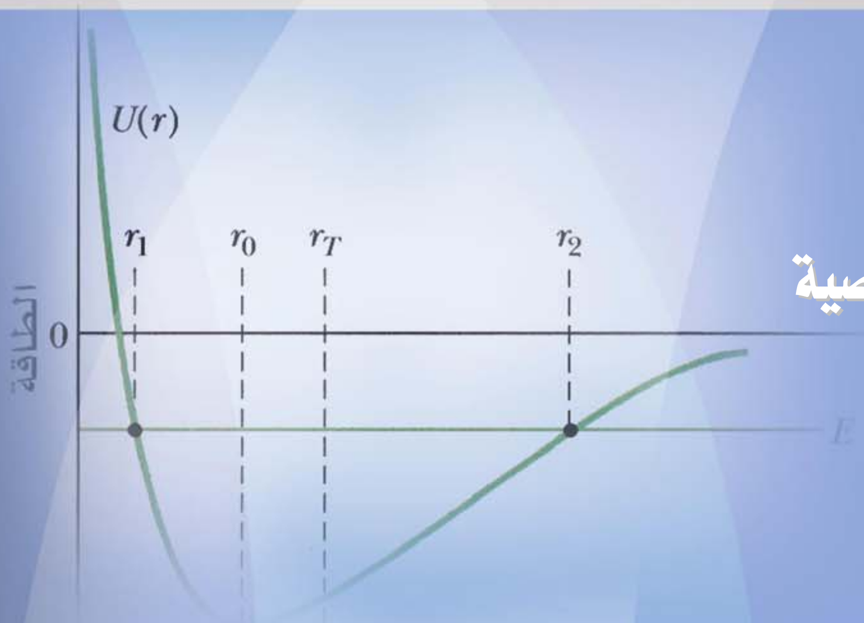
المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني
الادارة العامة لتصميم وتطوير المناهج



الفيزياء النظرية التخصصية

الميكانيكا

١١٦ 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: ﴿سُبْحَٰنَ ٱلَّذِى سَخَّرَ لَنَا هَٰذَا وَمَا كُنَّا لَهُۥ مُقْرِنِينَ ﴿١٣﴾﴾ [الزخرف: ١٣]، ﴿رَبَّنَا مَا خَلَقْتَ هَٰذَا بَٰطِلًا سُبْحَٰنَكَ فَقِنَا عَذَابَ ٱلنَّارِ ﴿١٩١﴾﴾ [آل عمران: ١٩١]، وصلى الله وسلَّم 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 ثلاث وحدات دراسية، وهي: القياسات في الفيزياء، التيار الكهربائي والدائرة الكهربائية، المجال المغناطيسي، وهذه الوحدات تغطي مقرَّر الفيزياء التخصصية لكل من التخصصات الآتية:

١- تقنية إنتاج.
٢- تقنية مختبرات.
٣- تقنية التصنيع الغذائي.

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

القياسات في الفيزياء

القياسات في الفيزياء

١

الوحدة الأولى

القياسات في الفيزياء

Physical Measurements

١-١ المقدمة *Introduction*:

إن التعبير عن الكميات في علم الفيزياء لابد أن يكون من خلال الأرقام والوحدات المناسبة وهو ما يكفي لوصفها وصفاً صحيحاً. كما أنَّ علم الفيزياء لم يكن ليصل إلى ما وصل إليه من دور ريادي في تحقيق الإنجازات العلمية والتقنية لو لم يكن علماً دقيقاً، ذلك أن جميع مسائله النظرية والعملية تحتم علينا التعامل مع كميات مُقاسة، ويتم التعبير عنها بدلالة رقم ووحدة قياس مناسبة، متفقٌ عليها ومتوافقة مع الكمية المطلوب قياسها. وهذا ما يقودنا بالضرورة إلى دراسة مسألتين هامتين وهما:

١- الوحدات (وحدات قياس الكميات البُعدية) *measurement units of dimensional quantities*.

٢- الأبعاد (أو الأسس الرياضية لوحدات القياس) *units dimensions*.

وهاتين المسألتين هما مضمون هذه الوحدة التعليمية، إذ أننا سنقدم من خلالها تعريفاً علمياً لمجمل وحدات القياس المتداولة، وسنوضِّح مفهومها بُعدياً، ونبيّن بعد ذلك ضرورة التوافق بين وحدات القياس وأبعادها، وفوائد كل ذلك في الاستخدامات التطبيقية والنظرية.

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) في نهاية الكتاب، بعد ذلك كله نتوقع أن يكون الطالب قادراً على:

١- أن يقرر بنفسه أهمية القياسات في حياتنا العلمية المعاصرة.

٢- أن يتابع نشوء هذا العلم وتطوره وأن يتنبه إلى الفوائد التي جناها الإنسان من هذا العلم الهام، ولاسيما في دقة ضبط القياس.

٣- أن يربط بين علم القياس وحكمة الله سبحانه وتعالى في تسخير مخلوقات هذا الكون لخدمة الإنسان، باعتبارها مصدر الإلهام الإلهي للإنسان في هذا المجال وغيره من المجالات الأخرى.

٤- أن يعلم بأن النظام الدولي للقياس هو لغة عالمية واحدة يفهمها الجميع، وله دوره الأساسي في صياغة العلاقات المعبرة عن القوانين الفيزيائية.

٥- أن يجرب بنفسه عملية الربط والتوافق بين وحدات القياس وأبعادها.

٦- أن يميّز بين الكميات الأساسية في النظام الدولي للقياس والكميات المركبة، كي يستفيد منها

في دراسته العملية والنظرية.

١-٢ وحدات القياس *Measurement Units*:

عند تناول موضوع وحدات القياس وهو -بلا شك- موضوع أساسي في العلوم النظرية والتطبيقية، لا بد من التأكيد على أن الوحدات الثلاثة الأساسية: المتر، الكيلوغرام، الثانية، هي وحدات قياس الكميات الثلاثة الأساسية الطول، الكتلة، الزمن، والمتداولة في دراسة علم الميكانيكا، قد تمَّ زيادتها لاستكمال وحدات النظام الدولي للقياس ليكون شاملاً لباقي الفروع العلمية كالكهرباء والديناميكا الحرارية وغيرها، وذلك بإضافة أربع كميات أساسية أخرى وهي: الكلفن، الأمبير، الشمعة، المول، وهي وحدات قياس الكميات الأربع الأساسية الأخرى، درجة الحرارة، التيار الكهربائي، شدة الإضاءة، كمية المادة، ثم تلا ذلك إضافة الراديان كوحدة لقياس الزاوية المستوية والستراديان كوحدة لقياس الزاوية المجسمة ولكل من هده الكميات الأساسية تعريفه الخاص المتفق عليه وفقا لما قرره المكتب الدولي للمقاييس والموازين ، وهي مبثوثة في كثير من المراجع العلمية. إن هذا النظام هو النظام الدولي للقياس *International System*، واختصاراً *(SI)* وذلك عن التعبير الفرنسي *System International*.

والجدول (١-١) يوضِّح وحدات قياس الكميات التسعة الأساسية للنظام بكامله، ونقول هنا: أساسية؛ ذلك لأن جميع وحدات القياس الأخرى تُشتق بواسطتها[1]، أو بعبارة أخرى تدخل في تكوين غالبية الوحدات الأخرى.

(١) انظر الجدول (٦-١) في الفقرة (٤-١) من هذه الوحدة، ولاحظ أنّ الكميات الأساسية دخلت في تكوين الوحدات المشتقة الأخرى.

الكمية	Quantity	الوحدة	(SI) Unit	الرمز	Symbol
الطول	*length*	المتر	*meter*	م	*m*
الكتلة	*mass*	الكيلوغرام	*kilogram*	كج	*kg*
الزمن	*time*	الثانية	*second*	ث	*s*
درجة الحرارة	*thermodynamics temperature*	الكلفن	*kelvin*	ك	*K*
شدة التيار	*electric current*	الأمبير	*ampere*	أمبير	*A*
قوة الإضاءة	*luminous*	الكانديلا	*candela*	الشمعة	*cd*
كمية المادة	*amount of substance*	المول	*mole*	مول	*mol*
الزاوية المستوية	*plane angle*	راديان	*radian*	راد	*rad*
الزاوية المجسمة	*solid angle*	ستراديان	*steradian*	ستي راد	*sr.*

الجدول (١-١) يبين وحدات قياس الكميات الأساسية للنظام الدولي[١]

وقد شاع استخدام ثلاثة أنظمة معيارية في مجال القياسات وهي:

١-٢-١ النظام المتري *The Metric System*:

تقاس الكميات الثلاثة الأساسية في هذا النظام، الطول بالمتر والكتلة بالكليوغرام والزمن بالثانية، وهو البداية الأولية التي تطور منها النظام المذكور في الجدول (١-١)، ويعرف هذا النظام بنظام *(MKS system)* وهي الأحرف الثلاثة الأولى من أسماء وحدات القياس الثلاثة باللغة الإنكليزية *(Meter, Kilogram, Second)* تضاف إليها وحدة قياس درجة الحرارة المعروفة بالكلفن *Kelvin*، ويشار إليها اختصاراً *(K)*.

١-٢-٢ النظام الكاوسي *The Gaussian system (CGS)*:

تقاس الكميات الثلاثة الأساسية في هذا النظام، الطول بالسنتيمتر والكتلة بالغرام والزمن بالثانية، ومن الواضح أنه يُستخدم مع الكميات الصغيرة مقارنة بنظام *(MKS)*، ذلك أن السنتيمتر هو جزء من مئة من المتر والغرام هو جزء من ألف من الكيلوغرام.

---

(١) هناك أسماء ورموز لمعظم وحدات القياس المركبة المتداولة علمياً والمتعارف عليها دولياً. انظر الجدول (١-٦).

ينسب هذا النظام إلى العالم *Gauss*، أما *(CGS system)* فهي الأحرف الثلاثة الأولى من أسماء وحدات القياس المستخدمة في هذا النظام باللغة الإنكليزية *(Centimeter, Gram, Second)* وتقاس درجة الحرارة في هذا النظام أيضاً بالكلفن *(K)* مثله في ذلك مثل النظام المتري.

١-٢-٣ النظام البريطاني *The British System (FPS)*:

تقاس الكميات الثلاثة الأساسية في هذا النظام: الطول بالقدم، والكتلة بالباوند، والزمن بالثانية، ويعرف هذا النظام بنظام *(FPS System)* وهي الأحرف الثلاثة الأولى من أسماء وحدات القياس الثلاثة باللغة الإنكليزية *(Foot, Pound, Second)*، وتقاس درجة الحرارة في هذا النظام بالفهرنهايت *Fahrenheit*.

ومن الجدير بالذكر هنا أن أهمية كلا النظامين الثاني والثالث بدأت تتلاشى تدريجياً مع ازدياد الاهتمام بالنظام الدولي للقياس. كما أن العلاقة التي سبق ذكرها عن النظامين *(MKS)* و*(CGS)* تنعكس على طبيعة القوانين الرياضية التي تصف مجموعة القوانين الفيزيائية وذلك حسب نوع النظام المعتمد أثناء اشتقاق تلك القوانين الرياضية. ولاسيما عند حساب الثوابت الخاصة بها.

ملاحظة هامَة: إن جميع الوحدات التابعة للنظام الدول سواء أكانت أساسية أم مشتقة لها أجزاء ومضاعفات دون تمييز، فنقول على سبيل التطبيق ملي غرام وملي أمبير وملي ثانية وهو نفس المقدار، ذلك ان معنى الملي هو واحد من ألف باللغة العربية. كما أننا نقول كيلو متر وكيلو وات وكيلو أمبير وهو كذلك نفس المقدار أي أن معنى كيلو هو ألف باللغة العربية. انظر الجدول(٢- ١).

وأخيراً لابد من الإشارة إلى أن بعض الكميات الفيزيائية ليس لها وحدات قياس ويُكتفى للتعبير عنها بذكر عدد مجرد غير متبوع بوحدة كالسماحية النسبية (ε_r) أو الوزن النوعي، وذلك لأنها عبارة عن النسبة بين كميتين فيزيائيتين من النوع نفسه.

Symbol الرمز	Prefix البادئة	Factor معامل الضرب	Symbol الرمز	Prefix البادئة	Factor معامل الضرب
y	yocto يُوكتا	$١٠^{-٢٤}$	Y	yotta- يُوتا	$١٠^{٢٤}$
z	zepto- زيبتا	$١٠^{-٢١}$	Z	zetta- زيتا	$١٠^{٢١}$
a	atto- أَتو	$١٠^{-١٨}$	E	exa- إكزا	$١٠^{١٨}$
f	femto- فِيمتو	$١٠^{-١٥}$	P	peta- بِيتا	$١٠^{١٥}$
p	pico- بِيكو	$١٠^{-١٢}$	T	tera- تِيرا	$١٠^{١٢}$
n	nano- نانو	$١٠^{-٩}$	G	giga- جِيغا	$١٠^{٩}$
μ	micro- مَايكرو	$١٠^{-٦}$	M	mega- مِيغا	$١٠^{٦}$
m	milli- مِلي	$١٠^{-٣}$	k	kilo- كِيلو	$١٠^{٣}$
c	centi- سَنتي	$١٠^{-٢}$	h	hecto- هِكتو	$١٠^{٢}$
d	deci دِيسي	$١٠^{-١}$	da	deka- دِيكا	$١٠^{١}$

الجدول (٢-١) يوضح البدايات التي يمكن إضافتها قبل وحدات النظام الدولي للقياس[١]
Prefixes for (SI) units

ويلاحظ من الجدول أن هذه الإضافات الابتدائية *prefixes* تبدأ بالمقدار الكبير جداً يوتا *(yotta)*، وتنتهي بالمقدار الصغير جداً يوكتو *(yocto)*. وجميع هذه البدايات يمكن إضافتها إلى عناصر النظام الدولي الموجودة في الجدول (١-١).

٤-١ الأبعاد *Dimensions*:

إن الكمية الفيزيائية، بصفة عامة توصف من خلال مقدار عددي متبوع بوحدة خاصة به من ذات الجنس، أي متوافقة معه من حيث الوحدات والأبعاد، بغض النظر عن النظام المستخدم *dimensional consistency and units consistency*، والوحدات عموماً سبع كميات رئيسية، هي: الطول، والكتلة، والزمن، ودرجة الحرارة، وشدة التيار الكهربائي، وشدة الإضاءة، وكمية المادة، ومن الممكن التعبير عنها بالأحرف الكبيرة ذات الأقواس المربعة التالية:

(١) جرت العادة على وضع هذا الجدول في الملاحق الخاصة بنهاية الكتاب، إلا أننا رأينا -توخياً للفائدة- وضعه ضمن مادة الكتاب وذلك لعدم استخدام الطلاب للملاحق بصفة عامة.

درجة الحرارة	$[K]$	الطول	$[L]$
التيار الكهربائي	$[A]$	الكتلة	$[M]$
شدة الإضاءة	$[Cd]$	الزمن	$[T]$
كمية المادة	$[Mol]$		

إن هذه الرموز داخل الأقواس المربعة [ ] مع أسسها، يطلق عليها الأبعاد، وهي تأخذ أسساً مختلفة عندما نستخدمها مع الوحدات المركبة تتراوح ما بين الموجب والسالب مروراً بالقيمة صفر، وهذا ما يظهر جلياً أثناء استخدام نظرية التوافق بين الوحدات والأبعاد في مجالات عديدة والتي يمكن إجمالها بالآتي:

١- التأكد من سلامة وصحة القوانين الفيزيائية.

٢- استنتاج بعض القوانين الفيزيائية.

٣- استنتاج وحدات الثوابت في القوانين الفيزيائية.

٤- التحويل من نظام إلى آخر، كالتحويل من نظام *(MKS)* إلى *(CGS)* وبالعكس.

إن الكميات الفيزيائية الأخرى يمكن التعبير عنها بضرب أو قسمة هذه الوحدات السبع، وهي كميات مركبة، فعلى سبيل التطبيق، تُعَرّف السرعة بأنها الإزاحة المقطوعة خلال وحدة الزمن، أي أن السرعة مركبة من كمية الطول وكمية الزمن، وبعبارة أخرى:

$$v = \frac{s}{t}$$

وعند التعبير عن كلٍ من كمية بأبعادها نجد:

$$[v] = \frac{[L]}{[T]} = [L][T]^{-1}$$

فالرمز الموجود داخل القوسين [ ] مع الأس الذي يمثله، يعبر عن بُعد الكمية الفيزيائية، ففي هذا التطبيق نجد أن $[L]$ وأسه واحد يمثل الإزاحة، أما $[T]$ الموجودة في المقام وأسه (١) واحد يمثل الزمن، ومن الممكن التعبير مجدداً عن السرعة بالشكل الآتي:

$$[L][T]^{-1} = m\ s^{-1}$$

ذلك أن المتر هو وحدة قياس الطول والثانية هي وحدة قياس الزمن، إذاً:

(m/s) هي وحدة قياس السرعة في نظام (MKS)، وهذا التطبيق البسيط يوضِّح العلاقة الأساسية بين كل من الوحدات والأبعاد.

تطبيق (١-١)
Application

من المعلوم أن النيوتن هو وحدة قياس القوة في النظام الدولي للقياس وهو اسم العالم الفيزيائي المعروف اسحق نيوتن *Isaac Newton*، والنيوتن هو وحدة مركبة وليست أساسية، بيِّن ذلك مستخدماً قانون نيوتن الثاني.

القوة *Force* وفقاً لقانون نيوتن ا لثاني هي:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

حيث (m) كتلة الجسم، $(\vec{a})$ تسارع الجسم وهو عبارة عن تغير السرعة خلال وحدة الزمن، وبما أن وحدة قياس السرعة هي (m/s) ووحدة قياس الزمن هي (s) يكون التسارع:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{(m/s)}{(s)} = (m/s^2)$$

وعليه فإن القوة التي تجعل كتلة مقدارها $(1kg)$ تسارعاً مقداره $(1m/s^2)$ ما هي إلا النيوتن، وبما أن:

$$\vec{F} = m\vec{a} = (kg)(m/s^2)$$

ونلاحظ أن النيوتن وحدة قياس مركبة من الكميات الثلاثة الكتلة والطول والزمن، ويمكن تمثيله بُعدياً على الشكل: $[M][L][T]^{-2}$

إذاً النيوتن هو $(kg.m/s^2)$ وهذا تعريف للنيوتن على أنه وحدة قياس مركبة وليست أساسية.

تطبيق (٢-١)
Application

من المعلوم أن الجول هو وحدة قياس الطاقة أو الشغل في النظام الدولي للقياس، وهو عبارة عن القوة مضروبة في الإزاحة، بيِّن ذلك مستخدماً القانون العام للشغل:

$$W = \vec{F}.\vec{r}$$

حيث $(\vec{F})$ هي القوة و$(\vec{r})$ هي الإزاحة التي عَملتْ خلالها هذه القوة، وهكذا تبدو المسألة على درجة من السهولة، فالشغل هو عبارة عن حاصل ضرب القوة في الإزاحة، وهذه هي الصيغة الرياضية العامة للشغل، ويُلاحظ فيها وجود علامة الضرب القياسي لمقدارين فيزيائيين متجهين، إذًا :

$$J = (kg\frac{m}{s^2})(m)$$
$$= (kg\frac{m^2}{s^2})$$

ونلاحظ أن الجول وحدة قياس مركبة من الكميات الثلاثة الكتلة، الطول، الزمن. ويمكن تمثيله بُعدياً على الشكل $[M][L]^2[T]^{-2}$.

وبناءً على ما تقدم فإن الشغل المبذول عند إزاحة جسم يخضع لتأثير قوة مقدارها $(1N)$ مسافة مقدارها $(1m)$ باتجاه القوة هو عبارة عن جول واحد، ولابد من التأكُّد من مقدار الزاوية بين متجه القوة ومتجه الإزاحة.

أما وحدات قياس الكميات الكهربائية فهي في غالبيتها تحمل أسماء فيزيائيين كبار مثل كولومب *Coulomb* وفولت *Volt* وسواهم، وهي وحدات مركبة وليست أساسية أو بسيطة.

إن الدراسة التفصيلية للأبعاد تشير بشكل قاطع إلى ضرورة توافقها مع الوحدات، وعلى الرغم من أننا خصّصنا فقرةً لكلٍ منهما على سبيل التوضيح، إلا أنَّه لابد من التأكيد على ضرورة التوافق والانسجام التام بين الوحدات والأبعاد، وذلك هو مضمون "نظرية العلاقة بين الوحدات والأبعاد" *Dimensions and units theory*. ومفاد هذه النظرية أن طرفي أية معادلة يجب أن يكونا متساويين، أي أننا لابد أن نفهم معنى إشارة المساواة من حيث أبعاد (أسس) الكميات التي تظهر على الطرفين بعد استخدام التعبير الرياضي بشكله الصحيح، ثمَّ نعالج كل وحدة قياس من الطرف الأيسر للمعادلة مع ما يقابلها في الطرف الأيمن ولتوضيح ذلك سوف نناقش بعض الأمثلة.

تطبيق (١-٣)
Application

عبِّر مستخدماً نظرية توافق الوحدات والأبعاد عن الطاقة الحركية لجسم كتلته *(m)* ويتحرك بسرعة ثابتة *(v)*، علماً بأن العلاقة الرياضية للطاقة الحركية هي:

$$K = (1/2)mv^2$$

الحل *Solution*:

على وجه العموم يمكننا التعبير عن أي مقدار فيزيائي *(A)* وفقاً لنظرية الأبعاد بالشكل التالي:

$$A = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma}$$

حيث أن الأسس (α,β,γ) من الممكن أن تكون أعداداً سالبة أو موجبة أو صفراً، كما يمكن أن تكون أعداداً كسرية، وفي هذا التطبيق من المعلوم أن المعادلة الرياضية التي تعبر عن الطاقة الحركية *Kinetic Energy* هي:

$$K = (1/2)mv^2$$

حيث *(m)* كتلة الجسم المتحرك، *(v)* سرعته، ووفقاً لنظرية الأبعاد:

$$\begin{aligned}[K] &= [M]^1 \left[LT^{-1}\right]^2 \\ &= [M]\,[L]^2 \left[T^{-2}\right]\end{aligned}$$

أي أن:

$$\alpha = ١,\beta = ٢,\gamma = \Box ٢ \Box$$

ولمزيد من البيان لأهمية العلاقة بين الوحدات وأبعادها واتباع الأسلوب التحليلي لنظرية الأبعاد *dimensional analysis*، سوف نقدم عدداً من الأمثلة:

تطبيق (١-٤)
Application

استخدم نظرية التوافق بين وحدات قياس الكميات الفيزيائية وأبعادها لتتأكد من صحة المعادلة الفيزيائية الآتية:

$$Q = kA\frac{(T_f - T_o)}{d}t$$

وذلك باستخدام طريقة تحليل أبعاد الكميات الفيزيائية على طرفي المعادلة حيث:

Q: تمثل كمية الحرارة المنتقلة خلال التوصيل *conducting heat*، k: معامل التوصيل الحراري *thermal conduction coefficient*، A: مساحة سطح التوصيل، (T_2, T_1): درجتي الحرارة على جانبي التوصيل، t: زمن التوصيل، d: مسافة التوصيل الحراري.

الحل *Solution*:

أبعاد وحدات الطاقة هي مكونات الجول *Joule* إذن:

$$Q = [M][L]^2[T]^{-2}$$

معامل التوصيل الحراري	=	$k = [M][L][T]^3[K]^{-1}$
سطح التوصيل	=	$A = [L]^2$
درجة الحرارة	=	$T = [K]$
مسافة التوصيل	=	$d = [L]$

ولكي تكون المعادلة صحيحة فإن أبعاد وحدات الطرف الأيسر يجب أن تكون مساوية لأبعاد وحدات الطرف الأيمن.

$$[M][L]^2[T]^{-2} = [M][L][T]^{-3}[K]^{-1}[L]^2[K][L]^{-1}[T]$$
$$[M][L]^2[T]^{-2} = [M][L]^2[T]^{-2}$$

وهكذا نجد أن المعادلة صحيحة.

تطبيق (٥-١)
Application

استخدم نظرية التوافق بين وحدات قياس الكميات الفيزيائية وأبعادها، لاشتقاق المعادلة الفيزيائية التي تعبِّر عن القدرة الكهربائية في دائرة تحتوي مقاومة (R) ويمر فيها تيار كهربائي (I)، علماً بأن القدرة الكهربائية تتناسب طردياً مع كلٍ من شدة التيار المار ومقدار المقاومة، وتسمى بالقدرة المُقاوِمة *resistive power*، واختصاراً يشار إليها بالحرف الإنكليزي (P).

الحل *Solution*:

من المعلوم أن أبعاد المقاومة هي:

$$R = [M][L]^2[T]^{-3}[A]^{-2}$$

أما أبعاد القدرة الكهربائية فهي:

$$P = [M][L]^2[T]^{-3}$$

وأخيراً أبعاد التيار:

$$I = [A]$$

بما أن القدرة الكهربائية (P) تتناسب تناسباً طردياً مع كل من المقاومة والتيار، إذاً الصيغة الرياضية المعبرة عن ذلك هي:

$$P \propto I^{\alpha} R^{\beta}$$

وعند التعبير عن كل كمية بأبعادها نجد أنَّ:

$$\begin{aligned}[M][L]^2[T]^{-3} &= K[A]^{\alpha}[M]^{\beta}[L]^{2\beta}[T]^{-3\beta}[A]^{-2\beta} \\ &= K[A]^{\alpha-2\beta}[M]^{\beta}[L]^{2\beta}[T]^{-3\beta}\end{aligned}$$

بمقارنة الطرفين نجد أن أس التيار في الطرف الأيسر هو الصفر، أي أن:

$$\begin{aligned}\alpha - 2\beta &= 0 \\ \alpha &= 2\beta\end{aligned}$$

وبمقارنة أس $[L]$ في الطرفين نجد أس الطول هو الواحد، أي أن:

$$2\beta = 2$$

$$\beta = 1$$

$$\alpha = 2$$

وهكذا نجد أن:

$$[M][L]^2[T]^{-3} = K[A]^2[M][L]^2[T]^{-3}[A]^{-2}$$
$$[M][L]^2[T]^{-3}[A]^{-2} = R$$
$$[A]^2 = I^2$$

وهكذا نجد أن:

$$P = KI^2R$$

حيث:

$$K = 1$$

وتسهيلاً على أبنائنا الطلبة سوف نرتب مجموعة كبيرة من الكميات الفيزيائية المختلفة مع وحدات قياسها وأبعادها وفقاً للنظام الدولي *(SI)*، في الجدول (٣-١).

الجدول (٣-١) الكميات الفيزيائية وأبعاد وحداتها

شكل الوحدة الأساسي	الأبعاد[1] Dimensions	الكمية Quantity		الرمز الدولي
m^2	$L^{٢}$	المساحة	area	A
mol	Mol	كمية المادة	amount of substance	X
ms^{-2}	LT^{-2}	التسارع (العجلة)	acceleration	a
$kg\,m^2\,s^{-1}$	$ML^2\,T^{-1}$	كمية التحرك الزاوي	angular momentum	T
A	A	شدة التيار	current	I
$kg^{-1}\,m^{-2}\,s^4\,A^2$	$M^{-1}\,L^{-2}\,T^4\,A^2$	السعة	capacitance	C
$kg\,m^{-3}$	ML^{-3}	الكثافة الحجمية	mass density	ρ
$kg\,m^2\,s^{-2}$	$ML^2\,T^{-2}$	الطاقة	energy	U
$A\,s^{-1}$	AT	الشحنة الكهربائية	electric charge	q
$kg\,m^2\,s^{-3}\,A^{-1}$	$ML^2\,T^{-3}\,A^{-1}$	الجهد الكهربائي	electric potential	V
$kg\,m\,s^{-3}\,A^{-1}$	$MLT^{-3}\,A^{-1}$	شدة المجال الكهربائي	electric field strength	E
$kg\,m^2\,s^{-3}\,A^{-2}$	$ML^2\,T^{-3}\,A^{-2}$	المقاومة الكهربائية	electric resistance	R
s^{-1}	T^{-1}	التردد	frequency	f
$kg\,m\,s^{-2}$	MLT^{-2}	القوة	force	F
$kg\,m^2\,s^{-2}\,A^{-2}$	$ML^2\,T^{-2}\,A^{-2}$	الحث	inductance	L
m	L	الطول	length	l
cd	$C\,d$	شدة الإضاءة	luminous intensity	I
$cd\,sr$	$C\,d\,S\,r$	الفيض الضوئي	luminous flux	Φ
$cd\,m^{-2}$	$Cd\,L^{-2}$	شدة الاستضاءة	luminance	L
kg	M	الكتلة	mass	m

(١) وحدات وأبعاد قياس الكميات الفيزيائية.

الرمز الدولي	الكمية *Quantity*		الأبعاد[1] *Dimensions*	شكل الوحدة الأساسي
I	*moment of inertia*	عزم القصور الذاتي	ML^2	$kg\ m^2$
Φ_B	*magnetic flux*	الفيض المغناطيسي	$ML^2\,T^{-2}\,A^{-1}$	$kg\ m^2\,s^{-1}\,A^{-1}$
B	*magnetic field density*	كثافةالفيض المغناطيسي	$MT^{-2}\,A^{-1}$	$kg\ s^{-2}\,A^{-1}$
P	*magnetic pole*	القطب المغناطيسي	$L\,A$	$m\,A$
T	*magnetic field strength*	شدةالمجال المغناطيسي	$L^{-1}\,A$	$m^{-1}\,A$
ε_o	*permeability*	النفاذية	$MLT^{-2}\,A^{-2}$	$kg\ s^{-2}\,A^{-2}$
T_s	*surface tension*	الشد السطحي	$M\,T^{-2}$	$kg\ s^{-2}$
C	*specific heat*	الحرارة النوعية	$L^2\,T^{-2}\,K^{-1}$	$m\,s^{-2}\,K^{-1}$
t	*time*	الزمن	T	s
T	*temperature*	درجة الحرارة	K	K
τ	*torque*	عزم الدوران	$ML^2\,T^{-2}$	$kg\ m^2\,s^{-2}$
k	*thermal conductivity*	التوصيل الحراري	$MLT^{-3}\,K^{-1}$	$kg\ m\,s^{-3}\,K^{-1}$
V	*volume*	الحجم	L^3	L^3
v	*velocity*	السرعة	LT^{-1}	LT^{-1}

تابع الجدول (٣-١) الكميات الفيزيائية وأبعاد وحداتها

ملاحظة: يمكنك -عزيزي الطالب- إضافة القوسين [ ] إلى كل وحدة قياس أساسية موجودة في عمود الأبعاد.

ولمزيد من التوضيح وتسهيلاً على الطالب واستكمالاً لمعرفة الرموز اللاتينية المستعملة للتعبير عن بعض الكميات المشتقة فإن الجدول (٤-١) يشمل على الحروف اللاتينية الأساسية والتي يبلغ تعدادها أربع وعشرون حرفاً.تستخدم هذه الحروف في شكلها الصغير *lower case* أو شكلها الكبير *capital* عادة عند استخدام اللغة الإنكليزية في العلوم التطبيقية للتعبير عن الوحدات القياسية، الأسس والزوايا. فمثلاً نستخدم $(\alpha,\omega,\theta,\gamma,\beta)$ للقياس.

أما في خصائص المادة فتستخدم (η) للتعبير عن اللزوجة، (λ) للتعبير عن الطول الموجي، (ρ) للتعبير عن الكثافة، (ν) للتعبير عن التردد، (π) للتعبير عن النسبة الثابتة للدائرة، والقياس الراديانى للزوايا المستوية *Plane angle*، والقياس الستيراديانى للزوايا المجسمة *solid angle*، وهذه جميعها في شكلها الصغير. أما في الشكل الكبير، فمن أكثر الحالات استخداماً (Ω) للتعبير عن الأوم، وهو وحدة قياس المقاومة، و(Z) للتعبير عن ممانعة الدائرة الكهربائية في التيار المتناوب، وتقرأ زيتا.

الرسم الكبير *Capital*	الرسم الصغير *Lower case*	الحرف اللاتيني *Greek Name*	الرسم الكبير *Capital*	الرسم الصغير *Lower case*	الحرف اللاتيني *Greek Name*
N	ν	*Nu* نُيو	A	α	*Alpha* ألفا
Ξ	ξ	*Xi* إكساي	B	β	*Beta* بيتا
O	O	*Omicron* أُمِكرون	Γ	γ	*Gamma* غاما
Π	π	*Pi* بَاي	Δ	δ	*Delta* دلتا
P	ρ	*Rho* رُو	E	ε	*Epsilon* إبسلن
Σ	σ	*Sigma* سيجما	Z	ζ	*Zeta* زيتا
T	τ	*Tau* تَاو	H	η	*Eta* إيتا
Υ	υ	*Upsilon* أبسِلُن	Θ	θ	*Theta* ثيتا
Φ	ϕ	*Phi* فَاي	I	ι	*Iota* أيوتا
X	χ	*Chi* كَاي	K	κ	*Kappa* كابَا
Ψ	ψ	*Psi* بساي	Λ	λ	*Lambda* لامدا
Ω	ω	*Omega* أوميغا	M	μ	*Mu* ميو

جدول (٤-١) ويبين الحروف اللاتينية في شكليها الصغير والكبير[1]

تطبيق (٦-١)
Application

إذا علمت أن المدى الأفقي الذي يمكن أن يقطعه الجسم المقذوف *Projectile* (x) يعتمد على كل من السرعة الابتدائية لإطلاق القذيفة (v_o)، وعجلة الجاذبية الأرضية $(\vec{g})$.

الحل *Solution*:

(١) تعمدنا وضع هذا الجدول ضمن الوحدة الأولى، لضرورة اطلاع الطلاب على الحروف اللاتينية ومعرفة شكليها، وذلك لكثرة استخدامها.

$$x \propto (v_o, g)$$

ومثلما تعودنا دائماً، عند تحويل التناسب إلى مساواة لابد من إدخال الثابت وليكن (K)، كما أنّنا لا نعلم كيفية هذا التناسب، الذي يمكن تحديد طبيعته من خلال تحديد أسس كلٍ من السرعة الابتدائية وعجلة الجاذبية الأرضية.

لنفترض أن هذه الأسس هي على التوالي (α, β)

$$x = K\, v_o^{\alpha}\, g^{\beta}$$

هنا تكمن الفائدة العملية لنظرية التوافق بين الوحدات وأبعادها في إمكانية استخدامها لاشتقاق المعادلات الفيزيائية.

نلاحظ أن وحدات الطرف الأيسر للمعادلة تقاس في النظام الدولي بالأمتار، إذاً، أبعاد وحداته هي: $[L]$

لنفتش الآن عن أبعاد وحدات الطرف الأيمن:

$$\begin{aligned}
&\{[L][T]^{-1}\}^{\alpha}\, \{[L][T]^{-2}\}^{\beta} \\
&= [L]^{\alpha}\, [T]^{-\alpha}\, [L]^{\beta}\, [T]^{-2\beta} \\
&= [L]^{\alpha+\beta}\, [T]^{-\alpha-2\beta}
\end{aligned}$$

بمساواة الطرفين نجد أن:

$$[L] = [L]^{\alpha+\beta}\, \{T]^{-\alpha-2\beta}$$

ولغرض توفير وحدة الزمن في الطرف الأيسر، نضرب بالوحدة $[T]^0$ والقاعدة في ذلك معروفة، ذلك أن أي مقدار مرفوع للأس صفر يساوي الواحد، إذاً:

$$[L][T]^0 = [L]^{\alpha+\beta}\, [T]^{-\alpha-2\beta}$$

المساواة والتكافؤ هنا تقتضي أنّ أسس الكميات على طرفي المعادلة يجب أن تكون متساوية، وهذا ما نسميه تحليل الأبعاد *dimensions analysis*

$$\therefore \quad \alpha + \beta = 1 \Rightarrow \alpha = 1-\beta \qquad (1)$$

$$-\alpha \square 2\beta = 0 \Rightarrow -\alpha = 2\beta$$

$$\therefore \quad -(1-\beta) = 2\beta$$

$□۱ + \beta = ۲\beta$

$۲\beta - \beta = □۱$

$\beta = □۱$　　(٢)

بالتعويض في المعادلة (١):

$\alpha = ۱-\beta = ۱-(□۱) = ۲$

$$\therefore \quad x = K\frac{v_o^2}{g}$$

وهي المعادلة التي تعبر عن المدى الأفقي الذي يمكن أن تقطعه القذيفة.

تطبيق (٧-١)
Application

إذا كان القانون الذي يعبر عن الإزاحة النهائية (x) لجسم يتحرك بتسارع ثابت $\vec{a}$ هو:

$$x = x_o + v_o t + (1/2)at^2$$

حيث (x_o) هي الإزاحة الابتدائية للجسم (t) هو الزمن الذي استغرقته الحركة، (v_o) هي السرعة الابتدائية. اختبر صحة هذا القانون مستخدماً طريقة تحليل الأبعاد (الأسس).

الحل *Solution*:

أبعاد وحدات الطرف الأيسر للقانون:

$$[L]$$

أما أبعاد وحدات الطرف الأيمن:

$$[L] + [L][T]^{-1}[T] + [L][T]^{-2}[T]^2$$

في مثل هذه الحالة، لا بد من أن نتذكر بأن أبعاد وحدات كل حد من الحدود الموجودة على الطرف الأيمن يجب أن تمتلك أبعاد وحدات الطرف الأيسر نفسها حتى تكون المعادلة صحيحة، إذاً:

$$\begin{aligned}[L] &= [L] \\ &= [L][T]^{-1}[T] = [L] \\ &= [L][T]^{-2}[T]^2 = [L]\end{aligned}$$

وهكذا نجد أن المعادلة صحيحة بعد اختبارها من خلال مقارنة أبعاد الطرفين.

تطبيق (١-٨)
Application

يعتمد تردد *frequency* ذبذبة *oscillation* الحبل المشدود (f) على كل من قوة شد الحبل $(\vec{F})$ وكتلة وحدة أطواله *mass per unit length* $(\ell\ m/)$.

اشتق العلاقة الرياضية التي تعبر عن تردد الحبل بدلالة المتغيرات السابقة، مستفيداً من نظرية التوافق بين الوحدات وأبعادها.

الحل *Solution*:

من الواضح أن التردد يعتمد على كلٍ من:

$$f \propto (F, \ell, m/\ell)$$

وكما تعودنا دائماً، لاستبدال هذا التناسب بعلامة المساواة نعمد إلى إدخال ثابت، وليكن *(K)*.

$$v = KF^{\alpha} l^{\beta} \left(\frac{m}{l} \right)^{\gamma}$$

وأصبح مألوفاً لدينا أن عملية الاشتقاق تتم من خلال تحليل أبعاد وحدات طرفي المعادلة *dimensions analysis* وذلك لمعرفة شكل الاعتماد على المتغيرات (أسيا)، من خلال مقارنة أسس وحدات الطرفين.

الطرف الأيسر يحتوي على التردد، ومعلوم لدينا أن وحدة قياس التردد في النظام الدولي *(SI)* هي (s^{-1}).

$$\begin{aligned} [T]^{-1} &= K\{[M][L][T^{-2}]\}^{\alpha} [L]^{\beta} [M]^{\gamma} [L]^{-\gamma} \\ &= K[M]^{\alpha+\gamma} [L]^{\alpha-\gamma+\beta} [T]^{-2\alpha} \end{aligned}$$

نلاحظ أن كمية الزمن فقط هي التي ظهرت على الطرف الأيسر، ولغرض تأمين باقي الكميات، نعمد إلى الخطوة التوضيحية المتعارف عليها، بضرب الطرف الأيسر بالكميات $[M]^0 [L]^0$:

$$[M]^0 [L]^0 [T]^{-1} = K[M]^{\alpha+\gamma} [L]^{\alpha-\gamma+\beta} [T]^{-2\alpha}$$

وبمقارنة الطرفين نجد أنَّ:

(أسس الكتلة) $\qquad \alpha + \gamma = 0 \Rightarrow \alpha = -\gamma$

(أسس الطول)

$$\alpha - \gamma + \beta = 0 \Rightarrow -\gamma - \gamma + \beta = 0$$
$$\Rightarrow -2\gamma = -\beta$$

(أسس الزمن)

$$-2\alpha = -1 \Rightarrow \alpha = 1/2$$
$$\therefore \quad \gamma = -1/2$$
$$\beta = -1$$

$$\therefore \quad f = KF^{\frac{1}{2}}\ell^{-1}\left(\frac{m}{l}\right)^{-\frac{1}{2}}$$
$$= KF^{\frac{1}{2}}l^{-1}m^{-\frac{1}{2}}$$
$$\boxed{f = \frac{K}{l}\sqrt{\frac{F}{m}}}$$

ملاحظة هامة: نلاحظ في الطرف الأيمن للمعادلة بأننا أبقينا على المقدار $(m/l)^{-\frac{1}{2}}$ كما هو، دون أن نجري عملية الضرب مع $(l)^{-1}$، وهنا يجب أن يتذكر الطالب أن التطبيق الصحيح للقانون يتطلب تعويض كتلة وحدة الأطوال للمادة المستخدمة لصناعة الحبل، ومعروف أن وحدة الأطوال هي المتر، ولذا أبقينا على المقدار $(m/l)^{-\frac{1}{2}}$ كما هو، والرمز (m) في القانون هو عبارة عن (m/l).

الخلاصة

Summary

- إنّ جميع وحدات قياس الكميات البُعدية تحدد الأساس الفعلي لبناء مختلف المعلومات والمعادلات الرياضية في مختلف فروع العلوم النظرية والتطبيقية، حيث تعتبر مقياساً لصحة وسلامة المعادلات من خلال تساوي وحدات طرفي المعادلة الرياضية للقانون بصفة عامة، وإدراكاً لأهمية هذا الأمر، فقد تم اعتماد النظام الدولي للقياس *(SI)* بوحداته السبع الأساسية.
- يعتبر كلٍ من النظامين المتري للقياس *(MKS)*، والنظام الكاوسي *(CGS)* منتميان إلى النظام الدولي للقياس *(SI)*، ذلك أن النظام المتري يعتمد أربع كميات هي: الطول، الكتلة، الزمن، ودرجة الحرارة، مقاسة بوحدات النظام الدولي نفسها، كما أن النظام الكاوسي يعتمد الكميات نفسها، مقاسةً بأجزاء وحدات النظام الدولي للطول والكتلة، حيث يُقاس الطول بالسنتيمتر، والكتلة بالغرام، وتبقى الثانية كما هي وحدة لقياس الزمن.
- إنَّ النظام البريطاني *(FPS)* -والذي يعتمد القدم، الباوند، والثانية لقياس الكميات الأساسية، كما يعتمد الفهرنهايت لقياس درجة الحرارة- قد بدأ استخدامه يتلاشى تدريجياً مع انتشار النظام الدولي للقياس.
- إنَّ مقادير الثوابت الفيزيائية -التي تظهر أثناء اشتقاق القوانين- تختلف باختلاف النظام المعتمد للقياس، فمثلاً في قانون كولوم عند اعتماد النظام الدولي فإن ثابت التناسب يساوي $(9\times10^{9}\ Nm^{2}\ C^{-1})$ أما عند اعتماد النظام الكاوسي فيساوي $(1\,dyne\,cm^{2}\ esu^{-2})$.
- إن أجزاء ومضاعفات جميع وحدات النظام الدولي للقياس تخضع للجدول (١-٥)، وهناك بعض الوحدات الأخرى أوردناها في مجال استخداماتها حسب أهميتها، وتلفظ هذه المضاعفات والأجزاء كما نلفظها باللغة الإنكليزية، بعد إضافتها إلى الوحدات الدولية للقياس.

الامتحانات الذاتية

Self Test Exams

ولغرض التدريب العملي على اختبار الطالب لنفسه، والتأكد من جدارته في المقدرة الفعلية على فهم واستيعاب نظرية التوافق بين الوحدات والأبعاد، تم تخصيص ثلاثة امتحانات ذاتية.

الامتحان الذاتي الأول:

من المعلوم أن معدل السريان لمائع هو عبارة عن حجم السائل المار فى الثانية الواحدة، يعتمد على كل من انحدار الضغط (p/ℓ)، حيث (p) هو فرق الضغط بين طرفي أنبوبة السريان (ℓ)، هو طول أنبوبة السريان، كما يعتمد على لزوجة السائل *(visconsity)* (η) ونصف قطر الأنبوبة (r).

استخدم مفهوم نظرية التوافق بين الوحدات وأبعادها وذلك لاشتقاق القانون الرياضي الذي يعبر عن معدل السريان معتمداً على المتغيرات المذكورة أعلاه.

الامتحان الذاتي الثاني:

استخدم نظرية التوافق بين الوحدات وأبعادها وذلك للتثبت من صحة القانون:

$$\eta = K\frac{r^2}{v}(\rho_s - \rho_\ell)g$$

وهو ما يعرف بقانون ستوك في اللزوجة *Stock's law*، حيث (r) نصف قطر الكرة المعدنية ذات الكثافة (ρ_s)، (v) سرعة سقوط الكرة داخل السائل ذي الكثافة (ρ_ℓ) ولزوجته (η)، (g) تسارع الجاذبية الأرضية $K = \frac{2}{9}$ ، وهذه القيمة للثابت تم قياسها علمياً.

الامتحان الذاتي الثالث:

جسم أسود *black body* مساحة سطحه (A)، ودرجة حرارته المطلقة (T)، يبعث طاقة حرارية مشعة مقدارها *(Q)* خلال زمن مقداره (t).

إذا كانت كمية الطاقة الحرارية المنبعثة إشعاعياً تساوي:

$$Q = \sigma \; A\, t\, T^4$$

حيث (σ) هو ثابت ستيفان بولتزمان *Stefen-Boltzman constant*، استخدم نظرية التوافق بين الوحدات وأبعادها لإيجاد الأبعاد الفيزيائية لثابت ستيفان بولتزمان وفق النظام الدولي للقياس الدولي *(SI)*.

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 استخدم مفهوم نظرية التوافق بين الوحدات والأبعاد لغرض التعبير عن الكميات الفيزيائية الآتية، مستخدما الوحدات الرئيسية البسيطة للنظام الدولي *(SI)*.

الطول، المساحة، الحجم، الزمن، السرعة، التسارع، الكتلة، الكثافة، الكثافة النوعية، القوة، القدرة، التردد.

١-٢ استخدم نظرية توافق الوحدات والأبعاد للتحقق من صحة أو عدم صحة القوانين الفيزيائية الآتية:

أ- قانون نيوتن الثاني: $\vec{F} = m\vec{a}$

حيث تمثل $(\vec{F})$ القوة و(m) كتلة الجسم و$(\vec{a})$ التسارع.

ب- قانون نيوتن للجذب العام: $\vec{F} = G\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$

حيث تمثل $(\vec{F})$ القوة، و(m_1) كتلة الجسم الأول، و(m_2) كتلة الجسم الثاني، و(r) المسافة الفاصلة بينهما، (G) ثانية الجذب العام لنيوتن.

جـ- قوانين الحركة على خط مستقيم بتسارع ثابت:

$$v = v_o + xt$$
$$x = x_o + vt + (1/2)xt^2$$

حيث تمثل (v) السرعة النهائية، و(v_o) السرعة الابتدائية، (x) الإزاحة النهائية، و(x_o) الإزاحة الابتدائية، و(t) الزمن.

١-٣ اشتقاق المعادلات الفيزيائية هو الآخر من أهم فوائد نظرية التوافق بين الوحدات والأبعاد، استخدم هذه النظرية لاشتقاق معادلة البندول البسيط، مفترضاً أن طول البندول (l)، وكتلة الجسم المعلق (m)، وزمن الذبذبة الواحدة (T)، وتسارع الجاذبية الأرضية (g).

١ -٤ إذا علمت أن سرعة الضوء (c) تتناسب مع كل من الطول الموجي (λ)للموجة الضوئية وكذلك) $f)$ ترددها. إذا عامت أن مقدار ثابت التناسب يساوي الواحد.

استخدم مفهوم نظرية التوافق بين وحدات القياس الأساسية وأبعادها وذلك لاشتقاق الصيغة الرياضية لسعة الضوء.

١-٥ اشتقاق وحدات الثوابت الفيزيائية يعد أيضاً من الفوائد العامة لنظرية توافق الوحدات والأبعاد، استخدم مفهوم هذه النظرية لاشتقاق وحدات الثوابت في المعادلات الآتية:

أ- قانون هوك: $\vec{F} = -kx$

حيث تمثل $(\vec{F})$ قوة الإرجاع، (x) مقدار الإزاحة، (k) ثابت قانون هوك.

ب- قانون الجذب العام لنيوتن: $\vec{F} = G\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$

حيث تمثل (F) القوة، و(m_1) كتلة الجسم الأول، و(m_2) كتلة الجسم الثاني، و(r) المسافة الفاصلة بينهما، (G) ثابت الجذب العام لنيوتن.

١-٦ استخدم مفهوم نظرية توافق الوحدات والأبعاد لتحويل النيوتن كوحدة لقياس القوة في النظام (MKS) إلى ما يعادلها في النظام (CGS). ما اسم وحدة القوة في النظام (CGS)؟ اذكرها.

١-٧ استخدم مفهوم نظرية توافق الوحدات والأبعاد لتحويل الجول كوحدة لقياس الشغل أو الطاقة في النظام (MKS) إلى ما يعادلها في النظام (CGS). ما اسم هذه الوحدة في النظام (CGS)؟ اذكرها.

١-٨ ما هي العلاقة بين كل من؟

أ- ياردة مربعة وقدم مربع.

ب- بوصة مربعة وسنتميتر مربع.

ت- ميل مربع وكيلو متر مربع.

ث- متر مكعب وسنتيمتر مكعب.

وضح ذلك بإجراء الحسابات اللازمة.

١-٩ تعتبر الأرض بشكل تقريبي كرة نصف قطرها يساوي $(6.37\times 10^6\ m)$:

أ- أوجد حسابياً محيط الكرة الأرضية مقاساً بالكيلومترات؟

ثم استخدم الصيغة الرياضية التي استخدمتها وذلك للتثبت من وحدة قياس المحيط في النظام الدولي للقياس.

ب- أوجد حسابياً مساحة الكرة الأرضية مقاسه بالكيلومترات المربعة؟

ثم استخدم الصيغة الرياضية التي استخدمتها وذلك للتثبت من وحدة قياس المساحة في النظام الدولي للقياس.

ت- أوجد حسابياً حجم الكرة الأرضية مقاساً بالكيلومترات المكعبة.

ثم استخدم الصيغة الرياضية التي استخدمتها وذلك للتثبت من وحدة قياس الحجم في النظام الدولي للقياس.

مسائل اختيارية

Optional Problems

١-١ إذا علمت أن سرعة الضوء تساوي $(3\times10^{8}\,m.s^{-1})$. أوجد حسابياً سرعة الضوء بكل من الوحدات الآتية: قدم/ثانية. مليمتر/ بيكو ثنية.

١-٢ من المعروف أن جزئية الماء تحتوي على ذرتين من الهيدروجين وذرة واحدة من الأكسجين، فإذا علمت كتلة ذرة الهيدروجين يساوي $(1u)$، وكتلة ذرة الأكسجين تساوي $(1u)$.

أ- أوجد حسابياً كتلة جزئية الماء بالكيلوغرام.

ب- إذا علمت أن كتلة ماء المحيطات في العالم يساوي $(1.4\times10^{21}\,kg)$، فكم يبلغ عدد الجزئيات فيها؟

فيزياء عامة

التيار الكهربائي 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 نعرَّف 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[1]:

$$\boxed{I = \frac{\Delta q}{\Delta t}} \qquad \text{(١□٢)}$$ (تعريف التيار الكهربائي)

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:

$$I = \frac{dq}{dt} \qquad \text{(٢□٢)}$$

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

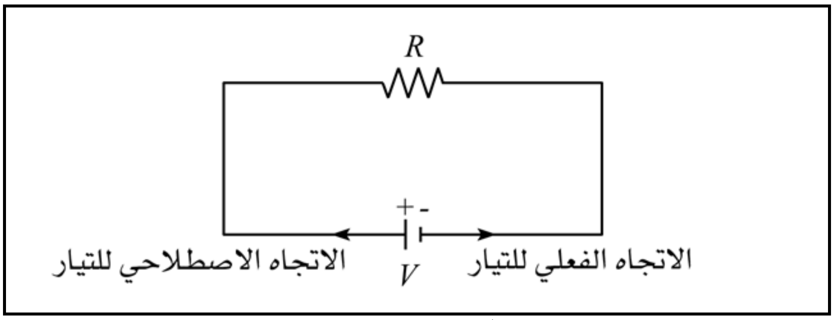
$$q = ne \ , \qquad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots, \qquad \text{(٣□٢)}$$

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

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)
Application

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:

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

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

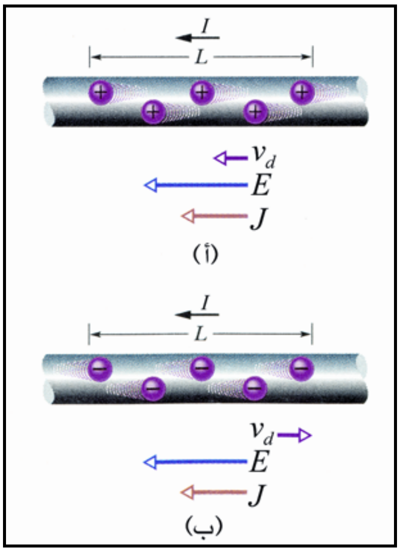
$$q = ne$$

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

$$
\begin{aligned}
30\times10^{-7}C &= n(1.6\times10^{-19}C) \\
n &= \frac{(30\times10^{-7}C)}{(1.6\times10^{-19}C)} = 1875\times10^{10}\,electron
\end{aligned}
$$

٣-٢ 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:

$$\boxed{\vec{J} = \frac{I}{A}}$$ (٤□٢)(تعريف كثافة التيار)

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:

$$I = \int \vec{J}.d\vec{A} \qquad (٥□٢)$$

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 (٥□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):

$$\Delta q = (nAL)e \qquad (٦□٢)$$

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

$$\Delta t = L / \vec{v}_d \qquad (٧□٢)$$

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:

$$\vec{J} = (ne)\vec{v}_d \qquad (٨\square٢)$$

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 $(C/m^٣)$ كولوم لكل متر مكعب.

تطبيق (٢-٢)
Application

تم لحم نهاية سلك من الألومنيوم قطره (٢,٥ *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:

$$J_{Al} = \frac{I}{A_{Al}}$$
$$A_{Al} = \pi r_1^2$$
$$= \pi\left(1.25\times10^{-3}\,m\right)^2$$
$$= 4.61\times10^{-6}\,m^2$$
$$J_{Al} = \frac{1.3\;A}{4.61\times10^{-6}\,m^2} = 2.6\times10^5(\,A/m^2\,)$$

٢- النحاس:

$$J_{Cu} = \frac{I}{A_{Cu}}$$
$$A_{Cu} = \pi r_2^2$$
$$= \pi\left(0.9\times10^{-3}m\right)^2$$
$$= 2.54\times10^{-6}m^2$$
$$J_{Cu} = \frac{1.3A}{2.54\times10^{-6}m^2} = 5.1\times10^5(\,A/m^2\,)$$

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

تطبيق (٣-٢)
Application

شريحة من السيليكون عرضها $(x = 250\,\mu m)$ وسماكتها $(W = 3.2\,mm)$ 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

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

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

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:

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

(٩-٢) (تعريف المقاومة)

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.

$$١\ ohm = ١\,\Omega = ١\ volt/amper$$

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:

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

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

(١٠-٢) (تعريف الناقلية)

وهكذا نجد أن المقاومة النوعية تساوي:

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

(١١-٢) (تعريف المقاومة النوعية)

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.

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \qquad (١٢□٢)$$

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:

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

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 ρ(Ω.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	$٢,٧٥ \times ١٠^{□٨}$	$٤,٤ \times ١٠^{□٣}$

Material المادة	*Resistivity* $\rho(\Omega.m)$ المقاومة النوعية	*Temperature coefficient of resistivity* ($k^{□١}$) معامل التوصيل الحراري
tungsten تنغستين	٥,٢٥ $\times$ ١٠ $^{□٨}$	٤,٥ $\times$ ١٠ $^{□٣}$

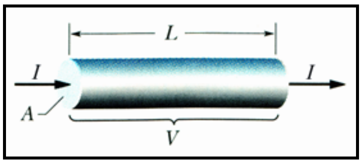
الجدول (١-٢) يبين (المقاومة النوعية) لمجموعة من المواد، عند درجة الحرارة (٢٠ ℃)

Material المادة	*Resistivity* $\rho(\Omega.m)$ المقاومة النوعية	*Temperature coefficient of resistivity* ($k^{□١}$) معامل التوصيل الحراري
iron حديد	٩,٦٨ $\times$ ١٠ $^{□٨}$	٦,٥ $\times$ ١٠ $^{□٣}$
platinum بلاتين	١٠,٦ $\times$ ١٠ $^{□٨}$	٣,٩ $\times$ ١٠ $^{□٣}$
manganin منغنيز	١٨,٢ $\times$ ١٠ $^{-٨}$	٠,٠٠٢ $\times$ ١٠ $^{□٣}$
أشباه موصلات نموذجية		
silicon. pure سليكون نقي	٢,٥ $\times$ 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	~١٠ ^{١٦}	-

تابع الجدول (١-٢) 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:

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

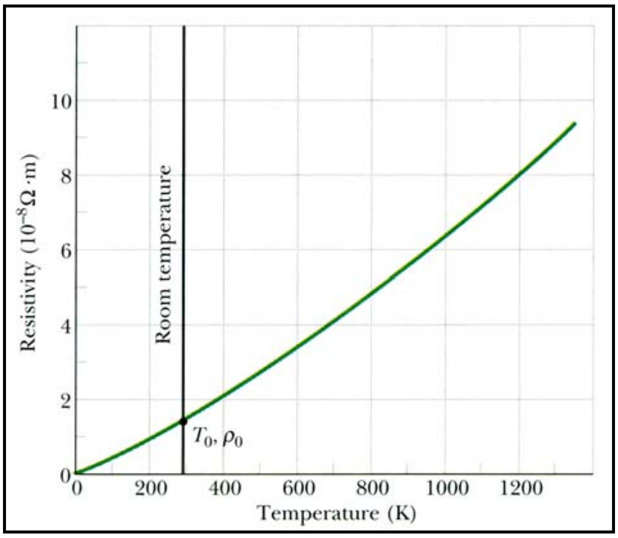
ولكن نلاحظ أنَّ المقدار (V/I) هو عبارة عن المقاومة (R) وهكذا نجد أنَّ العلاقة الرياضية بين المقاومة والمقاومة النوعية لناقل طوله (L) ومساحة مقطعه (A) هي:

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

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:

(١٥□٢) $$\rho-\rho_o=\rho_o\alpha(T-T_o)$$

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

(على مقياس سليزيوس) $T_o=20°C$

(على مقياس كلفن) $T_o=293\,K°$

للنحاس $\rho_o=1.69\,\mu\Omega.cm$

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:

(١٦□٢) (علاقة المقاومة بدرجة الحرارة) $$\boxed{R-R_o=R_o\alpha(T-T_o)}$$

تطبيق (٤-٢)
Application

سلك مصنوع من النحاس نصف قطره (*٠,٩ mm*)، يسري خلاله تيار ثابت قدره (*١,٣ A*)، ما هي شدة المجال الكهربائي داخل الناقل النحاسي؟

الحل ***Solution***:

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

ولكن

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

$$A = \pi r^2$$

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

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

$$J = \frac{1.3 A}{2.54 \times 10^{-6} m^2} = 5.1 \times 10^5 A/m^2$$

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

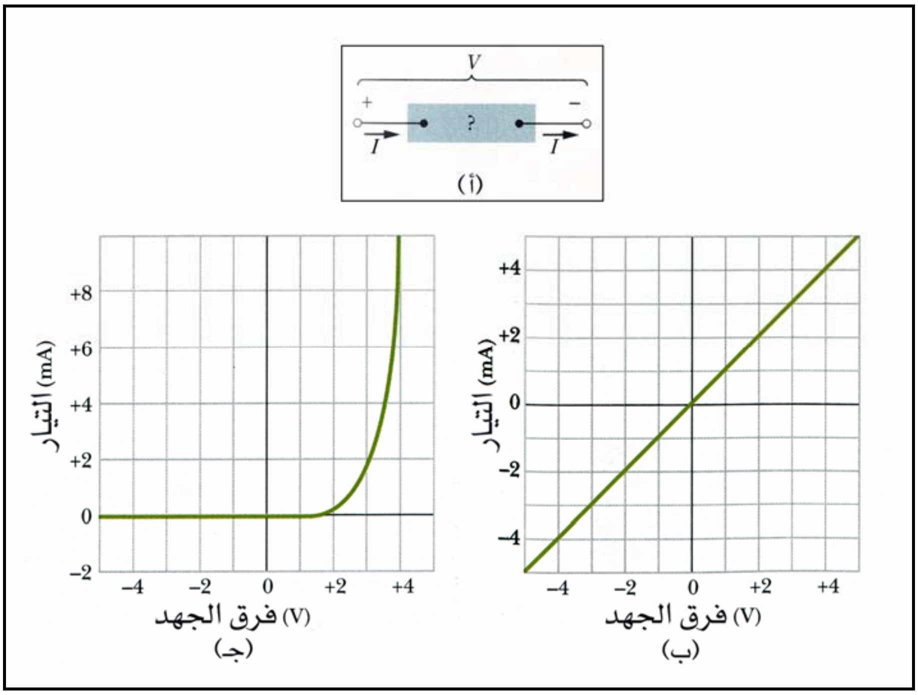
$$E = (1.69 \times 10^{-8}\ \Omega.m)(5.1 \times 10^5 A/m^2)$$

$$E = 8.6 \times 10^{-3} V/m$$

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

٥-٢ قانون أوم *Ohm's Law*:

من المفيد هنا ونحن ندرس قانون أوم أن نذكِّر 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 (٥-٢ أ، ب، جـ) ثم لاحظ الجوانب الأساسية الآتية:



الشكل (٥-٢ 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 (٥-٢ 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 (٥-٢ 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 (٥-٢ 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،

---

[1] نلاحظ أن المقدار *(I/V)* يمثل مقلوب المقاومة.

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 (٥-٢ ب) يوضح جهازاً يعتمد في عمله على قانون أوم وهو عبارة عن مقاومة، أما الشكل (٥- 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 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 عن مقاومته $(R = V/I)$، 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 (٥-٢)
Application

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 $r = 4\ mm$ 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 (٦-٢)
Application

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:

$$R_t = R_{50^\circ C}$$

درجة حرارة الغرفة $R_o = R_{20^\circ C} = 3.35\,\Omega$

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

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

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

$$= 3.392\,\Omega$$

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:

$\boxed{P = IV}$ (تعريف القدرة) (١٧□٢)

حيث (P) هي القدرة *power*، و(I) التيار المار خلال دائرة الجهاز 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:

$1W = (1J/1s)$ (تعريف الواط)

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.

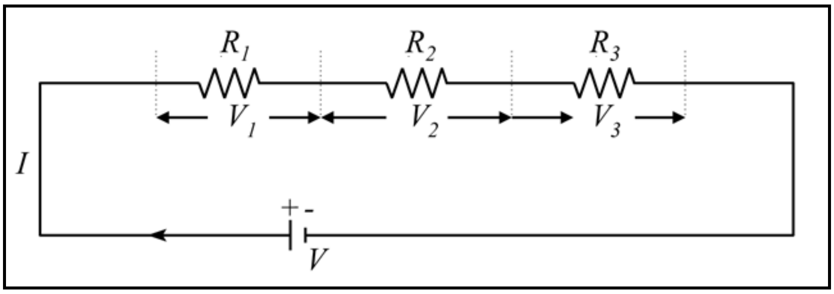
٦-٢ وصل المقاومات على التوالي والتوازي *Resistors in Series and in Parallel*:

غالباً ما نجد في الدوائر الكهربائية مجموعة من المقاومات، يتم وصل بعضها ببعض إما على التوالي وإما على التوازي 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:

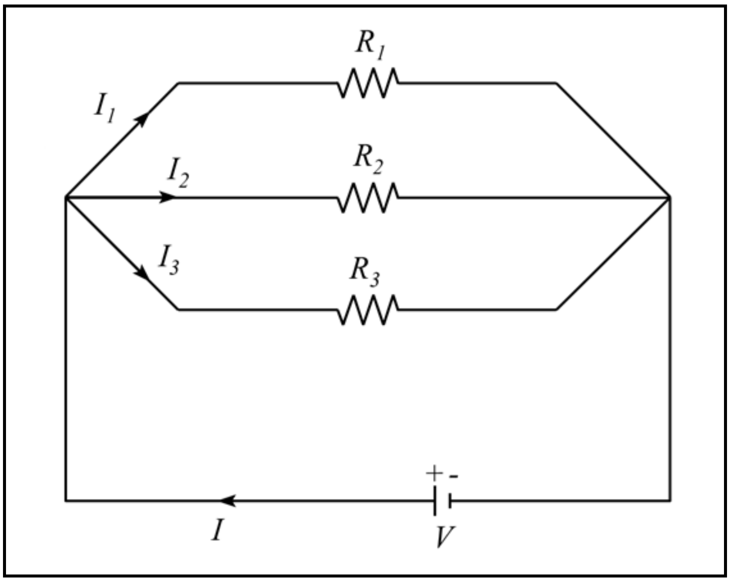
$$\frac{V}{I} = \frac{V_1}{I} + \frac{V_2}{I} + \frac{V_3}{I}$$

أي أنَّ:

(١٨□٢) (المقاومة المكافئة على التوالي) $\boxed{R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3}$

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:

(قانون كيرشوف الأول) $$I = I_1 + I_2 + I_3$$

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

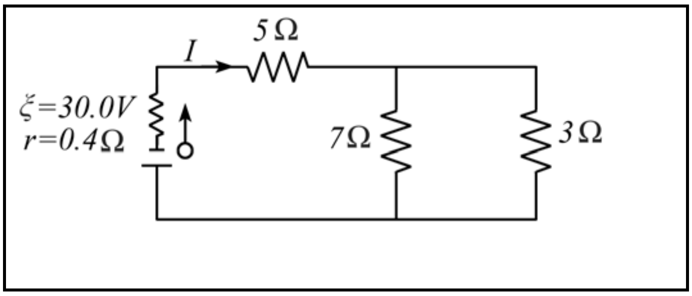
$$\frac{I}{V} = \frac{I_1}{V} + \frac{I_2}{V} + \frac{I_3}{V}$$

(١٩-٢) (المقاومة المكافئة على التوازي) $$\boxed{\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

ومعنى ذلك: أن مقلوب المقاومة الكلية المكافئة لمجموع المقاومات 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 (٧-٢)
Application

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



الشكل (٨-٢)، التطبيق (٧-٢)

أوجد شدة التيار الكهربائي المار في الدائرة؟

الحل *Solution*:

هذا التطبيق تطبيق مباشر لإيجاد المقاومة المكافئة لحالتي توصيل المقاومات مع بضها، كما هو تطبيق على قانون أوم، ونلاحظ كذلك وجود المقاومة الداخلية *(r)* للبطارية، وهذا تذكير بمعادلة الدائرة الكهربائية والآن، بملاحظة المقاومتين *(٣ Ω)* و*(٧ 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 *(٥ Ω)* على التوالي، وبملاحظة المقاومة الداخلية للبطارية نجد أن المقاومة الكلية في الدائرة هي:

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

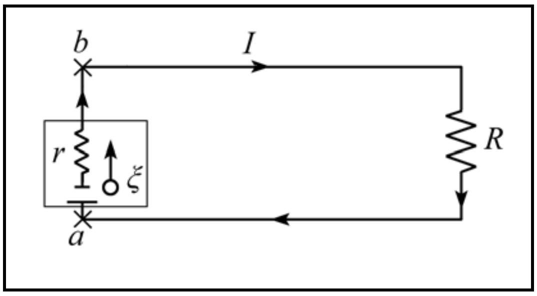
إذن التيار وفقاً لقانون الدائرة الكهربائية يساوي:

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

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

ما هو المقصود بمعادلة الدائرة الكهربائية؟

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



الشكل (٩-٢)

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:

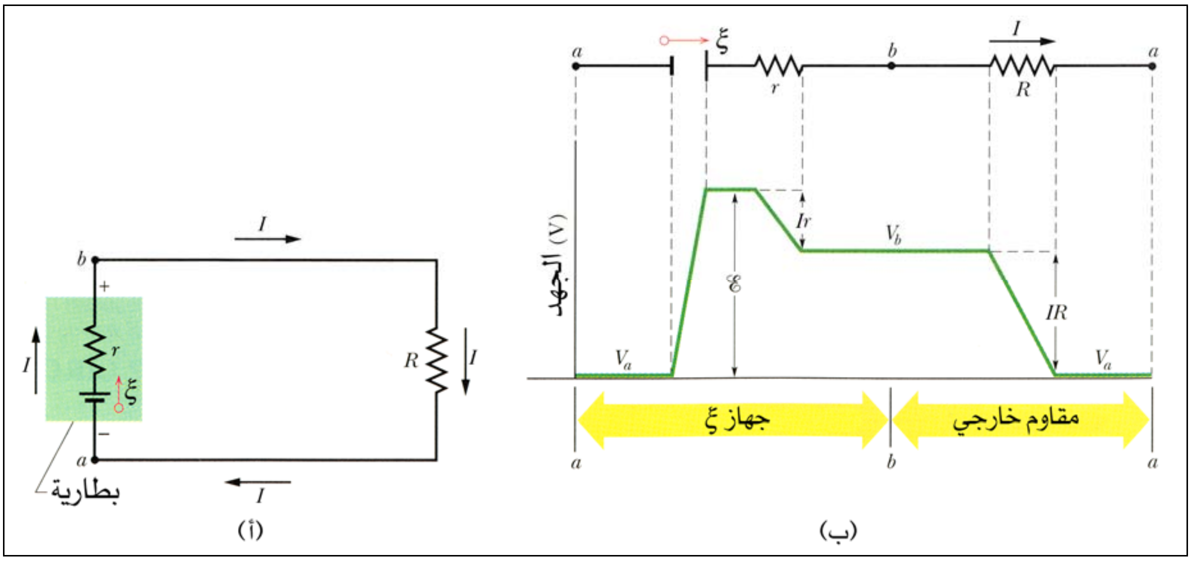
$$\xi - Ir - IR = 0 \qquad \text{(قانون كيرشوف الثاني)}$$

$$\xi = IR + Ir \qquad (٢٠\square٢)$$

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

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

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:

(٢٢□٢) $$V_b - V_a = \xi - Ir$$

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

(٢٣□٢) $$\xi I = I^2 R + I^2 r$$

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 (٢١□٢) تأخذ الشكل العام الآتي:

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

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

تطبيق (٢-٨)
Application

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

١- أوجد حسابياً مقدار التيار الكهربائي المار في الدائرة.

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:

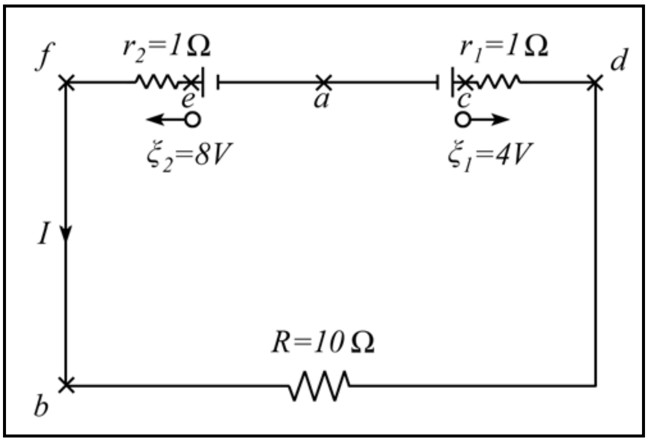
$$V_b - V_a = \xi - Ir$$
$$= 24 - (3)(1) = 21V$$

٣- أما قدرة البطارية فهي:

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

تطبيق (٢-٩)
Application

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



الشكل (١١-٢)

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:

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

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

(قانون 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:

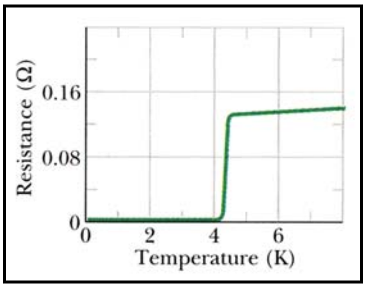
$$(V_e - V_a) + (V_b - V_e) = V_{ba}$$

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

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

٢-٨ فوق التوصيل أو فرط التوصيل *Super Conductivity*:

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



الشكل (٢-١٢) 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 *(١٢٥ 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 $(77\ K)$.

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 ($0.9\ mm$) يمر خلاله تيار كهربائي مقداره ($1.3\ A$). أوجد حسابياً سرعة الانجراف ($\vec{v}_d$) للإلكترونات الناقلة إذا علمت أن عدد الإلكترونات الناقلة يساوي ($8.47\times10^{28}\,(m^{-3})$.

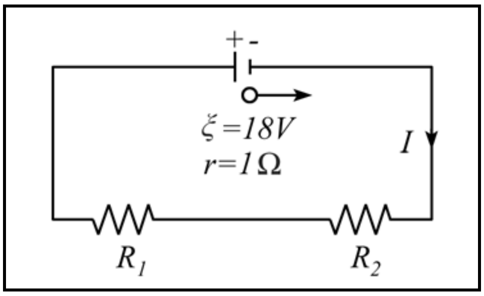
الامتحان الذاتي الثاني:

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.

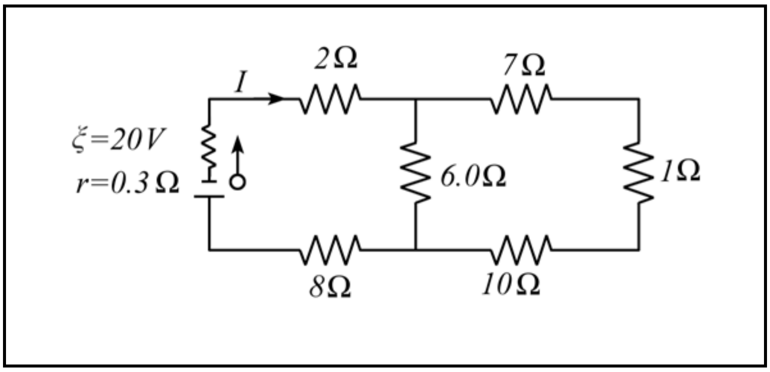
٣- أوجد حسابياً مقدار فرق الجهد الطرفي للبطارية عندما تقوم بإرسال التيار الكهربائي.



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 $(10m)$ كما يبلغ نصف قطره $(5mm)$، 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.

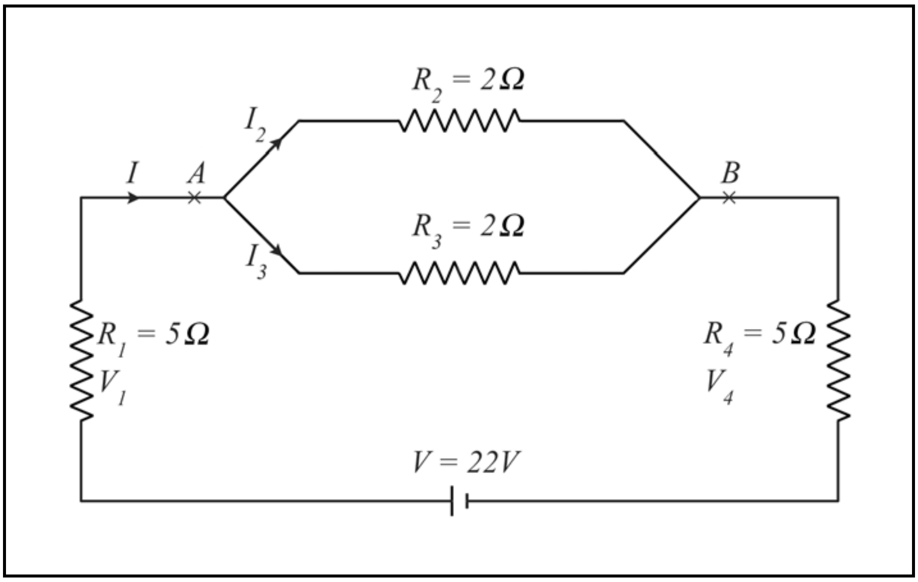
٣- شدة المجال الكهربائي حول هذا الناقل.

٤- مقاومة الناقل.

٥- ناقلية (موصلية) هذا الناقل.

الامتحان الذاتي الخامس:

تأمل الدائرة الكهربائية المبينة في الشكل (٢-١٥)، ستجد أنّ بطارية تعطي جهداً مقداره $(22V)$، تغذي أربع مقاومات.



الشكل (٢-١٥) 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).

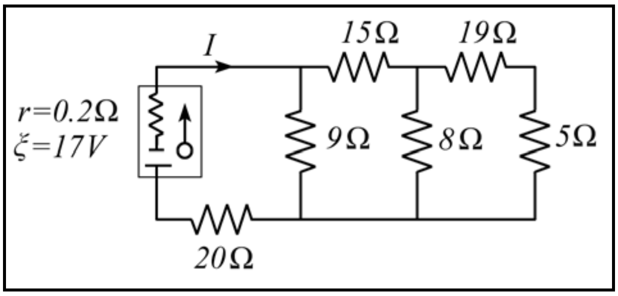
٣- أوجد حسابياً مقدار المقاومة النوعية للمقاومة (R_4)، إذا علمت أنّها مصنوعة من سلك طوله $(1m)$، ونصف قطره $(2mm)$.

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 Two Exercises & 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 ($12\ \Omega$) و($2.4\ \Omega$) موصولتان على التوالي بطرفي مولد كهربائي، مقاومته الداخلية ($r = 0.6\ \Omega$) ويعطي قوة دافعة كهربائية مقدارها ($\xi = 75\ V$) أوجد:

١- التيار الكهربائي المار في الدائرة.

٢- الهبوط في الجهد عبر المقاومة ($2.4\ \Omega$).

٣- الهبوط في الجهد عبر المقاومة ($12\ \Omega$).

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

٢-٣ يبلغ فرق الجهد الطرفي لبطارية جافة ($1.41\ V$)، ترسل تياراً قدره ($2\ A$)، أوجد مقدار مقاومتها الداخلية إذا كان فرق الجهد يساوي ($1.59\ V$) عندما تكون الدائرة مفتوحة؟

٢-٤ يبلغ مقدار مقاومة ملف موصول على التوالي مع مصباح كهربائي ($5\ \Omega$)، أوجد مقدار مقاومة المصباح الكهربائي إذا كانت شدة التيار المار فيه ($4\ A$)، وذلك عندما تُوصَّل المجموعة بمصدر فولتية مقدارها ($100\ V$)؟

٢-٥ مولد قوته الدافعة الكهربائية تساوي (١٢٠ *V*)، وفرق جهده الطرفي (١١٠ *V*)، كم هو مقدار مقاومته الداخلية عندما يرسل تياراً قدره (٢٠ *A*)؟

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 (١,٥ *mm*)، 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 ($٥٦\ cm^{٢}$). أوجد مقدار مقاومة مسافة قدرها (١٠ *km*) من هذه السكة إذا كانت المقاومة النوعية للفولاذ *resistivity* تساوي ($٣\times ١٠^{-٧}\ \Omega.m$).

٢-١٠ سلك مصنوع من مادة ناقلة للتيار الكهربائي، نصف قطره (٠,٥ *mm*)، وطوله (٤ *m*)، أما مقاومته *resistance* فتساوي (٢٥ *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 ($9\ V$) وتبلغ قدرته ($7\ W$)، بقي يعمل لمدة ($4\ h$). كم هو مقدار الشحنة الكهربائية التي استهلكها؟ أوجد ذلك حسابياً.

٢-١٣ عند مرور تيار كهربائي مقداره ($3\ A$) تتولد طاقة حرارية في المقاوم الناقل لهذا التيار مقدارها ($100\ W$) أوجد مقدار مقاومة هذا الناقل.

مسائل اختيارية

Optional Problems

٢-١ تبلغ مقاومة لفات آلة مصنوعة من النحاس عندما تكون متوقفة عن العمل $(50\ \Omega)$ عند درجة الحرارة $(20\ °C)$، بلغت هذه المقاومة $(58\ \Omega)$ 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 $(20°C)$ $(4.3\times10^{-3}\ K^{-1})$ على التوالي.

٢-٢ حزمة ثابتة من أشعة ألفا *alpha particles* شحنة الواحدة منها $(q = 2e)$، تسير بطاقة حركية ثابتة مقدارها $(20\ MeV)$، وتيار كهربائي ثابت مقداره $(0.25\ A)$.

١- إذا كانت الحزمة متوجهة إلى سطح مستوٍ وبشكل عمودي عليه، كم عدد جزيئات أشعة ألفا التي سوف تصطدم بهذا السطح خلال زمن قدره $(3\ s)$؟

٢- أوجد عدد جزيئات أشعة ألفا في مسار طوله $(20\ cm)$ 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 $(1.2\ V)$ بين طرفي سلك نحاسي طوله $(33\ m)$ وقطره $(0.1\ cm)$، 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

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:

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

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

(تيار كهربائي) *moving charge* $\leftrightarrow \vec{B} \leftrightarrow$ (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.
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 *Magnetic Field (B)* :

في الوحدة السادسة من هذا الكتاب 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:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \qquad (٣□٢)$$

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 المنتظم $(\vec{B})$، 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[1] 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:

$$\vec{F}_B = qv\,B\sin\theta \qquad (٣□٣)$$

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

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

$$\vec{F}_{B\,max} = qvB \qquad (٣□٤)$$

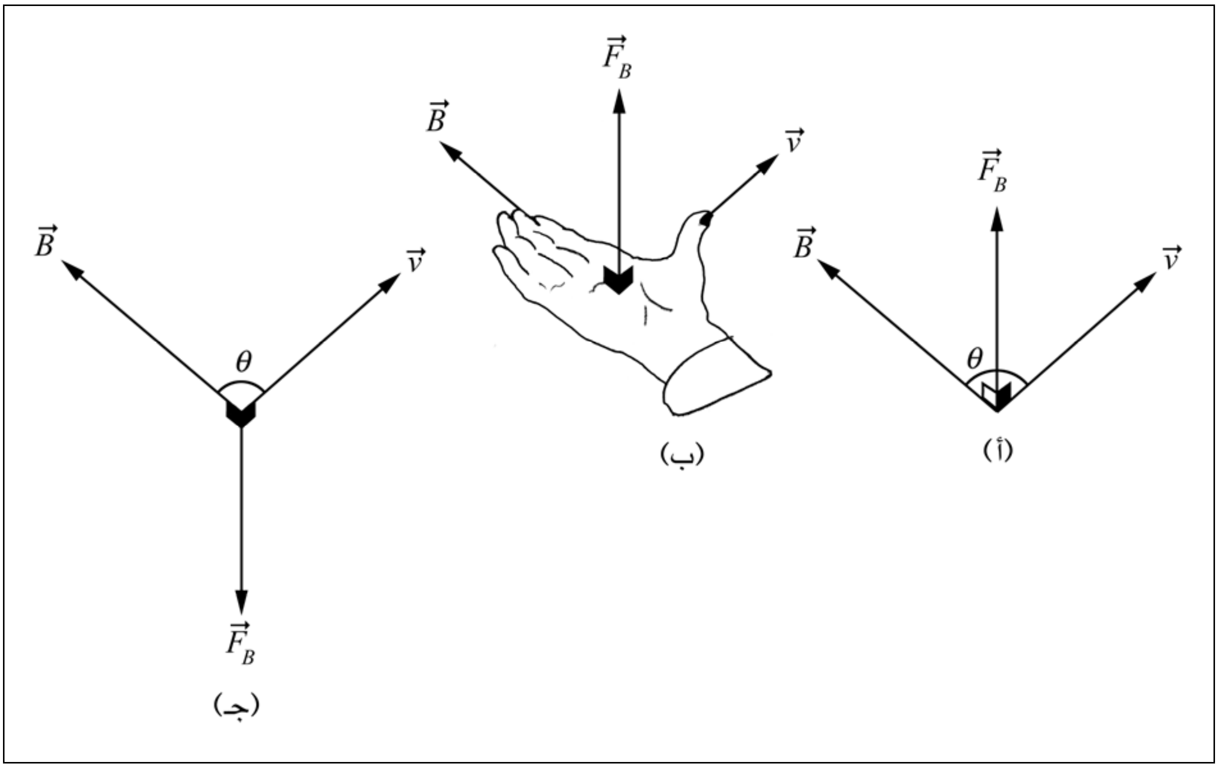
وذلك عندما تكون الزاوية $(\theta = ٩٠^{\circ})$.

---

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

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 (٦□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.

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

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

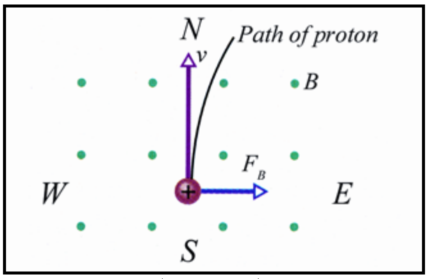
تطبيق (١-٣)
Application

في حيز مختبري يبلغ مقدار المجال المغناطيسي $(B = 1.2\,mT)$، واتجاهه عمودياً نحو الأعلى، انظر الشكل (٢-٣)، 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 (٢-٣) 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:

$$v^2 = \left[\frac{(2)(5.3\times10^6)(1.6\times10^{-19}\,J/eV)}{(1.67\times10^{-27}\,kg)}\right]$$

$$v = 3.2\times10^7\,m/s$$

$$F_B = (1.6\times10^{-19}\,C)(3.2\times10^7\,m/s)(1.2\times10^{-3}\,T)(\sin 90)$$

$$= 6.1\times10^{-15}\,N$$

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*.

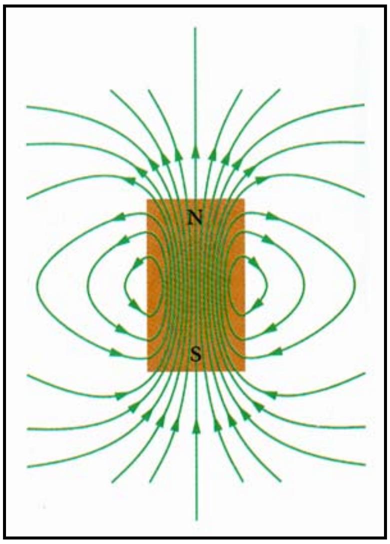
إن تمثيل المجال المغناطيسي بهذه الطريقة تعبّر عن الدلالات العلمية الآتية:

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.



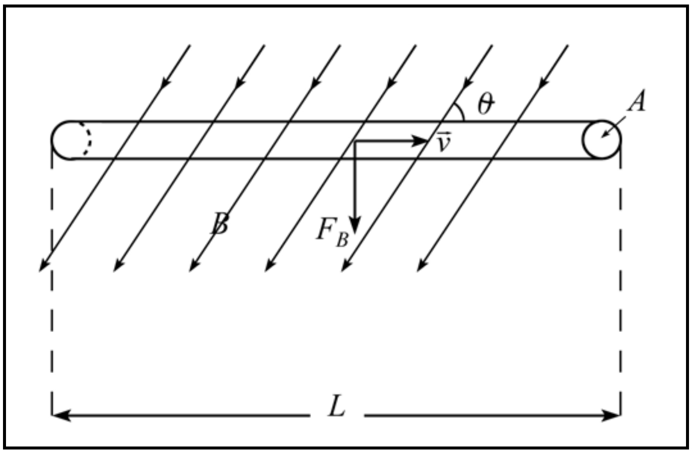
الشكل (٣-٣) يبيِّن خطوط المجال المغناطيسي لقضيب مغناطيسي،
وهي على شكل حلقات مغلقة تبدأ عند القطب المغناطيسي الشمالي *(N)* وتنتهي عند القطب الجنوبي *(S)*

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□٦)، 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 (٥□٣) نجد أنَّ:

$$F_B = ILB\sin\theta$$

وبصفة عامة نكتبها على النحو الآتي:

(٦□٣) (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 (٦□٣)، 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 (٢-٣)
Application

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 (٥□٣):

$$F_B = ILB\sin\theta$$

نجد أن:

$$I = 12\,A$$
$$L = 0.5\,m$$
$$B = 2\times10^{-2}\,T$$
$$\theta = 30^\circ$$
$$F_B = (12\,A)(0.5\,m)(2\times10^{-2}\,T)\sin 30^\circ$$
$$= 0.06\,N$$

تطبيق *Application*	**(٣-٣)**

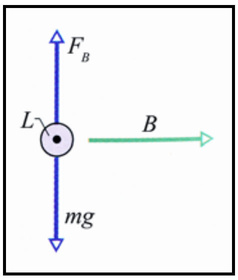
سلك نحاسي مستقيم موضوع بشكل أفقي في مجال مغناطيسي $(\vec{B})$، يمر به تيارٌ مقداره (٢٨,٠ A). أوجد حسابياً مقدار واتجاه المجال المغناطيسي $(\vec{B})$ بحيث يبقى السلك عائماً، وتوازن القوة (F_B) وزن السلك (mg)، تأمل الشكل (٣-٥)، إذا علمت أن الكثافة الطولية[1] لمادة السلك تساوي (٤٦,٦ g/m).

الحل *Solution*:

بالنظر إلى الشكل (٣-٥)، نجد أنّ وزن السلك (mg) تعادله قوة مغناطيسية (F_B) يمكن حسابها من المعادلة (٦□٣)، أي أن:

$$F_B = mg = LIB$$
$$B = \frac{mg}{LI} = \frac{(46.6\times10^{-3}kg)(9.8m/s^2)}{(1m)(28A)}$$
$$= 1.6\times10^{-2}T$$

نلاحظ أننا عوضنا عن كتلة السلك بالمقدار $(46.6\times10^{-3}\,kg)$، مستفيدين من الكثافة الطولية التي أعطيت في نص السؤال، وبمعاينة الشكل نجد أن هذا المجال المغناطيسي يتجه نحو الأعلى أي خارجاً من الورقة.



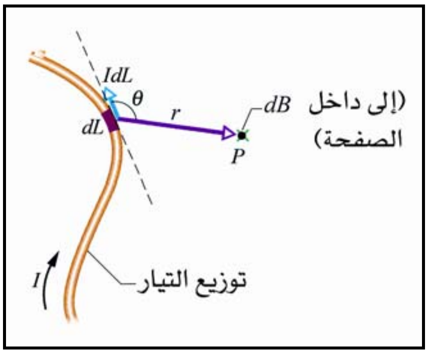
[1] الكثافة الطولية لمادة هي كتلة وحدة الأطوال، ووحدة قياسها في النظام الدولي (SI) هي (kg/m).

الشكل (٣-٥)، التطبيق (٣-٣)

٣-٤ المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي (قانون بيو- سافار)

: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 (٣-٦).



الشكل (٣-٦)

بعد ملاحظة الشكل (٣-٦) 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 (٣-٦) 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.

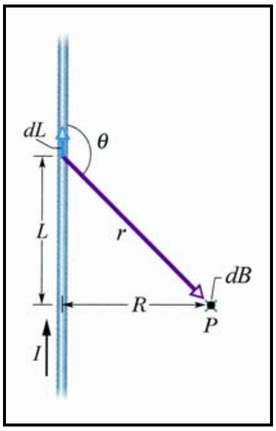
تطبيق **Application**	**(٣-٤)**

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 (٠ - ∞) 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:

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

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

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

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

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

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

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:

$$\oint \vec{B}.ds=\mu_o I \qquad (٣-٩)$$

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:

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

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

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

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

$$=\frac{-\mu_o I}{4\pi}\int_{\pi}^{o}\sin^2\theta\,d\theta=\frac{-\mu_o I}{4\pi}\left[-\cos\theta\right]_{\pi}^{0}$$

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

ملاحظة: عندما تتغير (dL) من $(-\infty\text{-}\infty)$ 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	**(٣-٥)**
Application	

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:

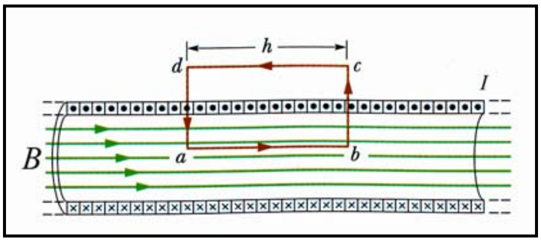
$$\oint dL=2\pi r$$

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

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

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 $(B\ =\ 0)$، 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:

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

$$\vec{B} = \mu_o I n \qquad (١١-٣)$$

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:

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

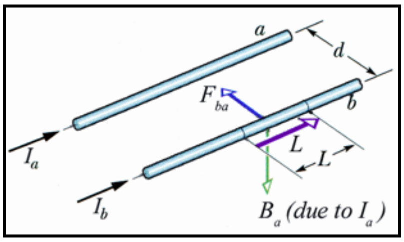
$$\boxed{B = \frac{\mu_o I N}{2\pi r}} \qquad (١٢-٣)$$

(شدة المجال B لملف حلزوني)

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

٦-٣ 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:

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

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 (٥□٣)، حيث:

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

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

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

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

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.

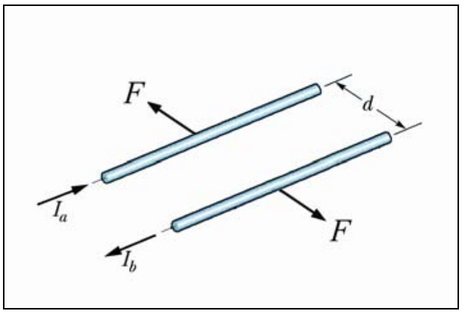
تطبيق (٦-٣)
Application

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 (١٥□٣)، 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.

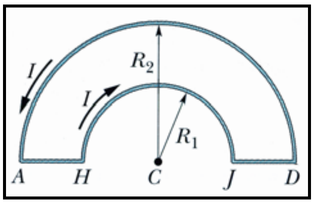
الامتحانات الذاتية

Self Test Exam

ولغرض التدريب العملي على اختبار الطالب لنفسه، والتأكد من جدارته في المقدرة الفعلية على فهم واستيعاب المجال المغناطيسي، تم تخصيص امتحانين ذاتيين.

الامتحان الذاتي الأول:

استخدم قانون بيو-سافار *Biot-Savart*، وذلك لحساب شدة المجال المغناطيسي (B) عند مركز الشكل (١١-٣) المبين بالنقطة (c)، وكما تلاحظ فإن الشكل عبارة عن نصفي دائرتين، نصف قطر الأولى (R_1)، ونصف قطر الثانية (R_2) وتلاحظ أيضاً أن المجال المغناطيسي ناشئ عن الشكل $(ADJHA)$، إذا كان مقدار التيار المار خلاله (I).



الشكل (١١-٣)

الامتحان الذاتي الثاني:

في ذرة الهيدروجين، إذا افترضنا أن الإلكترون يتحرك على مسار دائري نصف قطره $(5.3\times10^{-11}\,m)$ ويسير بسرعة خطية منتظمة $(m/s10^{6}\times v=1.3)$. 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 Three Exercises & 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 (٣,٦ 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.

٣-٦ 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:

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

Appendix الملحق (أ)

Physical Constants الثوابت الفيزيائية

المقدار	الرمز	الثابت	
$-273.15\ °C$	$0\,K$	*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

Conversion Factors عوامل تحويل

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

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* ١٠:

$$10^a \; 10^b = 10^{a+b}$$

$$10^a / 10^b = 10^{a-b}$$

$$\left(10^a\right)^b = 10^{ab}$$

الجبر *Algebra*:

- الكسور *Fractions*:

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

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

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

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

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

- جذرا المعادلة التربيعية:

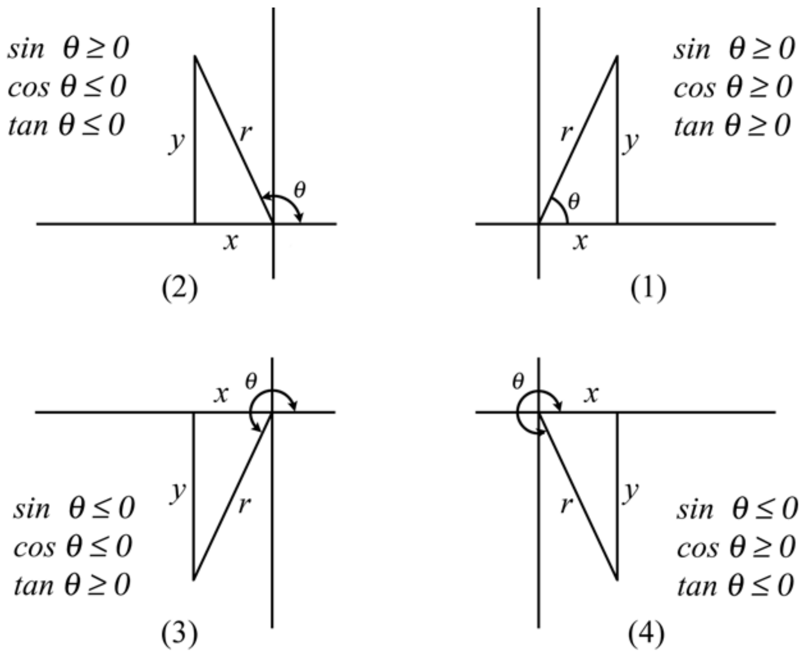
إذا كانت $ax^2 + bx + c = 0$ ، فإنّ $x = \dfrac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$.

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

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.



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

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

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

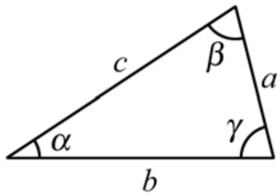
- **خواص بسيطة *Simple Properties*:**

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

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

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

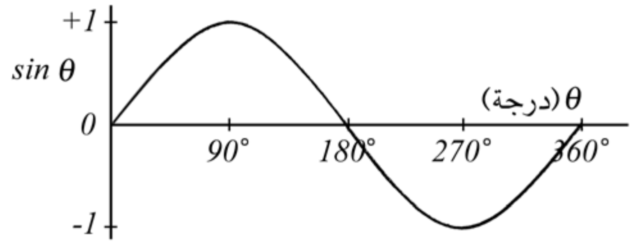
- خواص مثلث ***Properties of a triangle***:

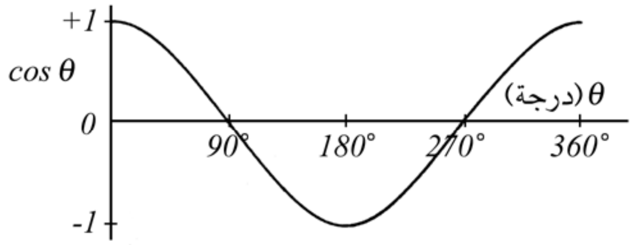


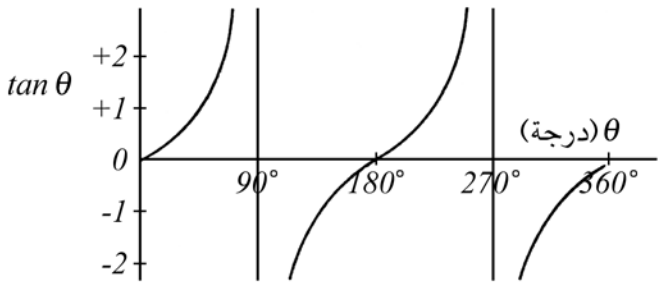
$$\alpha + \beta + \gamma = \pi$$
$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\ cos\ \alpha$$
$$b^2 = c^2 + a^2 - 2ca\ cos\ \beta$$
$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\ cos\ \gamma$$
$$\frac{a}{sin\alpha} = \frac{b}{sin\beta} = \frac{c}{sin\gamma}$$

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

- 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:

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

الملحق (ج) Appendix

الجدول الدوري للعناصر
Periodic Table Of Elements

رمز العنصر ←	كربون C 6 12.01 Carbon
← العدد الذري	
← الوزن الذري	

	أ1	أ2	ب3	ب4	ب5	ب6	ب7	ب8	ب8	ب8	ب1	ب2	أ3	أ4	أ5	أ6	أ7	أ8
1	هيدروجين H 1 1.008 Hydrogen																	هيليوم He 2 4.003 Helium
2	ليثيوم Li 3 6.94 Lithium	بريليوم Be 4 9.01 Beryllium											بورون B 5 10.8 Boron	كربون C 6 12.01 Carbon	نيتروجين N 7 14.01 Nitrogen	أوكسجين O 8 16.0 Oxygen	فلور F 9 19.0 Fluorine	نيون Ne 10 20.18 Neon
3	صوديوم Na 11 23.0 Sodium	مجنيسيوم Mg 12 24.3 Magnesium											ألومنيوم Al 13 26.98 Aluminum	سيليكون Si 14 28.1 Silicon	فوسفور P 15 31.0 Phoshorus	كبريت S 16 32.1 Sulfur	كلور Cl 17 35.5 Chlorine	أرجون Ar 18 39.9 Argon
4	بوتاسيوم K 19 39.1 Potassium	كالسيوم Ca 20 40.1 Calcium	سكانديوم Sc 21 45.0 Scandium	تيتانيوم Ti 23 47.9 Titanium	فانيديوم V 23 50.9 Vanadium	كروم Cr 24 52.0 Chromium	منجنيز Mn 25 54.9 Manganese	حديد Fe 26 55.8 Iron	كوبالت Co 27 58.9 Cobalt	نيكل Ni 28 58.7 Nickel	نحاس Cu 33 63.5 Copper	خارصين Zn 30 65.4 Zinc	جاليوم Ga 31 69.7 Gallium	جرمانيوم Ge 32 72.6 Germanium	زرنيخ As 33 74.92 Arsenic	سيلينيوم Se 34 79.0 Selenium	بروم Br 35 79.9 Bromine	كريبتون Kr 36 83.8 Kryptor
5	روبيديوم Rb 37 85.5 Rubidium	سترونتيوم Sr 38 87.6 Strontium	يتريوم Y 39 88.9 Yttrium	زركونيوم Zr 40 91.2 Zirconium	نيوبيوم Nb 41 92.9 Niobium	موليدنيوم Mo 42 95.91 Molybdenum	تكنيتيوم Tc 43 (98) Technetium	روثنيوم Ru 44 101.1 Ruthenium	روديوم Rh 45 102.9 Rhodium	بلاديوم Pd 46 106.4 Palladium	فضة Ag 47 107.9 Silver	كادميوم Cd 48 112.4 Cadmium	إنديوم In 49 114.8 Indium	قصدير Sn 50 118.7 Tin	أنتيمون Sb 51 121.75 Antimony	تيلوريوم Te 52 127.6 Tellurium	يود I 53 126.9 Iodine	زينون Xe 54 131.3 Xenon
6	سيزيوم Cs 55 132.9 Cesium	باريوم Ba 56 137 Barium	لانثانيوم La 57 138.9 Lanthanum	هافنيوم Hf 72 178.5 Hafnium	تانتالوم Ta 73 180.9 Tantalum	تنجستن W 74 183.9 Wolfram	رينيوم Re 75 186.2 Rhenium	أوزميوم Os 76 190.2 Osmium	أريديوم Ir 77 192.2 Iridium	بلاتين Pt 78 195.1 Platinum	ذهب Au 79 197.0 Gold	زئبق Hg 80 200.6 Mercury	ثاليوم Tl 81 204.4 Thallium	رصاص Pb 82 207.2 Lead	بزموث Bi 83 209.0 Bismuth	بولونيوم Po 84 (209) Plonoium	أستاتين At 85 (210) Astatine	رادون Rn 86 222 Radon
7	فرانثيوم Fr 87 223 Francium	راديوم Ra 88 226 Radium	أكتينيوم Ac 89 227 Actinium	رذرفورديوم Rf 104 (261) Rutherfordium	دوبنيوم Db 105 (262) Dubnium	سيرجيوم Sg 106 (263) Seabergium	بوهريوم Bh 107 Bohrium	هاسيوم Hs 108 Hasium	ميتنريوم Mt 109 Meitnerium									

6 اللانثانيدات	سيريوم Ce 58 140.1 Cerium	براسيوديميوم Pr 59 140.9 Praseodymium	نيوديميوم Nd 60 144.2 Neodymium	بروميثيوم Pm 61 (145) Promethium	ساماريوم Sm 62 150.4 Samarium	يوروبيوم Eu 63 152.0 Europium	جادولينيوم Gd 64 157.3 Gadolinium	تربيوم Tb 65 158.9 Terbium	دسبروزيوم Dy 66 162.5 Dysprosium	هولميوم Ho 67 164.9 Holmium	اربيوم Er 68 167.3 Erbium	ثوليوم Tm 69 168.9 Thulium	يتربيوم Yb 70 173.0 Ytterbium	لوتيتيوم Lu 71 175.0 Lutetium
7 الأكتينيدات	ثوريوم Th 90 232.0 Thorium	بروتكتينيوم Pa 91 231 Protactinium	يورانيوم U 92 238.0 Uranium	نبتونيوم Np 93 237 Neptunium	بلوتونيوم Pu 94 (244) Plutonium	أمريكيوم Am 95 (243) Americium	كوريوم Cm 96 (247) Curium	بركليوم Bk 97 (247) Berkelium	كاليفورنيوم Cf 98 (251) Californium	إينشتانيوم Es 99 (254) Einsteinium	فرميوم Fm 100 (257) Fermium	مندليفيوم Md 101 (258) Mendelevium	نوبليوم No 102 (259) Nobelium	لورنسيوم Lr 103 (260) Lawrencium

صلب   سائل   غاز

الملحق (د) *Appendix*

حلول الامتحانات الذاتية

حلول الامتحانات الذاتية للوحدة الأولى

حل الامتحان الذاتي الأول :

لنرمز لمعدل السريان كما هو مستخدم في معظم المراجع: Q

$$Q \propto \left(\frac{P}{l}\right) \eta \; r$$

$$Q = K \left(\frac{P}{l}\right)^{\alpha} \eta^{\beta} \; r^{\gamma}$$

وبالتعويض عن هذه الكميات بمعادلات أبعادها نحصل على:

$$[M]^0 [L]^3 [T]^{-1} = \quad K\{[M]\{L][T]^{-2} [L]^{-2} [L]^{-1}\}^{\alpha} \{[M][L]^{-1} [T]^{-1}\}^{\beta} [L]^{\gamma}$$

$$[M]^{\alpha} [L]^{-2\alpha} [T]^{-2\alpha} [M]^{\beta} [L]^{-\beta} [T]^{-\beta} [L]^{\gamma}$$

$$[M]^{\alpha+\beta} [L]^{-2\alpha-\beta+\gamma} [T]^{-2\alpha-\beta}$$

وبمقارنة أسس الكميات الأساسية في طرفي المعادلة، نجد أنّ:

$$\alpha + \beta = 0 \Rightarrow \alpha = -\beta \qquad (١)$$

$$-2\alpha - \beta + \gamma = 3 \qquad (٢)$$

$$-2\alpha - \beta = -1 \Rightarrow -2\alpha + \alpha = -1 \qquad (٣)$$

من المعادلة رقم (٣)، نجد أنّ :

$$-\alpha = -1 \Rightarrow \alpha = 1$$

وبتعويض مقدار (α) في المعادلة رقم (١)، نجد أنّ:

$$\therefore \quad \beta = -1$$

وأخيراً بتعويض كلٍ من (α) و (β) في المعادلة رقم (٢)، نجد أنَّ:

$$-2 + 1 + \gamma = 3$$

$$-1 + \gamma = 3 \Rightarrow \gamma = 4$$

$$\therefore Q = K\left(\frac{P}{l}\right)^{1} \eta^{-1} r^{4}$$

$$\boxed{Q = K\frac{Pr^4}{l\eta}}$$

حلول الامتحانات الذاتية للوحدة الثانية

حل الامتحان الذاتي الأول:

إنّ سرعة انجراف (تدفق) الإلكترونات يمكن إيجادها من العلاقة:

$$v_d = \frac{J}{ne}$$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{1.3A}{\pi(0.9\times10^{-3}m)^2} = 5.1\times10^5(A/m^2)$$

لاحظ هنا أن مساحة المقطع (A) هي عبارة عن مساحة دائرة:

$$A = \pi r^2$$

$$\therefore \quad v_d = \frac{5.1\times10^5(A/m)^2}{\left(8.47\times10^{28}\frac{electrons}{m^3}\right)\left(1.6\times10^{-19}\frac{C}{electrons}\right)}$$

$$= 3.8\times10^{-5}(m/s)$$

$$= 3.8\times10^{-3}(cm/s)$$

حل الامتحان الذاتي الثاني:

١-

$$I = \frac{\sum \xi}{\sum R}$$

$$= \frac{18V}{(12+5+1)\Omega} = \frac{18V}{18\Omega}$$

$$= 1A$$

٢-

$$V_1 = IR_1 = (1A)\times(12\,\Omega) = 12\ volt$$

$$V_2 = IR_2 = (1A)\times(5\,\Omega) = 5\ volt$$

٣- فرق الجهد الطرفي، هو القيمة الحقيقية لفرق الجهد بين قطبي البطارية في حالة إرسالها للتيار الكهربائي، إذ يتم من الناحية العملية فقدان مقدار من الجهد داخل البطارية عندما ترسل التيار الكهربائي بسبب مقاومتها الداخلية، نلاحظ أنَّ المقاومة الداخلية في هذه المسألة هي (r) وتساوي $(1\ \Omega)$.

$V_{ab} =$ فرق الجهد الطرفي ⇐

$$V_{ab} = \xi - Ir$$
$$= 18V - (1A)(1\Omega) = 17\,volt$$

حل الامتحان الذاتي الثالث:

كل من المقاومات (7Ω) و (1Ω) و (10Ω) موصولة على التوالي، إذاً، المقاومة المكافئة لها هي:

$$7 + 1 + 10 = 18\,\Omega$$

وهي موصولة على التوازي مع المقاومة (6Ω) ومحصلتها:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{18} + \frac{1}{6} = \frac{24}{108}$$
$$R_{eq} = \frac{108}{24} = 4.5\Omega$$

وهي، أي (R_{eq}) موصولة على التوالي مع كلٍ من المقاومات $(0.3\Omega, 8\Omega, 2\Omega)$.

$$R_{tot} = 4.5\Omega + 2\Omega + 8\Omega + 0.3\Omega$$
$$= 14.8\Omega$$
$$I = \frac{\xi}{R_{tot}} = \frac{20V}{14.8\Omega} = 1.35A$$

حل الامتحان الذاتي الرابع:

١- إنَّ كثافة التيار الكهربائي المار خلال السلك هي:

$$J = \frac{I}{A}$$
$$A = \pi r^2 = \pi \left(5 \times 10^{-3}\,m\right)^2 = 7.854 \times 10^{-5}\,m^2$$
$$J = \frac{1.5\,A}{7.854 \times 10^{-5}\,m^2} = 1.9 \times 10^4\,(A/m^2)$$

٢- سرعة الانسياق تساوي:

$$v_d = \frac{J}{ne}$$
$$= \frac{1.9 \times 10^4\,(A/m^2)}{\left(5.9 \times 10^{28}\,m^{-3}\right)\left(1.6 \times 10^{-19}\,C\right)} = 2.023 \times 10^{-6}\;(m/s)$$

٣- شدة المجال الكهربائي تساوي:

$$E = \rho J$$
$$= (1.62\times10^{-8}\ \Omega.m)(1.9\times10^{4}\ A/m^{2})$$
$$= 3.078\times10^{-4}\ (V/m)$$

٤- مقاومة الناقل هي:

$$R = \rho\frac{L}{A}$$
$$= (1.62\times10^{-8}\ \Omega.m)\ \frac{(10\,m)}{(7.854\times10^{-5}\ m^{2})}$$
$$= 2.063\times10^{-3}\ \Omega$$

٥- أما ناقلية هذا الموصل فهي:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$
$$= \frac{1}{(1.62\times10^{-8}\ \Omega.m)} = 6.173\times10^{7}\ (\Omega.m)^{-1}$$

حل الامتحان الذاتي الخامس:

١- نلاحظ أنَّ المقاومتين (R_2) و (R_3) مربوطتان على التوازي، والمقاومة المكافئة لهما هي:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$
$$= \frac{1}{2\Omega} + \frac{1}{2\Omega} = \frac{2}{2\Omega}$$
$$\therefore\ \ R_{eq} = 1\Omega$$

نلاحظ أنّ مجموع المقاومات في الدائرة هو:

$$R = R_1 + R_{eq} + R_4$$
$$= 5\Omega + 1\Omega + 5\Omega = 11\Omega$$
$$\therefore\ \ I = \frac{V}{R} = \frac{22V}{11V} = 2A$$

٢- لحساب مقدار شدة التيار المار في المقاومة (R_3) نحتاج إلى معرفة فرق الجهد بين النقطتين (A) و (B)، حيث يمكن حسابه على الشكل الآتي:

$$V_{AB} = I\,R_{eq} = \left(\frac{V}{R_1 + R_{eq} + R_4}\right) R_{eq}$$
$$= 2A(1\Omega) = 2V$$
$$\therefore \quad I_3 = \frac{V_{AB}}{R_3} = \frac{2V}{2\Omega} = 1\,A$$

٣- أما مقدار المقاومة النوعية للمقاومة (R_4)، فيمكننا حسابه من العلاقة الرياضية بين المقاومة والمقاومة النوعية، على النحو الآتي:

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

حيث إنّ:

$$R = 5\,\Omega$$
$$L = 1\,m$$
$$A = \pi\,r^2 = \pi\left(2\times10^{-3}\,m\right)^2 = 1.26\times10^{-5}\,m^2$$
$$\rho = (5\Omega)\frac{(1.26\times10^{-5}\,m^2)}{1\,m}$$
$$= 6.28\times10^{-5}\;\Omega.m$$

حلول الامتحانات الذاتية للوحدة الثالثة

حل الامتحان الذاتي الأول:

إن الصيغة الرياضية لقانون بيو-سافار هي:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I\, d\vec{L} \times \vec{r}}{r^3}$$

١- نلاحظ أولاً أن القطعتين المستقيمتين (AH) و(JD) يمر بكل منهما تيارين مختلفين في الاتجاه ومتساويين في المقدار، وهذا ما يؤكد لنا أن المجالين المغناطيسيين الناشئين عن كل قطعة، متساويان في المقدار ومتعاكسان في الاتجاه أيضاً، والخلاصة أن كلاً من القطعتين لا تسهمان في المجال المغناطيسي عند النقطة (c).

٢- إن المجال الناشئ عن نصف الدائرة الأولى، عند النقطة (c) هو:

$$B_{c1} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \int \frac{I\, d\vec{L}_1 \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0\, I}{4\pi} \int \frac{R_1\, d\vec{L}}{R_1^3}$$

$$d\vec{L} \times \vec{r} = r\, ds \sin(90) = r\, dL$$

$$\int \frac{R_1\, dL}{R_1^3} \int \frac{dL}{R_1^2} = \frac{1}{R_1^2} \int dL = \frac{\pi\, R_1}{R_1^2} = \frac{\pi}{R_1}$$

$$B_{c1} = \left(\frac{\mu_0\, I}{4\pi}\right)\left(\frac{\pi}{R_1}\right) = \frac{-\mu_0\, I}{4R_1}$$

وهكذا نجد أن المجال الناشئ عن النصف الثاني ذي نصف القطر (R_2):

$$B_{c2} = \frac{\mu_0\, I}{4R_2}$$

$$B_c = B_{c1} + B_{c2} = \frac{\mu_0\, I(R_2 - R_1)}{4\, R_1\, R_2}$$

مع ملاحظة أنّ اتجاه شدة المجال إلى داخل الصفحة.

حل الامتحان الذاتي الثاني:

إن اتجاه المجال المغناطيسي يكون عمودياً على السرعة الخطية للإلكترون، ويمكن حساب القوة المغناطيسية في هذه الحالة من العلاقة الرياضية:

$$F_B = q\, \vec{v} \times \vec{B} = q\, v\, B\, \sin(90) = q\, v\, B$$

كما يمكننا إيجاد تسارع الإلكترون من العلاقة الرياضية لقانون نيوتن الثاني:

$$F_B = m_e a$$
$$a = \frac{F_B}{m_e}$$

وبما أن مسار الإلكترون دائري، يمكننا إيجاد تسارعه بدلالة كلٍ من السرعة الخطية ونصف قطر المسار، إذن:

$$a = \frac{v^2}{r^2}$$
$$B = \frac{F_B}{qv} = \frac{m_e v^2}{e\, r\, v} = \frac{m_e v}{er}$$
$$= \frac{(9.11\times 10^{-31}\,kg)(1.3\times 10^{6}\,m/s)}{(1.6\times 10^{-19}\,C)(5.3\times 10^{-11}\,m)} = 1.39\times 10^{4}\,T$$

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.