-٥ قانون أوم Ohm's Law:

من المفيد هنا ونحن ندرس قانون أوم أن نذكّر أن المقاوِم *resistor* هو عبارة عن

ناقل *conductor* يمتاز بامتلاكه لمقاومة معلومة، وهذا يعني أن مقدار هذه المقاومة يبقى ثابتاً فيما لو تغير مقدار أو قطبية فرق الجهد *potential magnitude and polarity*، وهذا التأكيد للتنبيه إلى أن هناك بعض الأجهزة تتغير مقاومتها بتغير فرق الجهد. ولمناقشة وتوضيح هاتين الحالتين، تأمل الشكل (٢-٢ أ، ب، جـ) ثم لاحظ الجوانب الأساسية الآتية:



الشكل (**٢-٢** أ، ب، جـ)

أ- فرق الجهد *(V)* يؤمن تياراً ثابتاً مقداره *(I)*.

ب- خط بياني يوضح كيف يتغير التيار *(I)* مع فرق الجهد *(V)* عندما يكون الجهاز عبارة عن مقاومة (Ω ١٠٠٠).

جـ- خط بياني يوضح كيف يتغير التيار *(I)* مع فرق الجهد *(V)* عندما يكون الجهاز عبارة عن ثنائي بلوري *(p.n)*.

نلاحظ في الشكل (٢-٢ أ) وجود فرق في الجهد *(V)* بين طرفي الجهاز الذي نريد اختباره، مع تأكيدنا على أماكن الأقطاب (الموجب والسالب) وكذلك التأكد من مرورالتيار الكهربائي *(I)* وذلك بقياس مقداره في حالة تغيير القطبية وكذلك مقدار فرق الجهد *(V)*.

ونلاحظ الآن في الشكل (٢-٢ ب) خطاً بيانياً يوضح كيفية تغيُّر التيار مع تغيُّر فرق الجهد، والشكل البياني هو عبارة عن خط مستقيم يمر عبر نقطة الأصل

ميله هو المقدار[1] (I/V) وهذا ما يشير إلى أن مقاومة الجهاز ثابتة ولا تعتمد على مقدار وقطبية فرق الجهد، أي أنَّ $(R = V/I)$، وهذا ما يؤكد أن المقاومة خطية، ومقلوب الميل للخط المستقيم هو عبارة عن مقدارها العددي.

أما الشكل (٢-٢ جـ) فهو يوضح الخط البياني لتغيُر التيار مع فرق الجهد لجهاز آخر مختلف عن الجهاز الأول، ومن الواضح أن التيار يمر عبر هذا الجهاز فقط عندما تكون قطبية الجهد موجبة ومقدار فرق الجهد أكبر من المقدار $(1.50\ volt)$، كما يوضح أن العلاقة بين الجهد والتيار ليست خطية، وتعتمد قيمة التيار على مقدار الجهد المُطبق على الجهاز. إذاً، ضمن هاتين النظرتين المتميزتين نستطيع أن نعرف قانون أوم وفقاً لما ورد في العلاقة الرياضية (٩□٢)، والأوم هو عبارة عن مقاومة ناقل، فرق الجهد بين طرفيه فولت واحد $(volt)$ ويبلغ مقدار التيار المار خلاله أمبير واحد $(amper)$ وبشكل عام فإن مقاومة الناقل هي النسبة بين فرق الجهد بين طرفيه والتيار المار خلاله.

إنَّ الشكل (٢-٢ ب) يوضح جهازاً يعتمد في عمله على قانون أوم وهو عبارة عن مقاومة، أما الشكل (٢- ٢ جـ)، فيوضح جهازاً آخراً لا يعتمد في عمله على قانون أوم وهذا ما يحدث لوصلة $(p-n)$ أي وصلة بلورتين من أشباه الموصلات سالبة وموجبة.

ومن النتائج المفيدة لما قدمناه من مفاهيم حول كثافة التيار الكهربائي وشدة المجال الكهربائي والمقاومة النوعية، إمكانية التعبير عن قانون أوم بطريقة أكثر شمولية، ولاسيما عند التركيز على المواد الناقلة وليس الأجهزة الناقلة، وذلك باعتماد المحاكاة للمقارنة بين كلٍ من:

$$\rho = \frac{E}{J}$$

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

حيث إن المقاومة (R) لناقل طوله (L) ومساحة مقطعه (A) ومقاومته النوعية (ρ) هي $(R = \rho(L/A))$، ومنها نجد أن المقاومة النوعية هي $(\rho = RA/L)$، كما

(١) نلاحظ أن المقدار (I/V) يمثل مقلوب المقاومة.

نجد أن المجال الكهربائي $(\vec{E})$ للناقل هو عبارة عن (V/L) انظر الشكل (٣-٢)، وهذا ما يؤدي إلى:

$$E = \frac{V}{L} = \rho J = \frac{RA}{L}\frac{I}{A}$$
$$\frac{V}{L} = \frac{RI}{L}$$
$$V = RI$$

وهذا يؤكد مجدداً على أنَّ العلاقة الخطية بين التيار وفرق الجهد (V,I)، هي تعبيرٌ عن مضمون قانون أوم، ونشير هنا إلى أن المقاومة يمكن قياسها عملياً بجهاز يسمى *(ohm-meter)*، وهو كثير الاستخدام في معامل الفيزياء وغيرها.

ونظراً لأهمية هذا القانون -قانون أوم- وكثرة الاستخدامات التطبيقية له، نذّكر بالاستنتاجات الأساسية لهذه الفقرة وهي:

١- إنَّ قانون أوم بصيغته المعروفة، هو تأكيد على أنَّ التيار الكهربائي الذي يمكنه أن يمر خلال وسيلة معينة (المقاومة)، يتناسب تناسباً مباشراً مع فرق الجهد بين طرفي هذه الوسيلة (المقاومة).

٢- إنَّ قانون أوم يمكننا تطبيقه على ناقل ما، إذا كانت العلاقة (٩□٢) تُعبِّر عــــــــــــــــــــــــــن مقاومتــــــــــــــــــــــــــه $(R = V/I)$، حيث أن (R) لا تعتمد على مقدار فرق الجهد بين طرفي الناقل (V).

٣- إنَّ قانون أوم يمكننا تطبيقه على ناقل ما، إذا كانت العلاقة (١١□٢) تُعبِّر عن مقاومته النوعية $(\rho = E/J)$، حيث إنَّ (ρ) لا تعتمد على مقدار واتجاه المجال الكهربائي (E).

تطبيق (٢-٢) *Example*

قضيب نحاسي طوله $(2\ m)$ وقطره $(8\ mm)$، ومقاومته النوعية تساوي $(1.756 \times 10^{-8}\ \Omega.m)$. أوجد مقاومة القضيب؟

الحل *Solution*:

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

ولكن (A) هي مساحة المقطع العرضي للقضيب، وهي بطبيعة الحال عبارة عن دائرة، إذاً:

$$A = \pi r^2$$

حيث $r =$ ٤ mm وهي عبارة عن نصف القطر.

$$\therefore \quad A = \pi (4 \times 10^{-3} m)^2 = 5.03 \times 10^{-5} m^2$$

$$R = 1.756 \times 10^{-8} \Omega.m \frac{2m}{5.03 \times 10^{-5} m^2}$$

$$R = 7.02 \Omega$$

تطبيق (٢-٦) *Example*

ملف نحاسي معزول تبلغ مقاومته $(3.35\,\Omega)$ عند درجة الحرارة $(20°C)$، أوجد مقاومته عند درجة الحرارة $(50°C)$، إذا كانت قيمة معامل المقاومة الحراري: $(\alpha = 4.26 \times 10^{-4} K^{-1})$.

الحل *Solution*:

$$R_t = R_o (1 + \alpha \Delta t)$$

حيث:

$$R_t = R_{50°C}$$

درجة حرارة الغرفة $\quad R_o = R_{20°C} = 3.35\,\Omega$

$$\Delta t = (50 - 20)°C = (323 - 293) = 30\,K$$

$$\alpha = 4.26 \times 10^{-4} K^{-1}$$

$$R_{50°C} = 3.35\,\Omega (1 + 4.26 \times 10^{-4} K^{-1} \times 30\,K)$$

$$= 3.392\,\Omega$$

بقي لنا ونحن نتداول قانون أوم وبحالاته المختلفة، أن نشير إلى مسألتين مهمتين ذاتَي صلة مباشرة بهذا القانون وهما:

١- إن القدرة (P) أو ما يسمى انتقال الطاقة بالنسبة للزمن في جهاز كهربائي عبر فرق جهد (V) يعبّر عنها رياضياً بالعلاقة:

(تعريـف القـدرة) $\boxed{P = IV}$
(١٧□٢)

حيـث (P) هـي القـدرة *power*، و (I) التيـار المـار خـلال دائـرة الجهـاز الكهربائي، أما (V) فهو فرق الجهد *potential defference* الذي يعمل عليه الجهاز.

٢- القدرة الكهربائية المهدورة وهي عموماً تصاحب عمل المقاوم، وهو في هذه الحالة يقوم مقام الجهاز الكهربائي، ويعبّر عنها رياضياً بالعلاقة:

$$P = IR = \frac{V^2}{R}$$

وتقاس القدرة بوحدة الواط $(watt)$، وهو عبارة عن قدرة قوة، أو آلة تنجز شغلاً يساوي جولاً واحداً خلال زمن مقداره ثانية واحدة، أي أن:

(تعريف الواط) $1W = (1J/1s)$

حيث (P) في هذه الحالة هي القدرة المهدورة أو المفقودة خلال المقاومة *resistive dissipation (R)* وهو ما يسمى بقانون جول للتسخين، ذلك أن الطاقة الكهربائية الكامنة تنتقل إلى شبكات الأيونات *ions lattice* بوساطة الشحنات المنساقة وتظهر كطاقة طردية داخلية، تحدد علاقتها بالزمن مقدار القدرة المستهلكة.

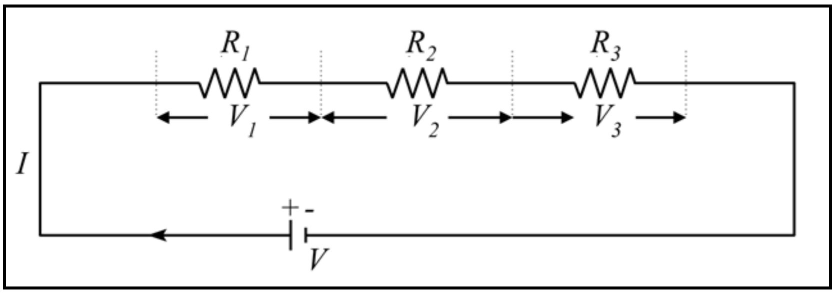
٢-٦ وصل المقاومات على التوالي والتوازي *Resistors in Series and in Parallel*:

غالباً ما نجد في الدوائر الكهربائية مجموعة من المقاومات، يتم وصل بعضها ببعض إما على التوالي وذلك لتجزئة الجهد وإما على التوازي وذلك للحفاظ عاى الجهد، وأحياناً على الشكلين معاً.

إذا قمنا بوصل مجموعة من المقاومات على التوالي *in senries* في دائرة كهربائية فإن التيار الكهربائي لا بد أن يمر في جميع تلك المقاومات، وتكون شدته ثابتة، ويمكننا التأكد من ذلك باستخدام جهاز قياس التيار المعروف، وهو الأميتير *ammeter*، إذ بواسطته سنتأكد أن مقدار التيار يكون في هذه الحالة ثابتاً، أي أن:

$$I = constant$$

تأمل الشكل (٦-٢)، ولاحظ ما يأتي:



الشكل **(٦-٢)** يبين ثلاث مقاومات موصولة على التوالي ***in series***، مع فرق للجهد مقداره *(V)*

ثلاث مقاومات (R_1, R_2, R_3) موصولة على التوالي يمر خلالها التيار (I)، بينما ينقسم الجهد الكهربائي إلى ثلاثة أجزاء (V_1, V_2, V_3)، أي أنَّ:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

وبتقسيم طرفي هذه المعادلة على التيار (I) نجد أنَّ:

$$\frac{V}{I} = \frac{V_1}{I} + \frac{V_2}{I} + \frac{V_3}{I}$$

أي أنَّ:

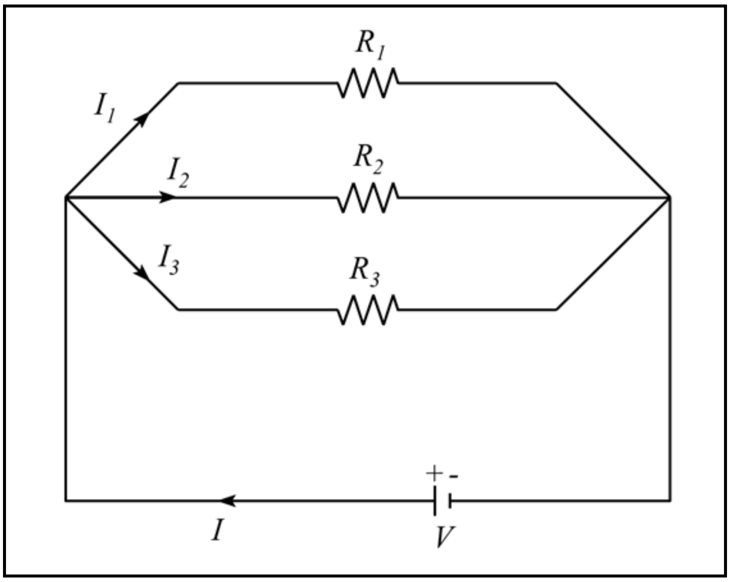
(المقاومة المكافئة على التوالي)

$$\boxed{R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3}$$

(١٨□٢)

ومعنى ذلك: أن المقاومة الكلية المكافئة لمجموع المقاومات الموصولة على التوالي تساوي مجموع هذه المقاومات.

وفي حالة وصل مجموعة من المقاومات على التوازي *in parallel* في دائرة كهربائية فإن التيار الكهربائي *(I)* سوف يجد أمامه مسارات مساوية لعدد مجموعة المقاومات، انظر الشكل (٧-٢).



الشكل (**٧-٢**) يبين مقاومات موصولة على التوازي ***in parallel*** مع فرق للجهد مقداره *(V)*

وفي حالة مماثلة لحالة توصيل المقاومات على التوالي، إلا أننا في هذه المرة سوف نقوم بقياس فرق الجهد عبر كلٍ من المقاومات الثلاثة لنتأكد أنها متساوية وفي الوقت نفسه مساوية لفرق الجهد الأصلي الذي يغذي الدائرة، أي أنَّ:

$$V = V_1 = V_2 = V_3$$

إلا أن التيار الكلي *(I)* هو عبارة عن مجموع التيارات الثلاثة: I_1, I_2, I_3

أي أنَّ:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

(قانون كيرشوف الأول)

وبقسمة طرفي هذه المعادلة على المقدار الثابت للجهد *(V)* نجد أنَّ:

$$\frac{I}{V} = \frac{I_1}{V} + \frac{I_2}{V} + \frac{I_3}{V} \square$$

□

(المقاومة المكافئة على التوازي)

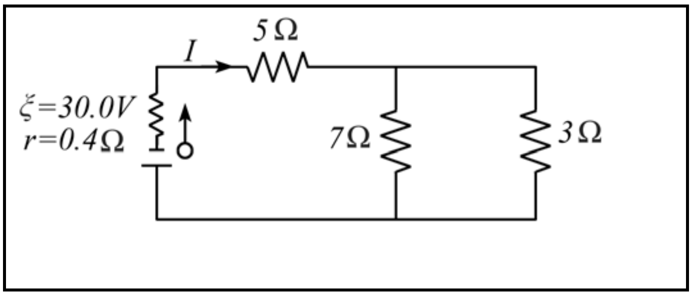
$$\boxed{\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

(١٩□٢)

ومعنـى ذلـك: أن مقلـوب المقاومـة الكليـة المكافئـة لمجمـوع المقاومـات الموصولة على التوازي يساوي مجموع مقلوب المقاومات المنفصلة الموصولة على التوازي، أي أننا نحتاج إلى حساب مقلوب كل مقاومة على حدة، ثم نجمع هذه الكميات، ونلاحظ أن هذا المجموع يساوي مقلوب المقاومة المكافئة.

تطبيق (٢-٧) *Example*

لديك الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل (٢-٨).



الشكل (٢-٨)، التطبيق (٢-٧)

أوجد شدة التيار الكهربائي المار في الدائرة؟

الحل *Solution*:

هذا التطبيق تطبيق مباشر لإيجاد المقاومة المكافئة لحالتي توصيل المقاومات مع بعضها، كما هو تطبيق على قانون أوم، ونلاحظ كذلك وجود المقاومة الداخلية *(r)* للبطارية، وهذا تذكير بمعادلة الدائرة الكهربائية والآن، بملاحظة المقاومتين ٣ *(Ω)* و٧ *(Ω)* نجد أنهما موصلتان على التوازي، إذن:

$$\frac{1}{R_{eq}}=\frac{1}{3}+\frac{1}{7}=\frac{10}{21}$$

يعطي المقاومة المكافئة لهما.

$$R_{eq}=\frac{21}{10}=2.1\,\Omega$$

هذه المقاومة موصولة مع المقاومة الأخرى *(Ω ٢)* على التوالي، وبملاحظة المقاومة الداخلية للبطارية نجد أن المقاومة الكلية في الدائرة هي:

$$R_{tot} = 2.1\,\Omega + 5\,\Omega + 0.4\,\Omega$$
$$= 7.5\,\Omega$$

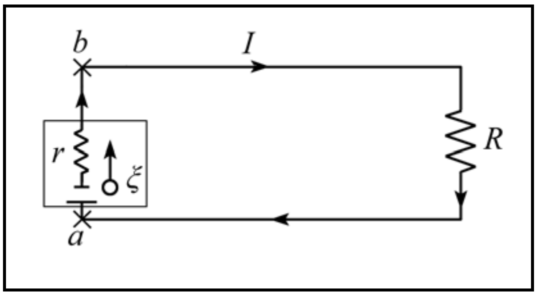
إذن التيار وفقاً لقانون الدائرة الكهربائية يساوي:

$$I = \frac{\xi}{R_{tot}} = \frac{30V}{7.5\Omega} = 4A$$

٢-٧ معادلة الدائرة الكهربائية *Electric Circuit Equation*:

ما هو المقصود بمعادلة الدائرة الكهربائية؟

لكي نجيب على هذا التساؤل، دعنا نتأمل الشكل (٢-٩)، الذي يمثل دائرة كهربائية بسيطة.



الشكل (٢-٩)

عند سريان التيار الكهربائي نجد أن الجهد يخضع لتغيُّرين اثنين في هذه الدائرة البسيطة.

١- التغيُّر في الجهد بسبب المقاومة الداخلية للمصدر (r).

$$V_r = Ir$$

٢- التغيُّر في الجهد عبر المقاومة الخارجية *external resistor*، والتي نطلق عليها مقاومة الحمل.

$$V_R = IR$$

وكما نلاحظ فإنَّ القوة الدافعة الكهربائية في هذه الدائرة هي $\xi(Emf)$، وبتطبيق قانون الدائرة حول النقطة (a) نجد أنَّ:

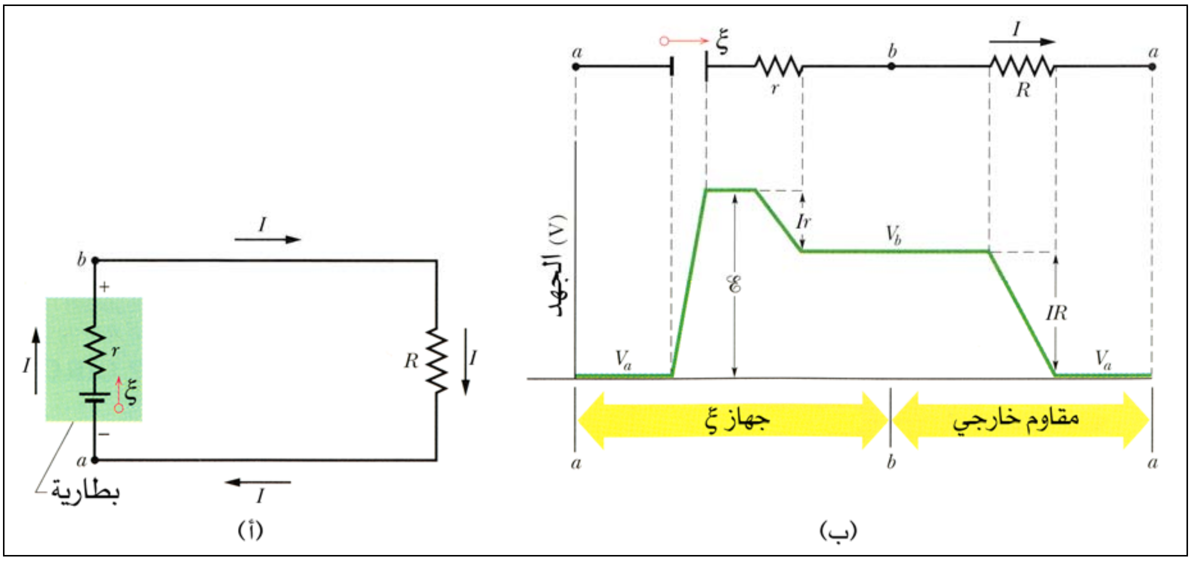
(قانون كيرشوف الثاني)
$$\xi - Ir - IR = 0$$
$$\xi = IR + Ir$$
(٢٠□٢)

قانون كيرشوف الثاني: إن المجموع الجبري للتغيرات الحاصلة في الجهد الكهربائي خلال مسار مغلق في الدائرة الكهربائية يساوي صفراً، وهناك صيغة أخرى لهذا القانون وهي: إنَّ المجموع الجبري لفروق الجهد بين طرفي كل عنصر في الدائرة الكهربائية المغلقة في ترتيب دوري معين، يساوي المجموع الجبري للقوى الدافعة الكهربائية فيها.

وهو عبارة عن مجموع فروق الجهد في الدائرة الكهربائية، وعندما نقوم بحل هذه المعادلة من أجل إيجاد مقدار التيار الكهربائي المار فيها نجد أنَّ:

(معادلة الدائرة الكهربائية)
$$I = \frac{\xi}{(r+R)}$$
(٢١□٢)

والآن إذا اخترنا الجهد عند النقطة (a) مساوياً إلى الصفر فإننا نستطيع تمثيل التغيُّر في فروق الجهد خلال الدائرة على النحو المبيَّن في الشكل (٢-١٠).



الشكل (٢-١٠)

وأما فرق الجهد بين طرفي البطارية فهو:

$$V_b - V_a = \xi - Ir$$
(٢□٢٢)

والآن، إذا ضربنا طرفي المعادلة (٢□٢٠) بمقدار التيار الكهربائي *(I)* نجد أن:

$$\xi I = I^2R + I^2r$$
(٢□٢٣)

وتفيد هذه العلاقة الرياضية أن قُدرة البطارية تتحول في المقاومات إلى قدرة تُفقد على شكل طاقة حرارية *resistive dissipation*.

وإذا كانت الدائرة الكهربائية مشتملة على عدد معلوم من البطاريات وعدد معلوم من المقاومات الخارجية الموصولة على التوالي فإن المعادلة (٢□٢١) تأخذ الشكل العام الآتي:

$$I = \frac{\Sigma\xi}{\Sigma R}$$
(٢□٢٤)

حيث تشتمل (ΣR) على مجموع المقاومات الداخلية للبطاريات والمقاومات الخارجية الموصولة على التوالي.

تطبيق (٢-٨) *Example*

تبلغ القوة الدافعة الكهربائية لإحدى البطاريات $(\xi = 24V)$، وتبلغ مقاومتها الداخلية $(r = 1\Omega)$.

١- أوجد حسابياً مقدار التيار الكهربائي المار في الدائرة.إذا عامت أن الحمل يساوي $(r = 7\Omega)$.

٢- أوجد حسابياً الفرق في الجهد بين قطبي البطارية.

٣- أوجد حسابياً مقدار قدرة البطارية.

الحل **Solution**:

١- من المعادلة الرياضية (٢١□٢) نجد أن التيار هو:

$$I = \frac{\xi}{R+r} = \frac{24V}{(1+7)\Omega} = 3\,A$$

٢- من المعادلة الرياضية (٢٢□٢) نجد أن:

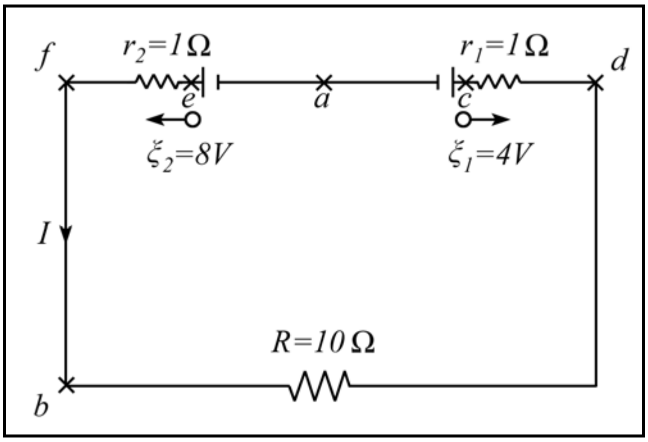
$$\begin{aligned} V_b - V_a &= \xi - Ir \\ &= 24-(3)(1) = 21V \end{aligned}$$

٣- أما قدرة البطارية فهي:

$$P = \xi I = 24 \times 3 = 72\,watt$$

تطبيق (٢-٩) Example

لديك الدائرة الكهربائية المبينة في الشكل (٢-١١).



الشكل (٢-١١)

١- أوجد حسابياً شدة التيار الكهربائي المار في هذه الدائرة.

٢- أوجد حسابياً فرق الجهد بين النقطتين (a) و(b).

الحل **Solution**:

١- لحساب شدة التيار نلاحظ أن لدينا مصدرين للقوة الدافعة الكهربائية، ولكن:

$$\xi_2 \rangle \xi_1$$

ولهذا فإن التيار الكهربائي سوف يسري من البطارية الثانية مكملاً مساره خلال الدائرة. وعليه فإننا سوف نبدأ بحساب التغيرات في الجهد بدءاً من النقطة *(a)* باتجاه معاكس لعقارب الساعة إلى أن يعود ثانية إلى ذات النقطة، إذن:

$$\xi_2 - Ir_2 - IR - Ir_1 - \xi_1 = 0$$

(قانون

$$I = \frac{\xi_2 - \xi_1}{r_1 + r_2 + R} = \frac{(8-4)V}{(1+1+10)\Omega} = \frac{4}{12} = 0.333A$$

كيرشوف الثاني)

٢- إن مجموع التغيرات في الجهد بين النقطتين *(a)* و*(b)* يساوي فرق الجهد بينهما، أي أن:

(لاحظ أننا نسير بعكس اتجاه التيار).

$$(V_c - V_a) + (V_d - V_c) + (V_b - V_d) = V_{ba}$$

$$\left.\begin{aligned}(V_c - V_a) &= \xi_1\\ (V_d - V_c) &= Ir_1\\ (V_b - V_d) &= IR\end{aligned}\right\} 4 + (0.333)(1) + (0.333)(10) = 7.663V$$

$$\therefore V_{ab} = -7.663$$

وإذا ما سرنا باتجاه التيار فإن:

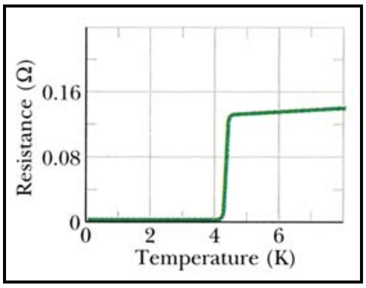
$$(V_e - V_a) + (V_b - V_e) = V_{ba}$$

$$\left.\begin{aligned}(V_e - V_a) &= \xi_2\\ (V_b - V_e) &= -Ir_2\end{aligned}\right\} 8 - (0.333)1 = 7.663V$$

$$\therefore V_{ab} = -7.663V$$

٨-٢ فوق التوصيل أو فرط التوصيل *Super Conductivity* (<u>للاطلاع فقط</u>):

تمكن العالم الألماني الفيزيائي *Kammerlingh Onnes* من اكتشاف أن المقاومة النوعية للزئبق تختفي تماماً وتنعدم قيمتها عند درجة الحرارة المقاربة للمقدار *(٤K)*، انظر الشكل (١٢-٢).



الشكل (١٢-٢) يبين كيف أن مقاومية الزئبق تنخفض إلى الصفر عند درجة الحرارة **(٤ K)** ويكون الزئبق عندها صلباً

ولهذه الظاهرة أهمية استثنائية في عالم التكنولوجيا، وذلك أن الشحنات الكهربائية يمكنها المرور في هذه الحالة *super conductivity* دون أن تفقد أي جزء من المقدار (I^2R) في معادلة القدرة الكهربائية وفقاً للمعادلة المعروفة $(W = I^2Rt)$ والتي تسمى قانون جول للتسخين. كما أن القصدير هو الآخر تتلاشى مقاومته النوعية عند درجة الحرارة *(٧,٢ K)*، وعلى وجه العموم فإن جميع المعادن تقترب مقاومتها النوعية من الصفر كلما اقتربت درجة الحرارة من الصفر المطلق.

ومن الغريب جداً ونحن نتداول هذه الظاهرة *super conductivity* أن نذكّر بأنه في عام ١٩٨٦ للميلاد لوحظ أن مركباً من مادة السيراميك *Ceramic*، وهو مادة عازلة، يمتلك هذه الخاصية نفسها عند درجة الحرارة *(١٢٢ K)*.

وخلاصة القول: إن المواد التي تمتاز بصفة فرط التوصيل تفقد مقاومتها الكهربائية فقداً تاماً عند درجات الحرارة المنخفضة *low temperature*، كما أن البحوث الحديثة تشير إلى أن المسألة ليست مقتصرة على درجات الحرارة المنخفضة، بل قد تحصل الظاهرة نفسها عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً تؤدي إلى حصولها في درجة حرارة الغرفة مثلاً، وعلى أسوأ الاحتمالات عند درجة حرارة النيتروجين السائل وهي:-

.(٧٧ K)

الخلاصة
Summary

- شدة التيار الكهربائي *Electric Current Intensity*: هي مقدار الشحنة الكهربائية *(q)* التي تعبر مقطعاً محدداً من الناقل خلال وحدة الزمن *(t)*، والرمز الشائع لشدة التيار الكهربائي هو *(I)*، وهي كمية عددية:

$$I(A)=\frac{q(C)}{t(s)}$$

- كثافة التيار الكهربائي *Electric Current density*: هي مقدار الشحنة الكهربائية *(q)* التي تعبر وحدة المساحة *(A)* خلال وحدة الزمن، أو بعبارة أخرى هي مقدار التيار الكهربائي *(I)* الذي يعبر وحدة المساحة *(A)*، وهي كمية اتجاهية:

$$\vec{J}(A.m^{-2})=\frac{I(A)}{A(m^2)}$$

- المقاومة *Resistance*: هي النسبة العددية بين فرق الجهد *(V)* مقاساً بالفولت لعنصر كهربائي وشدة التيار الكهربائي المار خلاله *(I)* مقاساً بالأمبير:

$$R(ohm)=\frac{V(volt)}{I(amper)}$$

ويمكننا إيجاد المقاومة المكافئة (R_{eq}) لمجموعة من المقاومات الموصولة على التوالي من القانون:

$$R_{eq}=R_1+R_2+R_3+...$$

كما يمكننا إيجاد المقاومة المكافئة (R_{eq}) لمجموعة من المقاومات الموصولة على التوازي من القانون:

$$\frac{1}{R_{eq}}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+...$$

- الأوم *Ohm*: هو وحدة قياس المقاومة في النظام الدولي للقياس (*SI*)، ويساوي مقاومة عنصر كهربائي يمر خلاله تيار كهربائي مقداره واحد أمبير، إذا سُلط بين طرفيه فرق جهد مقداره واحد فولت.
- المقاومة النوعية *Resistivity*: هي مقاومة جزء من مادة العنصر الكهربائي طوله متر واحد، ومساحة مقطعه متر مربع واحد.

$$\rho(\Omega.m) = R(\Omega)\frac{A(m^2)}{L(m)}$$

- المعامل الحراري لمقاومة المادة *Heat Coefficient of resistonce*: هو عبارة عن الزيادة الحاصلة في مقاومة جزء من المادة عندما ترتفع درجة حرارتها درجة واحدة.

$$\alpha(K^{-1}) = \frac{(R_T - R_o)\Omega}{R_o(\Omega)\Delta T(k)}$$

- سرعة الانجراف *Drift Velocity*: هي عبارة عن سرعة الإلكترونات الحرة في النواقل عند مرور التيار الكهربائي خلالها.

$$v_d(m/s) = \frac{J(A\,m^{-2})}{n(m^{-3})e(C)}$$

- القوة الدافعة الكهربائية *Electro motive force*: هي الشغل اللازم بذله لنقل وحدة الشحنات الكهربائية خلال الدائرة الكهربائية، وتقاس بوحدات فرق الجهد الكهربائي؛ الفولت.
- قانونا كيرشوف *Kirchhoff's rules*:

١- القانون الأول: إنَّ مجموع التيارات الكهربائية التي تدخل أي نقطة تفرع في الدائرة الكهربائية يساوي مجموع التيارات الكهربائية، التي تخرج من النقطة نفسها، وهناك صيغة أخرى لهذا القانون وهي: المجموع الجبري لشدة التيارات الكهربائية عند أي نقطة في الدائرة الكهربائية يساوي الصفر.

$$I = I_1 + I_2 + ...$$
$$I - I_1 - I_2 - ... = 0$$

٢- القانون الثاني: إن المجموع الجبري للتغيرات الحاصلة في الجهد الكهربائي خلال مسار مغلق في الدائرة الكهربائية يساوي صفراً، وهناك صيغة أخرى لهذا القانون وهي: إنَّ المجموع الجبري لفروق الجهد بين طرفي كل عنصر في الدائرة الكهربائية المغلقة في ترتيب دوري معين، يساوي المجموع الجبري للقوى الدافعة الكهربائية فيها.

$$\sum \xi = \sum V$$

الامتحانات الذاتية
Self Test Exam

ولغرض التدريب العملي على اختبار الطالب لنفسه، والتأكد من جدارته في المقدرة الفعلية على فهم واستيعاب التيار الكهربائي والدائرة الكهربائية، تم تخصيص خمسة امتحانات ذاتية.

الامتحان الذاتي الأول:

سلك من النحاس نصف قطره (٠,٩ *mm*) يمر خلاله تيار كهربائي مقداره (١,٣ *A*). أوجد حسابياً سرعة الانجراف $(\vec{v}_d)$ للإلكترونات الناقلة إذا علمت أن عدد الإلكترونات الناقلة يساوي $8.47\times10^{28}\,(m^{-3})$.

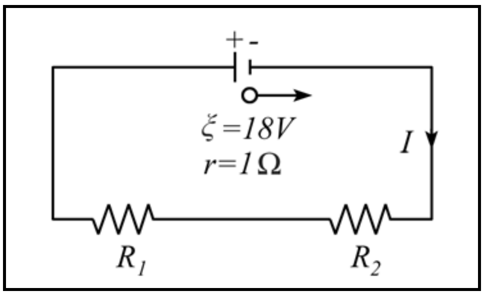
الامتحان الذاتي الثاني:

مقاومتان $(R_1=12\,\Omega)$ و $(R_2=5\,\Omega)$ قمنا بوصلهما على التوالي، انظر الشكل (٢-١٣)، ببطارية قوتها الدافعة الكهربائية $(\xi=18V)$، ومقاومتها الداخلية $(r=1\Omega)$.

١- أوجد حسابياً مقدار التيار المار في الدائرة.

٢- أوجد حسابياً مقدار الجهد بين طرفي كل مقاومة.

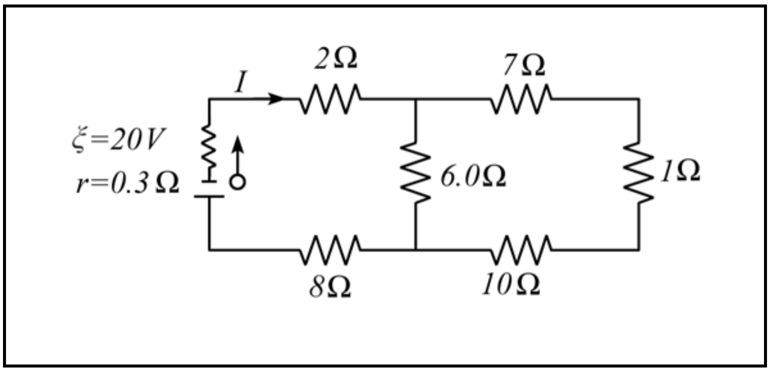
٣- أوجد حسابياً مقدار فرق الجهد الطرفي للبطارية عندما تقوم بإرسال التيار الكهربائي.



الشكل (٢-١٣) الامتحان الذاتي الثاني

الامتحان الذاتي الثالث:

لديك الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل (٢-١٤):



الشكل (٢-١٤) الامتحان الذاتي الثالث

أوجد شدة التيار الكهربائي المار في الدائرة؟

أوجد التيار والجهد الكهربائي عند كل مقاومة؟

الامتحان الذاتي الرابع:

سلك ناقل يبلغ طوله $(10\,m)$ كما يبلغ نصف قطره $(5\,mm)$، أما مقاومته النوعية فتساوي $(1.62\times10^{-8}\ \Omega.m)$، وعدد الإلكترونات لوحدة الحجوم تساوي $(5.9\times10^{28}\ m^{-3})$، فإذا مرّ خلاله تيار كهربائي مقداره $(1.5\,A)$، أوجد حسابياً كلاً من:

١- كثافة التيار الكهربائي خلاله.

٢- سرعة انسياق الإلكترونات خلاله.

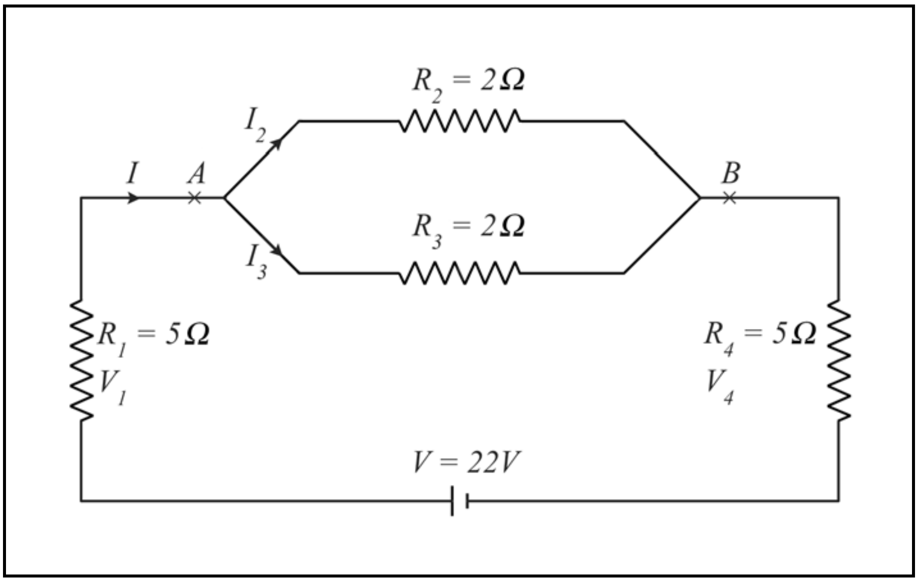
٣- شدة المجال الكهربائي حول هذا الناقل.

٤- مقاومة الناقل.

٢- ناقلية (موصلية) هذا الناقل.

الامتحان الذاتي الخامس:

تأمل الدائرة الكهربائية المبينة في الشكل (١٢-٢)، ستجد أنّ بطارية تعطي جهداً مقداره $(22V)$ ، تغذي أربع مقاومات.



الشكل (١٢-٢) الامتحان الذاتي الخامس

١- أوجد حسابياً مقدار شدة التيار الكهربائي المار في الدائرة.

٢- أوجد حسابياً مقدار شدة التيار الكهربائي المار في المقاومة (R_3).

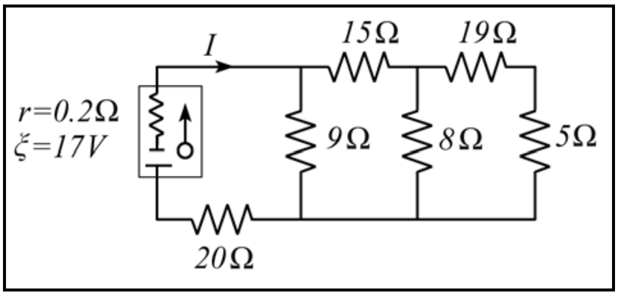
٣- أوجد حسابياً مقدار المقاومة النوعية للمقاومة (R_4) ، إذا علمت أنّها مصنوعة من سلك طوله $(1m)$ ، ونصف قطره $(2mm)$.

ملاحظة: نتمنى على أبنائنا الطلبة المحاولة الجادة في حل مسائل الامتحان الذاتي على ورقة خارجية، ثم إجراء المقارنة بين ما توصلوا إليه مع الحل النموذجي المرفق آخر الكتاب في الملحق (د).

مسائل وتمارين الوحدة الثانية

Unit TowExercises & Problems

٢-١ لديك الدائرة الكهربائية الموضحة في الشكل (٢-١٦).



الشكل (٢-١٦)، مسألة (٢-١)

أوجد شدة التيار الكهربائي المار في الدائرة؟

٢-٢ مقاومتان *(١٢ Ω)* و*(٢,٤ Ω)* موصولتان على التوالي بطرفي مولد كهربائي، مقاومته الداخلية *(r = ٠,٦ Ω)* ويعطي قوة دافعة كهربائية مقدارها *(ξ = ٧٢ V)* أوجد:

١- التيار الكهربائي المار في الدائرة.

٢- الهبوط في الجهد عبر المقاومة *(٢,٤ Ω)*.

٣- الهبوط في الجهد عبر المقاومة *(١٢ Ω)*.

٤- قراءة فولتميتر موصول عبر طرفي المولد إذا كانت الدائرة مفتوحة.

٢-٣ يبلغ فرق الجهد الطرفي لبطارية جافة *(١,٤١ V)*، ترسل تياراً قدره *(٢ A)*، أوجد مقدار مقاومتها الداخلية إذا كان فرق الجهد يساوي *(١.٢٩ V)* عندما تكون الدائرة مفتوحة؟

٢-٤ يبلغ مقدار مقاومة ملف موصول على التوالي مع مصباح كهربائي (Ω ٢)، أوجد مقدار مقاومة المصباح الكهربائي إذا كانت شدة التيار المار فيه (A ٤)، وذلك عندما تُوصَّل المجموعة بمصدر فولتية مقدارها (V ١٠٠)؟

٢-٢ مولد قوته الدافعة الكهربائية تساوي (V ١٢٠)، وفرق جهده الطرفي (V ١١٠)، كم هو مقدار مقاومته الداخلية عندما يرسل تياراً قدره (A ٢٠)؟

٢-٦ حزمة من الأيونات الموجبة، مضاعفة الشحنة الكهربائية، تحتوي على (2×10^{8}) من الشحنات لكل واحد سنتيمتر مكعب، تتحرك جميعها باتجاه الشمال بسرعة قدرها ($1\times10^{5}\,m/s$)، أوجد حسابياً كثافة التيار الكهربائي (J).

٢-٧ سلك من النحاس يبلغ نصف قطره (mm ١.٢)، يسري خلاله تيار مقداره ($2.4\times10^{-8}\,A$)، أوجد حسابياً كل من:

١- كثافة التيار الكهربائي (J).

٢- سرعة انجراف الإلكترونات داخل السلك.

٢-٨ قريباً من السطح، تبلغ كثافة البروتونات في الرياح الناشئة عن الشمس ($8.70\ cm^{-3}$) وسرعتها ($470\,km/s$).

١- أوجد حسابياً كثافة التيار الكهربائي (J) لهذه البروتونات.

٢- افرض أن المجال المغناطيسي للأرض لا يقوم بعملية إبعادها والتخلص من التيار الكهربائي الذي تسببه، أوجد محصلة التيار الكهربائي الذي ستتلقاه الأرض. نصف قطر الأرض يساوي ($6.37\times10^{6}\,m$).

٢-٩ سكة عربة مصنوعة من الفولاذ، يبلغ مساحة مقطعها ($cm^{٢}$ ٢٦). أوجد مقدار مقاومة مسافة قدرها (km ١٠) من هذه السكة إذا كانت المقاومة النوعية للفولاذ resistivity تساوي ($\Omega.m$ $^{\square ٧}$١٠ × ٣).

٢-١٠ سلك مصنوع من مادة ناقلة للتيار الكهربائي، نصف قطره (٠.٢ *mm*)، وطوله (٤ *m*)، أما مقاومته *resistance* فتساوي (٢٢ *mΩ*). أوجد مقدار المقاومة النوعية لهذه المادة.

٢-١١ سلك مقاومته (٦ *Ω*)، أجريت عليه عملية سحب بحيث ازداد طوله إلى ثلاثة أضعاف طوله الأصلي حيث لم تتغير كل من مقاومته النوعية وكثافته. كم هي مقاومة السلك الجديد؟ أوجد ذلك حسابياً.

٢-١٢ راديو ترانزستور صغير يعمل بفولتية مقدارها (٩ *V*) وتبلغ قدرته (٧ *W*)، بقي يعمل لمدة (٤ *h*). كم هو مقدار الشحنة الكهربائية التي استهلكها؟ أوجد ذلك حسابياً.

٢-١٣ عند مرور تيار كهربائي مقداره (٣ *A*) تتولد طاقة حرارية في المقاوم الناقل لهذا التيار مقدارها (١٠٠ *W*) أوجد مقدار مقاومة هذا الناقل.

مسائل اختيارية

Optional Problems

٢-١ تبلغ مقاومة لفات آلة مصنوعة من النحاس عندما تكون متوقفة عن العمل (٢٠ Ω) عند درجة الحرارة (٢٠ $^\circ C$)، بلغت هذه المقاومة (٢٨ Ω) بعدما عمل محركها لعدة ساعات، أوجد درجة الحرارة عند هذه المقاومة إذا كانت المقاومة النوعية للنحاس تساوي ($1.69\times10^{-8}\ \Omega.m$)، ومعاملها الحراري عند ($20^\circ C$) ($4.3\times10^{-3}\ K^{-1}$) على التوالي.

٢-٢ حزمة ثابتة من أشعة ألفا *alpha particles* شحنة الواحدة منها (q = ٢e)، تسير بطاقة حركية ثابتة مقدارها (٢٠ MeV)، وتيار كهربائي ثابت مقداره (٠,٢٢ A).

١- إذا كانت الحزمة متوجهة إلى سطح مستوٍ وبشكل عمودي عليه، كم عدد جزيئات أشعة ألفا التي سوف تصطدم بهذا السطح خلال زمن قدره (٣ s)؟

٢- أوجد عدد جزيئات أشعة ألفا في مسار طوله (٢٠ cm) عند أية لحظة.

٣- أوجد مقدار فرق الجهد الذي يجب تسليطه لتعجيل جزيئات أشعة ألفا كي تستطيع امتلاك طاقة حركية مقدارها ($20\,MeV$).

ملاحظة: $1eV = 1.6\times10^{-19}\ J$.

٢-٣ استُخدم فرق جهد مقداره (١,٢ V) بين طرفي سلك نحاسي طوله (٣٣ m) وقطره (٠,١ cm)، أوجد كلاً من:

١- مقدار التيار الكهربائي المار في السلك.

٢- كثافة التيار الكهربائي المار في السلك.

٣- شدة المجال الكهربائي الذي يؤثر على السلك.

٤- مقدار القدرة الحرارية المهدورة نتيجة لمرور التيار الكهربائي.

ملاحظة: المقاومة النوعية للنحاس عند درجة حرارة الغرفة تساوي $(1.69\times10^{-8}\ \Omega.m)$.

فيزياء عامة

المجال المغناطيسي

المجال المغناطيسي

٣

الوحدة الثالثة

المجال المغناطيسي

Magnetic Field

٣-١ المقدمة *Introduction*:

إنَّ التجارب العلمية تؤكد على أن المجال المغناطيسي ($\vec{B}$) ينشأ بسبب حركة الشحنات الكهربائية، بمعنى أن الشحنات الكهربائية الساكنة لا ينشأ عنها مجال مغناطيسي، إذاً كيف نفسِّر تفرد بعض المواد الطبيعية بامتلاكها مجالاً مغناطيسياً، ذلك الذي تعودنا على تسميته مغناطيساً طبيعياً أو دائماً *permanent magnet*؟

إنَّ المجال المغناطيسي لهذا النوع من المغانط يُعزى إلى التيارات الكهربائية التي تسري في مسارات مغلقة دائرية الشكل ناشئة عن حركة الإلكترونات في مدارات ذراتها، أما في المغناطيس الكهربائي *electromagnet* فإن الإلكترونات المتحركة خلال السلك أو الملف المصمم لهذا الغرض والمعبرة عن التيار الكهربائي هي المسؤولة عن نشوء المجال المغناطيسي. وهكذا نجد أن التفكير الصحيح في هذا الموضوع يكون على النحو الآتي:

moving charge (شحنة متحركة) $\leftrightarrow \vec{B} \leftrightarrow$ (شحنة متحركة) *moving charge*

واعتقادنا بأنَّ التيار الكهربائي هو نتيجة لحركة عدد هائل من الإلكترونات، يؤدي إلى:

moving charge (تيار كهربائي) $\leftrightarrow \vec{B} \leftrightarrow$ (تيار كهربائي) *moving charge*

إن العالم الفيزيائي أورستد *Hans Chrictian Orested* هو أول من أشار إلى هذه الحقيقة، وذلك في عام ١٨٢٠ للميلاد حيث أثبت أن إبرة البوصلة تنحرف عندما نقربها من سلك يمر به تيار كهربائي، وكانت تجربته هذه بداية لتطور هذا الموضوع تطوراً كبيراً.

إن أهمية هذه التجربة تتجسد في وجود العلاقة بين المغناطيسية والكهرباء، وهذا ما سوف يتضح من خلال هذه الوحدة.

وبعد أن يكمل الطالب دراسة هذه الوحدة، ويستوعب المفاهيم والأفكار والمبادئ التي وردت خلالها، ويقوم بنفسه بحل أسئلة الامتحان الذاتي الموجودة في نهايتها، ويقارن حلوله مع الحلول النموذجية المرفقة في الملحق (د)، بعد ذلك كله نتوقع أن يكون الطالب قادراً على:

١- أن يصف المجال المغناطيسي، على أنَّه الحيّز أو المنطقة التي تتميز بوجود قوة مغناطيسية يمكن اختبارها بواسطة القطب الشمالي لمغناطيس.
٢- أن يحسب القوة المغناطيسية الناشئة عن تأثير مجال مغناطيسي على شحنة متحركة.
٣- أن يحسب القوة المغناطيسية الناتجة عن تأثير مجال مغناطيسي في ناقل مستقيم يمر به تيار كهربائي.
٤- أن يستخدم قانون بيو- سافار بشكل صحيح لحساب المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار مستمر يسري في ناقل كهربائي (هذه الفقرة للاطلاع فقط، حيث سوف يحصل الطالب على النتيجة ذاتها باستخدام قانون أمبير).
٥- أن يستخدم قانون أمبير في عددٍ من التطبيقات على مرور التيار الكهربائي خلال نواقل متناظرة هندسياً، لحساب المجال المغناطيسي.
٦- أن يعبِّر عن معنى النفاذية المغناطيسية، وعلاقتها بشدة المجال المغناطيسي.

٣-٢ المجال المغناطيسي *The Magnetic Field (B)*:

في الوحدة الاولى من هذه الحقيبة كنا قد عرَّفنا المجال الكهربائي $(\vec{E})$ لشحنة كهربائية (q) في وضع الاستقرار بواسطة شحنة اختبارية كهربائية (q_o)، وقمنا بعد ذلك بقياس القوة الكهروستاتيكية $(\vec{F})$ المؤثرة عليها وعرفنا $(\vec{F})$ على النحو الآتي:

$$\vec{F} = q\vec{E} \qquad (٣-١)$$

وبهدف تعريف المجال المغناطيسي $(\vec{B})$ وبطريقة مماثلة، نستخدم القوة التي يؤثر بها هذا المجال على شحنة كهربائية تتحرك فيه بسرعة معلومة.

ولكننا، لا نستطيع أن نعرف القوة المغناطيسية بالطريقة التي استخدمنا لتعريف القوة الكهروستاتيكية، لأن المغناطيس أحادي القطب كما هو معلوم لايزال محض افتراض. إذاظص لا بد

من تعريف القوة المغناطيسية بدلالة الشحنة الكهربائية المتحركة. ولتحقيق هذا الغرض نلجأ إلى إطلاق شحنات كهربائية بسرعة معروفة في منطقة تأثير المجال المغناطيسي $(\vec{B})$، وعلى افتراض أن الشحنة الموجهة إلى المجال المغناطيسي $(\vec{B})$ هي (q)، سرعتها $(\vec{v})$، لقد وُجد عملياً أن القوة $(\vec{F}_B)$ وهي القوة التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على الشحنة الكهربائية المتحركة (q)، تساوي:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \qquad (٢\square٣)$$

وهكذا نلاحظ أنَّ القوة $(\vec{F}_B)$ هي حاصل الضرب الاتجاهي *cross product*، للمتجهين $(\vec{B})$ و $(\vec{v})$، حيث (q) هي عبارة عن الشحنة الكهربائية، وقد تكون موجبة أو سالبة، والآن، ما الذي نستنتجه من المعادلة (٢□٣)؟

١- إن القوة المغناطيسية $(\vec{F}_B)$ دائماً تكون عمودية على المستوي المكون من متجه السرعة $(\vec{v})$ ومتجه المجال المغناطيسي $(\vec{B})$، وهذا ما يشير إلى أن القوة تستطيع فقط أن تغير اتجاه سرعة الشحنة المعرضة لتأثير المجال المغناطيسي المتنظم $(\vec{B})$، تأمل الشكل (١-٣ أ، ب، جـ)، ويمكننا أن نستخدم قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه القوة $(\vec{F}_B)$، وذلك على النحو الآتي:

نبسط اليد اليمنى[١] على النحو المبين في الشكل (١-٣ أ، ب، جـ)، ومن الواضح أنَّ أصبع الإبهام يشير باتجاه سرعة الشحنات الموجبة المتحركة $(\vec{v})$، بينما تشير باقي أصابع اليد اليمنى باتجاه المجال المغناطيسي $(\vec{B})$، وتكون القوة المغناطيسية $(\vec{F}_B)$ في هذه الحالة عمودية على راحة اليد، واتجاهه مبتعداً عنها، تأمل الشكل (١-٣ ب)، أما إذا كانت الشحنات المتحركة سالبة، فإن تمثيل القوة يكون وفقاً للشكل (١-٣ جـ)، أي أن اتجاه القوة في هذه الحالة يكون معاكساً لاتجاهها في الحالة الأولى، عندما كانت الشحنات موجبة.

٢- إنَّ المجال المغناطيسي لا يؤثر بأية قوة على الشحنات الموازية له، أو المتحركة بجهة معاكسة لحركته *parallel or antiparallel*، ومرة أخرى ومن خلال ملاحظة الشكل (١-٣ جـ) نجد أنَّ:

$$\vec{F}_B = qv\,B\sin\theta \qquad (٢\square٣)$$

حيث (θ) هي الزاوية بين متجه السرعة ومتجه المجال المغناطيسي.

٣- إنَّ أعلى قيمة للقوة المغناطيسية *deflecting force* هي:

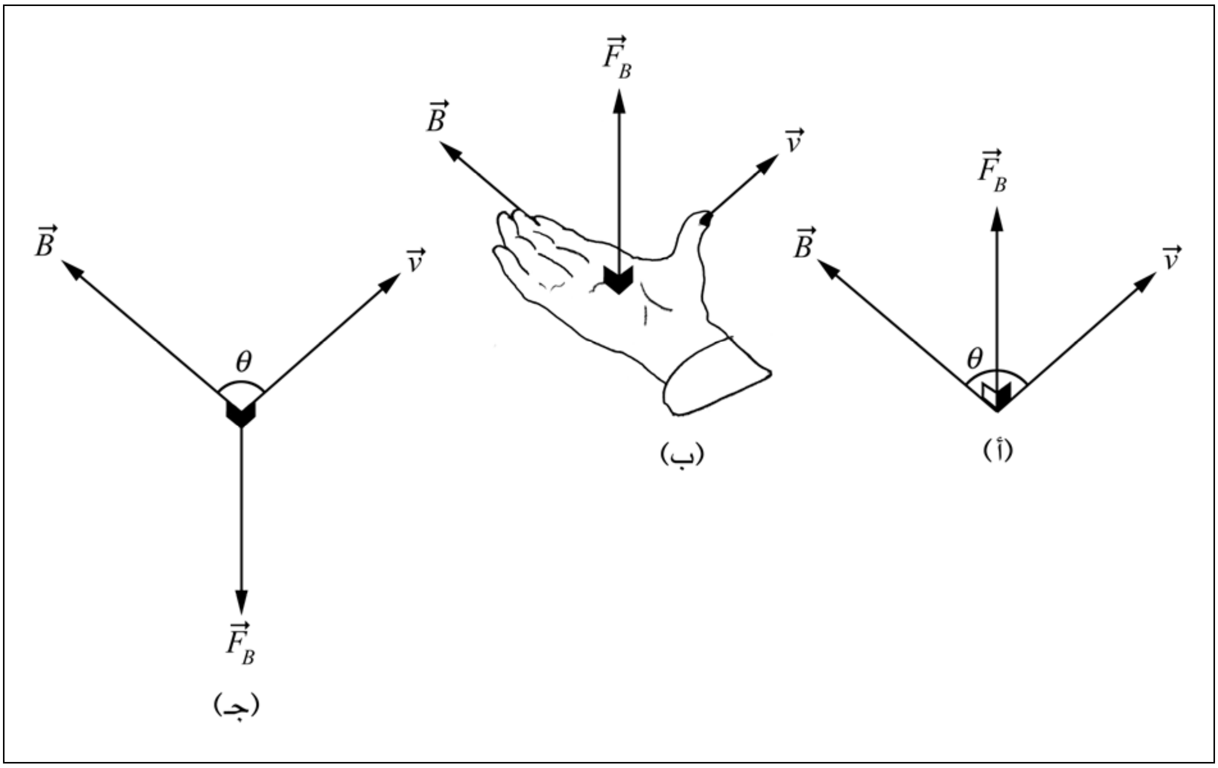
(١) يميل البعض إلى استخدام اليد اليمنى مع الشحنات الموجبة واليسرى مع الشحنات السالبة، بحيث تكون راحة اليد إلى الأسفل.

$$\vec{F}_{B\,max} = qvB \qquad (٣\square٤)$$

وذلك عندما تكون الزاوية ($\theta = ٩٠^{\circ}$).

٤- إن القوة المغناطيسية ($\vec{F}_B$) تتناسب تناسباً مباشراً مع كلٍ من (q) و(v).

٥- إن اتجاه ($\vec{F}_B$) يعتمد على إشارة الشحنة الكهربائية، انظر الشكل (١-٣ ب، جـ).



الشكل (١-٣ أ، ب، جـ)

أ- شحنة كهربائية موجبة (q) تتحرك بسرعة (v) خلال مجال مغناطيسي ($\vec{B}$)، تؤثر عليها قوة مغناطيسية ($\vec{F}_B$).

ب- وتظهر فيه قاعدة اليد اليمنى وتوضح كيف أن (v) تجتاح (B).

جـ- وذلك عندما تكون الشحنة سالبة $(-q)$ فإن اتجاه ($\vec{F}_B$) يكون بالاتجاه المعاكس لها بالشكل (أ).

إنَّ وحدة قياس المجال المغناطيسي ($\vec{B}$) في النظام الدولي للقياس (SI) هي التسلا *tesla*، والتي يمكن تعريفها بالرجوع إلى المعادلة (٣-٣) على النحو الآتي:

(تعريف المجال المغناطيسي) $$\boxed{B = \frac{F_B}{qv}}$$

$$1\,tesla = 1T = \frac{Newton}{(Coulomb)(meter / second)}$$

$$= 1\frac{Newton}{(Coulomb / second)(meter)}$$

$$1T = 1\frac{N}{A.m}$$

ذلك أن:

$$Ampere = \frac{Coulomb}{second}$$

وتعرّف التسلا بأنها مقدار المجال المغناطيسي الذي يؤثر بقوة مقدارها واحد نيوتن في شحنة كهربائية مقدارها واحد كولوم، تتحرك بسرعة مقدارها واحد متر لكل واحد ثانية في اتجاه عمودي على المجال المغناطيسي.

وهناك وحدة أخرى شائعة لقياس شدة المجال المغناطيسي وهي الكاوس *Gauss*، ويسمى الجهاز الذي يستخدم لقياس شدة المجال المغناطيسي باسمها *Gauss meter*.

$$١\ T = ١٠^{٤}\ gauss$$

ولكن الكاوس لا ينتمي إلى النظام الدولي للقياس *(SI)*. وتختلف شدة المجال المغناطيسي من مكان لآخر، ولغرض التعرف على ذلك انظر الجدول (١-٣).

نأمل بعد اطلاعك عزيزي الطالب على هذا الجدول أن تكون قد ميَّزت بعض الأمثلة على وجود المجال المغناطيسي، كما نأمل أن تكون قد ربطت بين طبيعة الشحنة الكهربائية المتحركة ومقدار المجال المغناطيسي الناشئ عنها.

at the surface of a neutron star (calculated)	شدة المجال على سطح النيوترون	$١٠^{٨}\ T$
an electromagnet	شدة المجال لمغناطيس كهربائي	$١,٥\ T$
near a small bar magnet	شدة المجال بالقرب من مغناطيس صغير	$١٠^{□٢}\ T$
at the surface of the earth	شدة المجال عند سطح الأرض	$١٠^{□٤}\ T$
in intersteller space	شدة المجال في الفضاء بين النجوم	$١٠^{□١٠}\ T$
smallest value in amagnetically shielded room	أقل مقدار للمجال في غرفة معزولة مغناطيسياً	$١٠^{□١٤}\ T$

الجدول (١-٣) المجال المغناطيسي لمجموعة من الحالات المختلفة

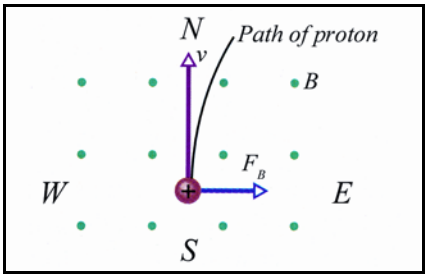
تطبيق (٣-١) *Example*

في حيز مختبري يبلغ مقدار المجال المغناطيسي $(B = 1.2\,mT)$، واتجاهه عمودياً نحو الأعلى، انظر الشكل (٣-٢)، يتحرك بروتون خلاله بطاقة حركية قدرها $(5.3\,MeV)$ وبشكل أفقي من الجنوب إلى الشمال، أوجد حسابياً مقدار قوة الانحراف التي تؤثر على البروتون، كتلة البروتون تساوي $(m_p = 1.67 \times 10^{-27}\,kg)$.

الحل *Solution*:

إن قوة الانحراف (F_B) تعتمد على سرعة البروتون ذلك أن:

$$F_B = qv\,B \sin\theta$$



الشكل (٣-٢) يبيِّن بروتوناً متحركاً خلال مجال مغناطيسي، منحرفاً نحو الشرق، نلاحظ اتجاه المجال عمودياً وإلى الأعلى

يمكننا إيجاد سرعة البروتون من خلال طاقته الحركية، على النحو الآتي:

$$K = \frac{1}{2} m_p v^2$$

$$(5.3 \times 10^6\,eV) = \frac{(1.67 \times 10^{-27}\,kg)v^2}{2}$$

إلا أنَّ:

$$v^2 = \left[\frac{(2)(5.3 \times 10^6)(1.6 \times 10^{-19}\,J/eV)}{(1.67 \times 10^{-27}\,kg)}\right]$$

$$v = 3.2 \times 10^7\,m/s$$

$$F_B = (1.6 \times 10^{-19}\,C)(3.2 \times 10^7\,m/s)(1.2 \times 10^{-3}\,T)(\sin 90)$$

$$= 6.1 \times 10^{-15}\,N$$

٣-٢-١ خطوط المجال المغناطيسي *Magnetic Field Lines*:

نقوم عادة بوصف المجال المغناطيسي بدلالة خطوط وهمية، نطلق عليها خطوط المجال المغناطيسي، وللتعرف على هذه الخطوط تأمل الشكل (٣-٣)، إنَّ هذه الخطوط تأخذ مسارات مغلقة بدايةً من القطب الشمالي *(N) north ploe* وتنتهي عند القطب الجنوبي *(S) south pole*.

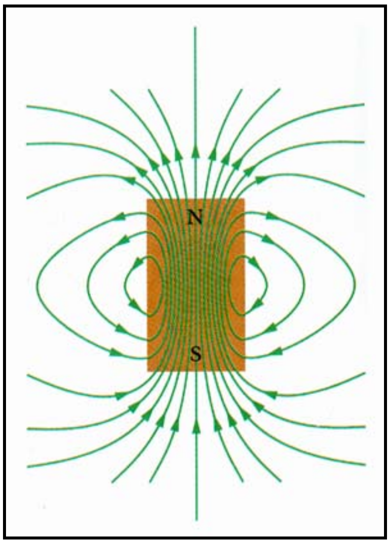
إن تمثيل المجال المغناطيسي بهذه الطريقة تعبّر عن الدلالات العلمية الآتية:

١- إن ازدياد عدد هذه الخطوط يعبِّر عن ازدياد مقدار المجال المغناطيسي $(\vec{B})$.

٢- إن هذه الخطوط تكمل مساراً مغلقاً باستثناء الخط المستقيم الذي يمر وسط المغناطيس، إلا أنه هو الآخر يُكمل مساراً مغلقاً عند اللانهاية، وهذا هو السبب الذي يجعلنا نصف المجال المغناطيسي للأرض بأنَّه موازٍ لسطحها عند خط الاستواء، وعمودياً عليها عند القطبين فقط، أما في ما عدا ذلك فإنه يصنع زاوية (θ)، تمثل زاوية الميل للمجال $(\vec{B})$.

٣- إن الميل عند أي نقطة وعلى أيٍ من تلك الخطوط يمثل مقدار المجال المغناطيسي عندها.

٤- إن الكرة الأرضية تعتبر مغناطيساً كبيراً قطبه الجنوبي عند القطب الشمالي الجغرافي، وقطبه الشمالي عند القطب الجنوبي الجغرافِي، وهذا هو السبب الذي يجعل المغناطيس المعلق بخيط، أو الإبرة المغناطيسية لبوصلة تتجه شمال وجنوب على وجه التقريب.



الشكل (٣-٣) يبيِّن خطوط المجال المغناطيسي لقضيب مغناطيسي،

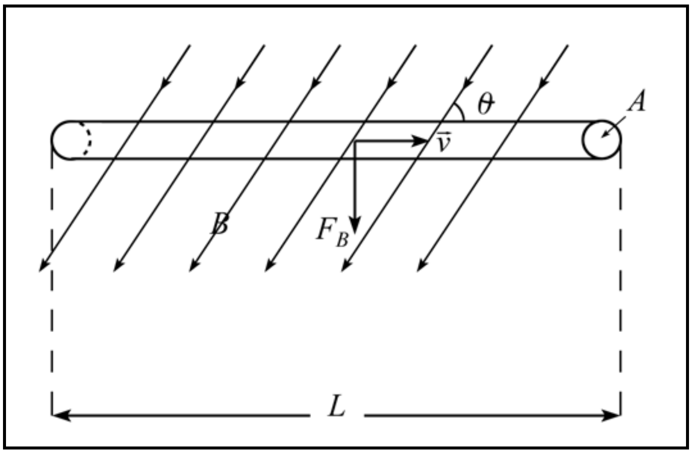
وهي على شكل حلقات مغلقة تبدأ عند القطب المغناطيسي الشمالي (*N*)
وتنتهي عند القطب الجنوبي (*S*)

٣-٣ القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك يمر به تيار كهربائي

:*The Magnetic Force On A Current-carrying Wire*

لدراسة القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك ناقل مستقيم يمر به تيار كهربائي، تأمل الشكل (٣-٤).

بعد أن نتأمل الشكل (٣-٤) جيداً، نجد أن السلك الذي يسري فيه التيار الكهربائي (I)، طوله (L)، مساحة مقطعه (A)، موجود في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (B)، وهدفنا الآن هو تحديد مقدار واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على هذا السلك.



الشكل (٣-٤) القوة المغناطيسية المؤثرة على سلك يمر به تيار كهربائي

كنا قد توصلنا في الفقرة (٣-٢) إلى أن القوة المغناطيسية ($\vec{F}_B$) المؤثرة على شحنة كهربائية (q) تسير بسرعة ($\vec{v}$)، إلى العلاقة الرياضية (٣-٢)، والتي تنص على أن:

$$F_B = q\vec{v} \times B$$

ومن الواضح أنَّ الشحنة الكهربائية في حالة السلك هذه تساوي:

$$q = en(LA)$$

حيث إنَّ حجم السلك هو عبارة عن حجم أسطوانة مساحة قاعدتها (A) وطولها (L)، يساوي (LA)، وعدد الشحنات لوحدة الحجوم هو (n)، بينما (e) هي شحنة الإلكترون المتعارف عليها، إذاً، القوة المغناطيسية المؤثرة في السلك تساوي:

$$F_B = en(LA)v\,B\sin\theta \qquad (٣-٥)$$

ولكن المقدار $(v = L/t)$ وكذلك $(I = enLA/t)$، وبتعويض هذه المقادير في المعادلة (٣-٥) نجد أنَّ:

$$F_B = ILB\sin\theta$$

وبصفة عامة نكتبها على النحو الآتي:

(٣-٢) (القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك) $$\boxed{\vec{F}_B = I\vec{L}\times\vec{B}}$$

وهي المعادلة الرياضية التي تعبر عن القوة المطلوبة، أما اتجاهها فيتم تحديده بواسطة قاعدة اليد اليمنى، ونذكِّر بأن اتجاه $(\vec{L})$ هو اتجاه سريان التيار الكهربائي.

وإذا لم يكن السلك الناقل مستقيماً فيمكننا تقسيمه إلى أجزاء مستقيمة صغيرة، ونعاملها وفقاً للصيغة الرياضية (٣-٢)، بعد ملاحظة أن محصلة القوة المؤثرة على السلك في هذه الحالة هي المجموع الاتجاهي للقوى المؤثرة على مجموع القطع المستقيمة، ويمكننا في هذه الحالة التعبير عن القوة (F_B) وفقاً للمعادلة الرياضية الآتية:

$$dF_B = Id\vec{L}\times\vec{B}$$

حيث إنَّ كلاً من $(d\vec{F}_B)$ و $(d\vec{L})$ أجزاء تفاضلية من القوة الكلية $(\vec{F}_B)$ والطول الكلي $(\vec{L})$.

تطبيق (٣-٢) *Example*

قطعة من سلك ناقل مستقيم طولها (٠,٥ m) يمر بها تيار مقداره (١٢ A) يصنع زاوية مقدارها (٣٠ °)، يؤثر فيها مجال مغناطيسي مقداره $(2\times10^{-2}\,T)$، أوجد حسابياً مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة على هذه القطعة.

الحل *Solution*:

باستخدام العلاقة الرياضية (٣-٥):

$$F_B = ILB\sin\theta$$

نجد أن:

$$I = 12\,A$$
$$L = 0.5\,m$$
$$B = 2 \times 10^{-2}\,T$$
$$\theta = 30°$$
$$F_B = (12\,A)(0.5\,m)(2 \times 10^{-2}\,T)\sin 30°$$
$$= 0.06\,N$$

تطبيق (٣-٣) Example

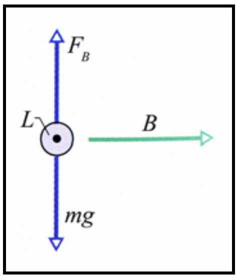
سلك نحاسي مستقيم موضوع بشكل أفقي في مجال مغناطيسي $(\vec{B})$، يمر به تيارٌ مقداره (٢٨,٠ A). أوجد حسابياً مقدار واتجاه المجال المغناطيسي $(\vec{B})$ بحيث يبقى السلك عائماً، وتوازن القوة (F_B) وزن السلك (mg)، تأمل الشكل (٣-٥)، إذا علمت أن الكثافة الطولية[1] لمادة السلك تساوي (٤٣,٣ g/m).

الحل Solution:

بالنظر إلى الشكل (٣-٥)، نجد أنَّ وزن السلك (mg) تعادله قوة مغناطيسية (F_B) يمكن حسابها من المعادلة (٣-٣)، أي أن:

$$F_B = mg = LIB$$
$$B = \frac{mg}{LI} = \frac{(46.6 \times 10^{-3}kg)(9.8m/s^2)}{(1m)(28A)}$$
$$= 1.6 \times 10^{-2}T$$

نلاحظ أننا عوضنا عن كتلة السلك بالمقدار $(46.6 \times 10^{-3}\,kg)$، مستفيدين من الكثافة الطولية التي أعطيت في نص السؤال، وبمعاينة الشكل نجد أن هذا المجال المغناطيسي يتجه نحو الأعلى أي خارجاً من الورقة.



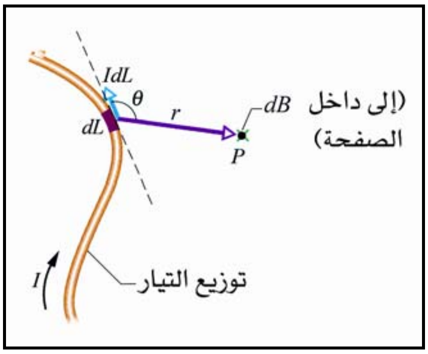
الشكل (٣-٥)، التطبيق (٣-٣)

(١) الكثافة الطولية لمادة هي كتلة وحدة الأطوال، ووحدة قياسها في النظام الدولي (SI) هي (kg/m).

٣-٤ المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي (قانون بيو- سافار- **للاطلاع فقط**):

***Biot-Sarart law, Magnetic Field Du To ACurrnet*:**

بهدف استيعاب القانون المنسوب إلى العالمين (بيو - سافار) *Biot-Savart* المستخدم لحساب المجال المغناطيسي للتيار الكهربائي المار في سلك ناقل، بدايةً، تأمَّل الشكل (٣-٣).



الشكل (٣-٣)

بعد ملاحظة الشكل (٣-٣) نجد أن مقداراً من طول السلك *(dL)* يمر خلاله تيار كهربائي ثابت مقداره *(I)*، ينشأ عنه مجال مغناطيسي مقداره *(dB)* عند النقطة *(p)* التي تبعد مسافة *(r)* عن قطعة السلك الناقل. لقد أكدّ هذان العالمان أنّ مقدار المجال المغناطيسي التفاضلي *(dB)* يكون عمودياً على مقدار طول السلك التفاضلي *(dL)* وهو في اتجاه التيار الكهربائي عند النقطة *(p)*، كما أنَّهما توصلا إلى النتائج الآتية:

$$dB \propto \frac{1}{r^2}$$
$$dB \propto I$$
$$dB \propto \sin\theta$$
$$dB \propto dL$$

حيث *(θ)* هي الزاوية بين *(dL)* واتجاه الخط الواصل بين *(dL)* والنقطة *(p)*:

$$dB \propto \frac{IdL\sin\theta}{r^2}$$

وبعد تحويل التناسب إلى مساواة وإدخال ثابت التناسب، نجد أنَّ:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{IdL\sin\theta}{r^2}$$ (قانون بيو- سافار) (٣-٧)

حيث (μ_o) مقدار ثابت يسمى ثابت النفاذية *permeabiliy constant*، أما مقداره العددي فيساوي إلى:

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}\ T.m/A$$
$$\approx 1.26 \times 10^{-6}\ T.m/A$$

ويُلاحظ من خلال الشكل (٣-٣) أنَّ اتجاه المقدار *(dB)* إلى داخل الصفحة، كما نلاحظ أيضاً أن مقدار الضرب الاتجاهي $(dL \times r)$ حيث إن *(r)* في هذه الحالة هو المتجه الممتد من عنصر التيار إلى النقطة *(p)*، وهكذا يمكننا إعادة كتابة المعادلة (٣□٧) بالصيغة الاتجاهية الرياضية الآتية:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{d\vec{L} \times \vec{r}}{r^3} \qquad (٣□٨)$$

إن العلاقة الرياضية (٣□٧) تمثل الصيغة العامة لقانون بيو - سافار، ويمكننا استخدامها لحساب شدة المجال المغناطيسي في حالات مختلفة، وسنستعرضها فيما يلي على شكل أمثلة محلولة.

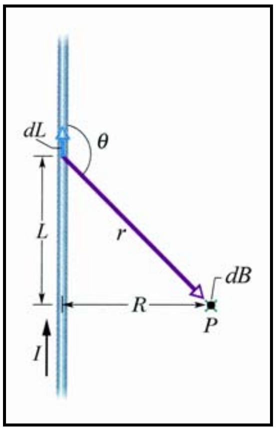
تطبيق (٣-٤) *Example*

استخدم الصيغة الرياضية العامة لقانون بيو - سافار للتعبير عن شدة المجال المغناطيسي الناشئ عن سلك طويل جداً، عند نقطة *(p)* تبعد عنه مسافة *(r)* ويمر خلاله تيار كهربائي ثابت مقداره *(I)*.

والآن لنتأمل الشكل (٣-٧).

الحل *Solution*:

بهدف التعبير رياضياً عن شدة المجال المغناطيسي الناشئ بسبب مرور تيار كهربائي مقداره *(I)* في سلك طويل، وعلى مسافة منه مقدارها *(r)*، يمكننا استخدام قانون العالِمين بيو - سافار، ولكي نتوصل إلى النتيجة المناسبة انظر الشكل (٣-٧).



الشكل (٧-٣) المجال المغناطيسي لتيار كهربائي يمر في سلك طويل جداً

إن النقطة (p) هي النقطة التي نبحث عن شدة المجال المغناطيسي عندها بسبب مرور جزء من التيار في النصف العلوي من السلك، وذلك بحساب التكامل من $(0 - \infty)$ في المعادلة (٨□٣)، وذلك بعد ملائمتها مع التطبيق (٤-٣):

$$d\vec{B} = \left(\frac{\mu_o}{4\pi}\right)\frac{Id\vec{L} \times \vec{r}}{r^3}$$

حيث إن المتجه $(\vec{r})$ يبدأ من العنصر التفاضلي للتيار وينتهي عند النقطة (p)، كما أن حاصل الضرب الاتجاهي $(d\vec{L} \times \vec{r})$ يبين اتجاه المجال المغناطيسي $(d\vec{B})$، والآن:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{IdL \sin\theta}{r^2}$$

ذلك أن:

$$dL \times r = dL\, r \sin\theta$$

وبملاحظة أن السلك يتأثر بالمقدار نفسه من المجال المغناطيسي في نصفية العلوي والسفلي، لذا نلجأ إلى ضرب المعادلة بالعدد اثنين، إذاً:

$$\vec{B} = \int dB = \frac{\mu_0}{2\pi}\int_0^\infty \frac{\sin\theta\ dL}{r^2}$$

وبالرجوع إلى الشكل (٧-٣) نجد أن:

$$sin(\theta) = sin(\pi - \theta) = \frac{R}{\sqrt{L^2 + R^2}}$$

$$r = (L^2 + R^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_o I}{2\pi} \int_o^\infty \frac{R}{L(s^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} ds$$

$$= \frac{\mu_o I}{2\pi R} \left[\frac{L}{(L^2 + R^2)^{\frac{1}{2}}} \right]_o^\infty$$

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi R}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_o I}{2\pi R}$$

والآن، ومرةً أخرى، وبسبب التناظر الكبير لتوزيع التيار الكهربائي فإننا نستطيع استخدام قانون أمبير، لحلقة مغلقة تسمى حلقة أمبير، ففي الحالة التي بين أيدينا، -حالة السلك الطويل- نستطيع استخدام قانون أمبير لإيجاد النتيجة نفسها باستخدام قانون بيو- سافار، وذلك حسب الآتي:

$$\oint \vec{B}.ds = \mu_o I \qquad (٣\square٩)$$

هذه هي الصيغة الرياضية لقانون أمبير ومن الواضح أنَّ، الحلقة المغلقة هي دائرة نصف قطرها (R)، أي أنَّ:

$$\oint \vec{B}.dL = 2\pi R B$$

$$2\pi R B = \mu_o I$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_o I}{2\pi R}$$

وهي ذات النتيجة الأولى التي حصلنا عليها باستخدام الصيغة العامة لقانون بيو - سافار.

كما يمكننا معالجة هذه المسألة دون اعتماد النصف العلوي $(0 - \infty)$ أو النصف السفلي $(\infty - 0)$، وذلك بإجراء التكامل مرة واحدة من بداية السلك إلى نهايته $(-\infty, +\infty)$ وذلك على النحو الآتي:

$$B=\int_{-\infty}^{+\infty} dB=\frac{\mu_o I}{4\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{dL\sin\theta}{r^2}$$

$$\tan\theta=\frac{R}{L},\ L=R\tan\theta$$

$$\sin\theta=\frac{R}{r},r=\frac{R}{\sin\theta}$$

$$B=\frac{\mu_o I}{4\pi}\int\frac{R\,d\theta}{\sin^2\theta}\frac{\sin\theta}{\left(\frac{R^2}{\sin^2\theta}\right)}=\frac{\mu_o I}{4\pi}\int\frac{-R\sin^3\theta\,d\theta}{\sin^2\theta R^2}$$

$$=\frac{-\mu_o I}{4\pi}\int_{\pi}^{o}\sin^2\theta\,d\theta=\frac{-\mu_o I}{4\pi}\left[-\cos\theta\right]_{\pi}^{o}$$

$$B=\frac{\mu_o I}{2\pi R}$$

ملاحظة: عندما تتغير (dL) من $(-\infty - \infty)$ فإن الزاوية تتغير من $(\pi$ - ٠$)$.

إن العلاقة الرياضية (٩□٣)، هي ما نسميه قانون أمبير، ويمكننا استخدامه لحساب المجال المغناطيسي عندما نتأكد أنّ التناظر الإحصائي الهندسي لتوزيع التيار الكهربائي متحقق، وسنكتفي ببيان نتيجة التطبيق التالي.

تطبيق (٥-٣) Example

استخدم قانون أمبير للتعبير عن شدة المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي ثابت (I) في عروة دائرية نصف قطرها (r).

الحل Solution:

إن الصيغة العامة لقانون أمبير هي:

$$\oint \vec{B}.d\vec{L}=\mu_o I$$

حيث يشير الطرف الأيمن إلى إيجاد التكامل حول مسار مغلق، وهو في هذه الحالة عبارة عن عروة أو حلقة دائرية، نصف قطرها (r)، إذن:

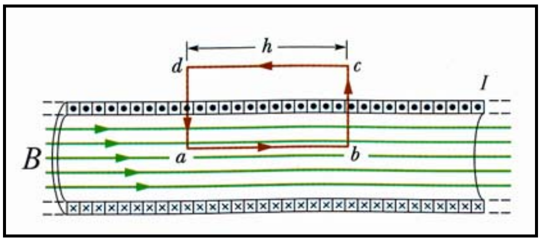
$$\oint dL=2\pi r$$

$$B(2\pi r)=\mu_o I$$

(١٠-٣) (المجال B لعروة دائرية) $\boxed{B = \dfrac{\mu_o I}{2\pi r}}$

٣-٥ المجال المغناطيسي لملف حلزوني *The Magnetic Field of Solenoid*:

تأمل الشكل (٨-٣) حيث تلاحظ أن الملف الحلزوني هو عبارة عن ملف إسطواني طويل يحتوي على عدد (n) من اللفات لوحدة الطول، يمر خلاله تيار ثابت مقداره (I)، ونلاحظ في هذه الحالة أن الموصل تنطبق عليه شرط التماثل الهندسي لاستخدام قانون أمبير.



الشكل (٨-٣)

وبهدف حساب المجال المغناطيسي $(\vec{B})$ نأخذ مقطعاً طولياً لملف حلزوني نموذجي حيث تكون لفاته محكمة وملتصقة ببعضها البعض، إن حلقة أمبير المغلقة في هذه الحالة هي عبارة عن المستطيل $(abcd)$ ويمثل التيار (I_o) المقدار الذي يمر خلال حلقة أمبير. والآن يمكننا استخدام قانون أمبير على الأجزاء الأربعة من هذه الحلقة.

$$\oint \vec{B}.dL = \int_a^b \vec{B}.dL + \int_b^c \vec{B}.dL + \int_c^d \vec{B}.dL + \int_d^a \vec{B}.dL$$

حيث إن $(\vec{B})$ عمودي على كل من (bc) و(da)، وهكذا نجد أن الزاوية بينهما (٩٠°) ومعلوم أنَّ $(\cos\ ٩٠)$ يساوي الصفر، وهكذا لا وجود للمجال المغناطيسي على هاتين القطعتين $(B\ =\ ٠)$، أما القطعتين (ab) و(cd) فإن الزاوية بينهما وبين المجال $(\vec{B})$ تساوي الصفر، وهذا يؤدي إلى أن:

$$\int_a^b \vec{B}.dL = \int_0^d \vec{B}.dL = \vec{B}\,h$$

حيث (h) هو طول كلٍ من المسار (ab) و(cd)، وكنا قد بينا أن عدد اللفات لوحدة الطول في الملف هو (n)، نستطيع الآن أن نعبر عن التيار الكلي خلال حلقة أمبير بالشكل الآتي:

$$I_o = I(nh)$$
$$\oint \vec{B}.dL = \vec{B}\,h = \mu_o\, I\, n\, h$$

$$\vec{B} = \mu_o I n \qquad (٣□١١)$$

إنَّ العلاقة الرياضية (١١□٣) تعبِّر عن شدة المجال المغناطيسي لملف حلزوني *idial solenoid* نموذجي. أما المجال المغناطيسي لملف حلقي *toroid* يحمل تياراً مقداره *(I)* وعدد لفاته الكلية *(N)* فإن المجال المغناطيسي الناشئ داخله هو:

$$\vec{B}(2\pi r) = \mu_o I N$$

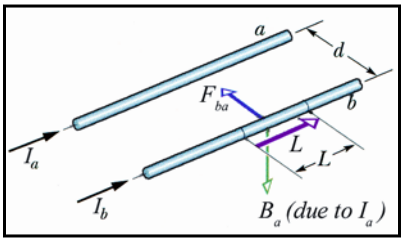
(شدة المجال B لملف حلزوني) (٣□١٢)

$$\boxed{B = \frac{\mu_o I N}{2\pi r}}$$

إنَّ العلاقة الرياضية (١٢□٣) تعبِّر عن شدة المجال المغناطيسي لملف دائري، نصف قطره *(r)*، وهو نصف قطر حلقة أمبير.

٣-٦ القوة المتبادلة بين سلكين طويلين جداً *Interacting force-two parallel currents*:

إن الغاية من دراسة هذه الفقرة هي تحديد مقدار واتجاه القوة المغناطيسية المتبادلة بين سلكين طويلين جداً، متوازيين، تفصلهما عن بعضهما مسافة *(d)*، يسري خلالهما تياران (I_a) و(I_b)، ولهذه الغاية تأمل الشكل (٩-٣).



الشكل (٩-٣)

إن تحقيق هذه الغاية يتم من خلال إيجاد المجال المغناطيسي الذي يؤثر به السلك الثاني على السلك الأول، ثم تحديد القوة الناتجة عن ذلك.

وسنبدأ بالبحث عن القوة الناشئة عن السلك *(b)* بسبب المجال المغناطيسي (B_a)، إنَّ المجال المغناطيسي (B_a) المؤثر على كل نقطة من السلك *(b)* هو:

$$B_a = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi d} \qquad (٣□١٣)$$

ويمكننا تحديد اتجاهه باستخدام قاعدة اليد اليمنى، انظر الشكل (٩-٣)، والآن يمكننا إيجاد القوة المغناطيسية (F_{ba}) المؤثرة على السلك (b)، وذلك باستخدام العلاقة الرياضية (٣□٥)، حيث:

$$F_{ba} = I_b\, L \times B_a \qquad (٣□١٤)$$

ونلاحظ من الشكل (٩-٣) أنّ كلاً من (L) و (B_a) متعامدان، والآن من العلاقتين الرياضيتين (١٣□٣) و(١٤□٣) نجد أنَّ:

$$F_{ba} = I_b\, L\, B_a \sin\, 90^{\circ} = \frac{\mu_0\, L\, I_a\, I_b}{2\pi\, d}$$

$$\boxed{F_{ba} = \frac{\mu_o I_a I_b L}{2\pi\, d}} \qquad \text{(القوة المتبادلة بين سلكين)} \quad (٣□١٥)$$

أما اتجاه القوة (F_{ba}) فيمكننا معرفته بمعرفة حاصل الضرب الاتجاهي للمتجهين $(L \times B_a)$، وباستخدام قاعدة اليد اليمنى نجد أنّ (F_{ba}) تتجه مباشرة إلى السلك (a).

أما القوة التي تؤثر على السلك (a) فيمكننا إيجادها بالطريقة الأولى نفسها، وسنجد أن اتجاهها نحو السلك (b)، وهكذا، فإنَّ السلكين المتوازيين يجذبان بعضهما البعض، أما إذا كان التياران باتجاهين مختلفين فإن السلكين المتوازيين سوف يتنافران، وعليه يمكننا أن نستنتج ما يلي:

التياران المتوازيان (على الاتجاه نفسه) يجذبان بعضهما البعض، أما التياران غير المتوازيين (باتجاهين مختلفين) فإنهما يتنافران.

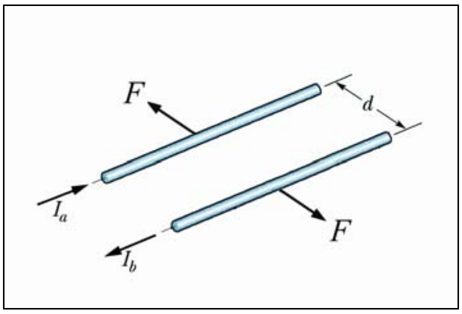
تطبيق (٣-٣) *Example*

في الشكل (١٠-٣) تلاحظ سلكين طويلين متوازيين تفصلهما عن بعضهما مسافة ثابتة (d) يحملان تيارين كهربائيين على التوالي (I_a , I_b) باتجاهين متعاكسين، حيث إن:

$$d = 5.3\, cm, I_b = 32\, A, I_a = 15\, A$$

أوجد حسابياً مقدار القوة المغناطيسية بين السلكين، وحدد اتجاهها، وذلك على امتداد جزء من طولهما يساوي $(٤٠\ m)$.

الحل *Solution:*



الشكل (٣-١٠) يوضح قوة التناظر بين سلكين طويلين جداً

تأمل الشكل (٣-١٠).

باستخدام العلاقة الرياضية (٣-١٥)، نجد أنَّ:

$$I_a = 15\,A, \quad , \quad I_b = 32\,A$$
$$d = 5.3\,cm \quad , \quad L = 40\,m$$
$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}\ T.m$$
$$F_{ab} = \frac{\mu_o\, I_a\, I_B\, L}{2\pi\, d}$$
$$= \frac{(4\pi \times 10^{-7})(15)(32)(40)}{2\pi(5.3 \times 10^{-2})}$$
$$= 7.24 \times 10^{-2}\ N$$

أما اتجاهها فهو عمودي على اتجاه السلكين، مشيراً نحو الخارج، ذلك أنها قوة تنافر.

الخلاصة
Summary

- المجال المغناطيسي *magnetic field* ينشأ بفعل الشحنات الكهربائية المتحركة، وهو الحيِّز أو المنطقة التي تظهر فيها القوة المغناطيسية التي يمكننا اختبارها بواسطة القطب الشمالي لمغناطيس، وتقاس شدة المجال المغناطيسي بوحدة التسلا، وهي وحدة القياس المعتمدة في النظام الدولي للقياس *(SI)*، وعندما تكون الزاوية بين المجال وسرعة انجراف الشحنات الكهربائية (٩٠ ْ) فإن المجال:

$$B = \frac{F_B}{qv}$$

$$1T = \frac{1\,N}{1C\left(\frac{1\,m}{1\,s}\right)} = \frac{1\,N}{1\,A.1\,m}$$

- القوة المغناطيسية المؤثرة على سلك طوله (L) يمر به تيار كهربائي ثابت (I) ويخضع لتأثير مجال مغناطيسي مقداره (B) تساوي:

$$F_B = I\,\vec{L} \times \vec{B}$$

- قانون بيو-سافار *Biot's-Savart law*:

$$dB = \frac{\mu_o I}{4\pi} \frac{d\vec{L} \times \vec{r}}{r^3}$$

يستخدم هذا القانون لإيجاد المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في ناقل مستقيم، عند نقطة معلومة، وهو يتناسب طرداً مع شدة التيار الكهربائي (I) وعكسياً مع المسافة بين النقطة المعلومة والناقل.

- قانون أمبير *Amper's law*:

$$\oint \vec{B}.d\vec{L} = \mu_o I$$

ويستخدم في حالة التناظر الهندسي للتيار الكهربائي، وذلك باختبار حلقة مغلقة لمرور التيار تسمى حلقة أمبير *Amperian Loop*، ومن الاستنتاجات المباشرة لهذا القانون:

١- المجال المغناطيسي الناشئ عن عروة دائرية نصف قطرها (r):

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi r}$$

٢- المجال المغناطيسي لملف حلزوني:

$$B = \mu_o I n$$

حيث (n) عدد اللفات لوحدة الطول.

٣- المجال المغناطيسي لملف حلقي:

$$B = \frac{\mu_o I N}{2\pi r}$$

حيث (N) العدد الكلي للفات، (r) نصف قطر اللفة الواحدة.

- القوة المغناطيسية المتبادلة بين سلكين طويلين جداً:

$$F_{ba} = \frac{\mu_o I_a I_b L}{2\pi d}$$

حيث (L) طول السلك، (I_a) التيار المار خلال السلك الأول، (I_b) التيار المار خلال السلك الثاني، (d) المسافة الفاصلة بين السلكين.

الامتحانات الذاتية

Self Test Exam

ولغرض التدريب العملي على اختبار الطالب لنفسه، والتأكد من جدارته في المقدرة الفعلية على فهم واستيعاب المجال المغناطيسي، تم تخصيص **الامتحان الذاتي الأول**.

الامتحان الذاتي الاول:

في ذرة الهيدروجين، إذا افترضنا أن الإلكترون يتحرك على مسار دائري نصف قطره $(5.3\times10^{-11}\ m)$ ويسير بسرعة خطية منتظمة $(v = 1.3\times10^{6}\ m/s)$. أوجد حسابياً شدة المجال المغناطيسي الناتج عن حركة الإلكترون، وذلك عند مركز الذرة.

ملاحظة: كتلة الإلكترون $(m_e = 9.11\times10^{-31}\ kg)$، وشحنته $(q = 1.6\times10^{-19}\ c)$.

ملاحظة: نتمنى على أبنائنا الطلبة المحاولة الجادة في حل مسائل الامتحان الذاتي على ورقة خارجية، ثم إجراء المقارنة بين ما توصلوا إليه مع الحل النموذجي المرفق آخر الكتاب في الملحق (د).

مسائل وتمارين الوحدة الثالثة

Unit ThreeExercises & Problems

٣-١ بروتون يتحرك بزاوية قدرها (□٢٣) بالنسبة لمجال مغناطيسي شدته $(2.6\,mT)$ ويعاني من تأثير قوة مغناطيسية قدرها $(6.5\times10^{-17}\,N)$.

١- أوجد حسابياً سرعة البروتون.

٢- أوجد حسابياً الطاقة الحركية للبروتون مقدرة بوحدات (eV).

٣-٢ سلك موصل يمر خلاله تيار كهربائي تبلغ شدته $(4.4\,A)$، يتعرض لتأثير مجال مغناطيسي منتظم وعمودي عليه، مقدار شدته $(1.5T)$، أوجد حسابياً القوة المغناطيسية لكل وحدة طول من هذا السلك.

٣-٣ ملف حلزوني *solenoid* طوله $(95\,cm)$ ونصف قطره $(2\,cm)$، وعدد لفاته (١٢٠٠) لفة يحمل تياراً قدره (٣.٣ A). أوجد مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف.

٣-٤ ملف حلزوني عدد لفاته (٢٠٠) لفة، وطوله $(25\,cm)$ وقطره $(10\,cm)$، ويحمل تياراً قدره $(0.3\,A)$. أوجد مقدار المجال المغناطيسي قرب مركزه.

٣-٥ ملف حلزوني طوله $(13\,cm)$ وقطره $(2.6\,cm)$ يحمل تياراً قدره $(18\,A)$. مقدار المجال المغناطيسي بداخله يساوي $(23\,mT)$. أوجد طول السلك الذي صنع منه الملف.

٣-٣ ملف حلقي دائري *toriod* مساحة مقطعه على شكل مربع طول ضلعه $(5\,cm)$، ونصف قطره الداخلي $(1.5\,cm)$، أما عدد لفاته فيساوي (٥٠٠) لفة ويحمل تياراً قدره $(0.8\,A)$.

١- أوجد مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف عند قطره الداخلي.

٢- أوجد مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف عند قطره الخارجي.

٣-٧ سلكين مصنوعين من مادة موصلة، طويلين متوازيين تفصلهما عن بعضهما مسافة $(12\times10^{-2}\,m)$ ، ويسري في كلٍ منهما تيار كهربائي مقداره $(40\,A)$ ، أوجد حسابياً القوة المغناطيسية المتبادلة بينهما، ثم حدد اتجاهها.

مسائل اختيارية

Optional Problems

٣-١ إلكترون يمتلك متجه السرعة الممثل كالآتي:

$$\vec{v} = (2\times10^{6}\ m/s)i + (3\times10^{6}\ m/s)j$$

يتحرك خلال مجال مغناطيسي يمثل المتجه

$$\vec{B} = (0.03T)i - (0.15T)j$$

١- أوجد مقدار واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على الإلكترون.

٢- أعد المطلوب (١) نفسه على بروتون يمتلك السرعة نفسها.

٣-٢ إلكترون يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم بسرعة اتجاهية:

$$\vec{v} = (40\,km/s)i + (35\,km/s)j$$

ويعاني من تأثير قوة اتجاهية:

$$\vec{F} = -(4.2\times10^{-15}N)i + (4.8\times10^{-15}N)j$$

الملحق (أ) *Appendix*

الثوابت الفيزيائية *Physical Constants*

المقدار	الرمز	الثابت	
$-273.15\ ^{\circ}C$	$0\,K$	*absolute zero temperature*	درجة حرارة الصفر المطلق
$9.801\ m/s^2$		*acceleration due to gravity at sea level (Washington d. c.)*	ثابت تسارع الجاذبية الأرضية عند مستوى سطح البحر لمدينة واشنطن
6.022×10^{23} particles / mole	N_O	*Avogadro's number*	عدد أفوغادرو
$-1.6022\times10^{-19}\ C$	e	*charge of an electron*	شحنة الإلكترون
$8.988\times10^{9}\ N.m^2/kg^2$	K	*constant in Coulomb's*	ثابت كولوم
$6.673\times10^{-11}\ N.m^2/kg^2$	G	*gravitational constant*	ثابت الجذب العام
$9.109\times10^{-31}\ kg$	m_e	*mass of an electron*	كتلة الإلكترون
$1.673\times10^{-27}\ kg$	m_p	*mass of a proton*	كتلة البروتون
$6.626\times10^{-34}\ J/Hz$ $4.136\times10^{-15}\ eV.s$	h	*Planck's constant*	ثابت بلانك
$2.99792458\times10^{8}\ m/s(exact)$	c	*speed of light in a vacuum*	سرعة الضوء
$1.67492\times10^{-27}\ kg$	m_n	*mass of neutron*	كتلة النيوترون
$8.85\times10^{-12}\ F/m$	ε_o	*permittivity of space*	معامل سماحية الفراغ
$4\pi\times10^{-7}\ T.m/A$	μ_o	*permeability constant*	معامل نفاذية الفراغ

عوامل تحويل *Conversion Factors*

$1.661\times10^{-27}\ kg = 931.5\ MeV/c^2$	=	١ وحدة الكتلة الذرية *atomic mass unit*
$1.602\times10^{-19}\ J$	=	١ إلكترون فولت *electronvolt*
$1\ N.m$	=	١ جول *Joule*
$1\ V.C$	=	١ جول *Joule*
$6.242\times10^{18}\times(\text{elementary charge units})$	=	١ كولوم *coulomb*

الملحق (ب) *Appendix*

الإشارات الرياضية *Mathematical Signs*:

$=$ يساوي	$>$ أكبر من	$\leq$ أصغر من أو يساوي
$\neq$ لا يساوي	$\geq$ أكبر من أو يساوي	$\ll$ أصغر بكثير من
$\cong$ يساوي تقريباً	$\gg$ أكبر بكثير من	$\approx$ متناسب مع
$\equiv$ متطابق مع؛ يعرَّف بأنه	$<$ أصغر من	

حساب قوى الأساس ١٠ *Arithmatic Power of*:

$$10^a \; 10^b = 10^{a+b}$$
$$10^a / 10^b = 10^{a-b}$$
$$\left(10^a\right)^b = 10^{ab}$$

الجبر *Algebra*:

- الكسور *Fractions*:

$$\frac{\left(\frac{b}{c}\right)}{d} = \frac{b}{cd} \qquad a\left(\frac{b}{c}\right) = \frac{ab}{c}$$

$$\frac{\left(\frac{a}{b}\right)}{\left(\frac{c}{d}\right)} = \frac{ad}{bc} \qquad \left(\frac{a}{b}\right)\left(\frac{c}{d}\right) = \frac{ac}{bd}$$

$$\frac{a}{b} + \frac{c}{d} = \frac{ad+bc}{bd}$$

- جذرا المعادلة التربيعية:

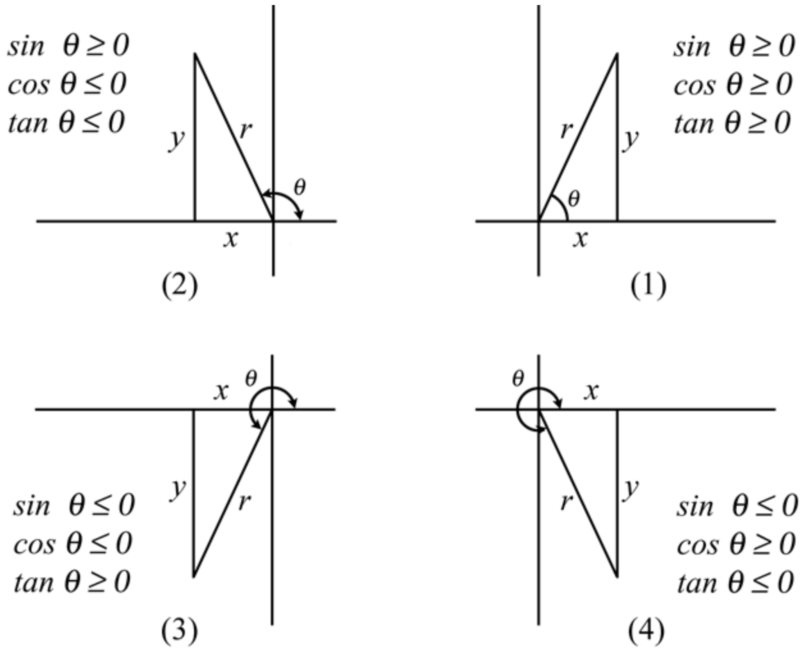
إذا كانت $ax^2 + bx + c = 0$ ، فإنَّ $x = \dfrac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$.

وإذا كانت $x^2 + 2\beta x + \gamma = 0$ ، فإنَّ $x = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \gamma}$.

المثلثات *Trigonometry* :

- **تعاريف الدوال المثلثية *Definitions of trigonometnc Functions*:**

الـدّوالّ العكسـية *inverse functions*: إذا كانـت (جـا θ) $u = \sin\theta$ ، فـإنَّ (قـو جـا u) $\theta = arc \sin u$ ، وتُكتـب أحيانـاً (جـا$^{-1}$ u) $\theta = \sin^{-1} u$. ويُرمـز بالمثـل إلى الـدّوالّ العكسـية الأخـرى: $arc \cos u$ ، $arc \tan u$ وهلم جراً.



$$\sin\theta = \frac{y}{r} \qquad \csc\theta = \frac{1}{\sin\theta} = \frac{r}{y}$$

$$\cos\theta = \frac{x}{r} \qquad \sec\theta = \frac{1}{\cos\theta} = \frac{r}{x}$$

$$\tan\theta = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \frac{y}{x} \qquad ctn\,\theta = \frac{1}{\tan\theta} = \frac{x}{y}$$

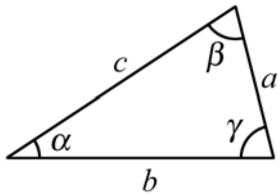
- **خواص بسيطة *Simple Properties*:**

$$sin(-\theta) = -sin\theta \qquad cos(-\theta) = cos\theta \qquad tan(-\theta) = -tan\theta$$

$$sin\left(\theta \pm \frac{\pi}{2}\right) = \pm cos\theta \qquad cos\left(\theta \pm \frac{\pi}{2}\right) = \mp sin\theta \qquad tan\left(\theta \pm \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{1}{tan\theta} = -ctn\theta$$

$$sin(\theta \pm \pi) = -sin\theta \qquad cos(\theta \pm \pi) = -cos\theta \qquad tan(\theta \pm \pi) = tan\theta$$

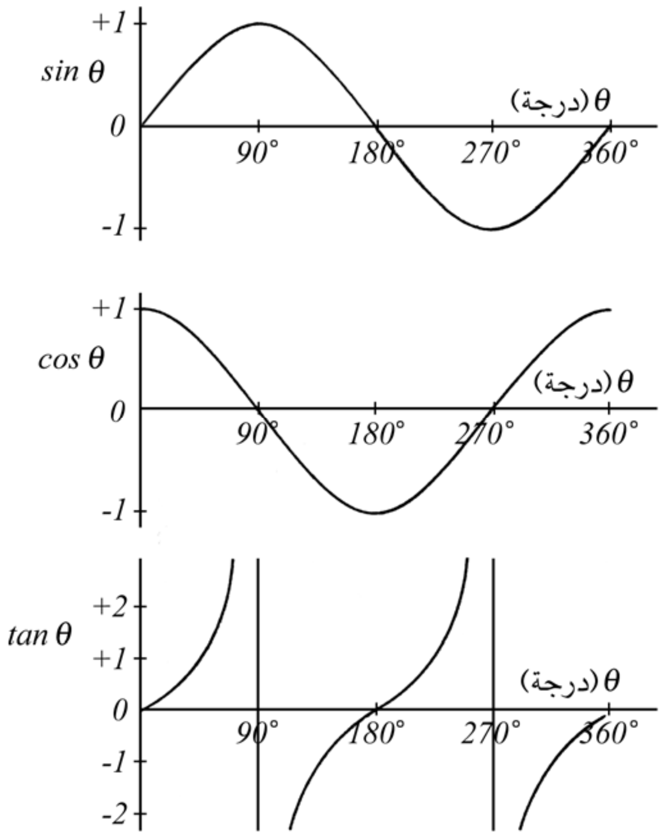
- خواص مثلث ***Properties of a triangle***:



$$\alpha + \beta + \gamma = \pi$$
$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\ cos\ \alpha$$
$$b^2 = c^2 + a^2 - 2ca\ cos\ \beta$$
$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\ cos\gamma$$
$$\frac{a}{sin\alpha} = \frac{b}{sin\beta} = \frac{c}{sin\gamma}$$

لمثلث قائم $\left(\gamma = \dfrac{\pi}{2}\right)$: $a^2 + b^2 = c^2$

- الدوال المثلثية ***Trigonometric functions***:



وقد أصبح من السهل على الطالب حساب هذه النسب المثلثية باستخدام الحاسبة اليدوية البسيطة.

وترتبط النسب المثلثية بالربع الثاني بالعلاقات الآتية:

$$\sin(\pi-\theta)=\sin\theta$$
$$\cos(\pi-\theta)=-\cos\theta$$
$$\tan(\pi-\theta)=-\tan\theta$$

أما بالنسبة للربع الثالث فترتبط بالعلاقات الآتية:

$$\sin(\pi+\theta)=-\sin\theta$$
$$\cos(\pi+\theta)=-\cos\theta$$
$$\tan(\pi+\theta)=\tan\theta$$

وأخيراً في الربع الرابع فإنها ترتبط بالعلاقات الآتية:

$$\sin(-\theta)=-\sin\theta$$
$$\cos(-\theta)=\cos\theta$$
$$\tan(-\theta)=-\tan\theta$$

هذا ، وتُعرَّف دوالّ مثلثية أخرى بالعلاقات الآتية:

$$csc\theta = \frac{1}{sin\theta} \qquad sec\theta = \frac{1}{cos\theta} \qquad ctn\theta = \frac{1}{tan\theta}$$

المحتويات

Contents

المراجع

References

المراجع العربية *Arabic References*:

١- "مبادئ الفيزياء"

للكليات والمعاهد التربوية والهندسية، ج١-٢، دار الراتب، ١٩٩١م.

٢- "تطبيقات عملية في الإلكترونيات والكهرباء"

جامعة الموصل - كرجية، الراوي، عبدالحميد، ١٩٨٥م.

٣- "أسس الهندسة الإلكترونية"

جامعة الموصل - د. عادل خضر حسين، ١٩٨١م.

٤- "أساسيات الفيزياء"

دار ماجروهيل، ف. بوش، ١٩٧٧م.

٥- "الليزرات"

جامعة الموصل، فاروق عبودي قصير، ١٩٨٤م.

٦- "دراسات في تاريخ العلوم عند العرب"

جامعة الموصل، حكمت نجيب عبدالرحمن، ١٩٧٧م.

٧- "الفيزياء الكلاسيكية والحديثة"

كينيث وفورد، ج١-٢-٣، المطبعة الوطنية، عمان - الأردن، ١٩٨١م.

٨- "المعجم الموحد"

للمصطلحات العلمية في مراحل التعليم العام - معجم مصطلحات الفيزياء، المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، المملكة العربية السعودية، وزارة المعارف، ١٩٨٣م.

٩- "معجم المصطلحات العلمية والفنية والهندسية"

أحمد شفيق الخطيب، مؤسسة جواد للطباعة، بيروت - لبنان، ١٩٨٢.

المراجع الإنكليزية *English References*:

١- *"Fundamentals of physics"*

Halliday. Resniek. Walker. Fourth EditionK John Willey & sons. ١٩٩٧.

٢- *"College Physics"*

Francis Weston Sears. Addison - Wesely. ١٩٨٤.

٣- *"Electric Devices and Circuits"*

Millman & Halkias. Mc Graw - Hill. ١٩٦٧.

٤- *"Electronics"*

Millman & seely. Mc Graw - Hill. ١٩٥١.

٥- *"Menill Physics Principles And Problems"*

Third Edition, Mc Graw-Hill, ١٩٩٥.

٦- *"Electronic Devices and Circuits"*

Millman & Halkias, Mc Graw-Hill, ١٩٩٧.