شارح: القوة الدافعة الكهربية والمقاومة الداخلية

في هذا الشارح، سوف نتعلَّم كيف نُوجِد العلاقة بين القوة الدافعة الكهربية للبطارية وجهدها الطرفي ومقاومتها الداخلية.

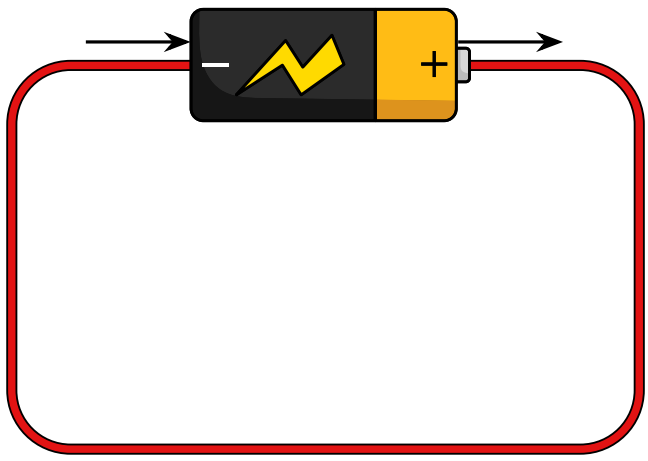
يُعتَقد عادةً أن البطاريات تَمُد المكوِّنات الأخرى في الدائرة بفرق جهد من أجل توليد تيار في هذه المكوِّنات. هذا صحيح. لكن صحيح أيضًا أن البطارية تولِّد فرق جهد عبر نفسها لتوليد تيار يمر عبرها.

افترض أن هناك بطارية تولِّد فرق الجهد V عبر طرفَيْها. عندما يتم توصيل طرفَي البطارية الموجب والسالب معًا بواسطة سلك، تكون الدائرة مغلقة. يتولَّد نتيجة لذلك في الدائرة تيار مستمر شدته I. وتُحسَب شدة التيار في السلك بالمعادلة:

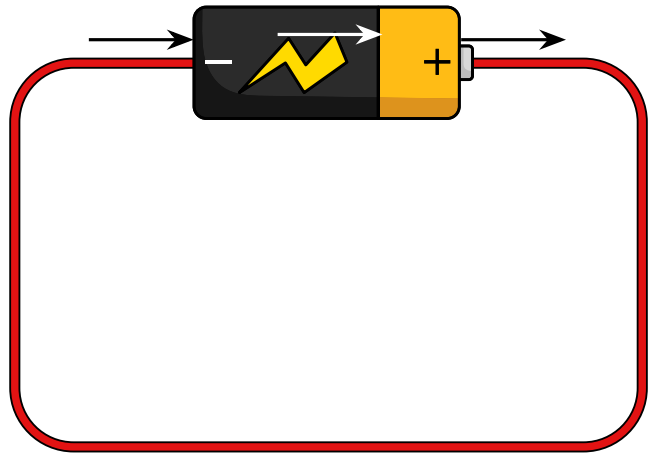
$$I = \frac{V}{R},$$

حيث R هو مقاومة الدائرة.

اتجاه التيار يكون من الطرف الموجب إلى الطرف السالب. في دائرة موصلة على التوالي، تكون شدة التيار عند جميع نقاط الدائرة متساوية. هذا يعني أنه لا بد أن تكون شدة التيار الخارج من الطرف الموجب والداخل إلى الطرف السالب متساويتين. هذا موضَّح في الشكل الآتي:



نلاحِظ أنه لا بد أن يكون هناك أيضًا تيار في البطارية مساوٍ في الشدة للتيار عند طرفَيْها. هذا موضَّح في الشكل الآتي:



نعرف أن:

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

عند توصيل مقاومتين R_1 وR_2 على التوالي، فإن مقاومتيهما الكلية $R_{\text{الكلية}}$ تُعطى بالمعادلة:

$$R_{\text{الكلية}} = R_1 + R_2.$$

نجد بعد ذلك أن $R_{\text{الكلية}}$ للدائرة التي تتكوَّن من سلك وبطارية لا بد أن تساوي مجموع مقاومة السلك ومقاومة البطارية. يمكننا أن نسمِّي مقاومة السلك R ومقاومة البطارية r.

يمكن إعادة ترتيب المعادلة:

$$I = \frac{V}{R_{\text{الكلية}}},$$

لجعل V في طرف بمفرده، لنحصل على:

$$V = IR_{\text{الكلية}}.$$

يمكن التعبير عن فرق الجهد عبر الدائرة بالمعادلة:

$$V = I\left(R + r\right).$$

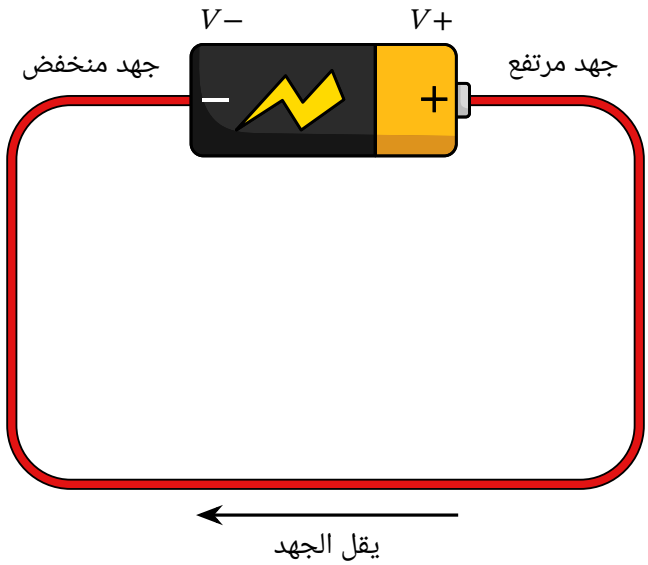
يُطلَق على R المقاومة الخارجية (وتُسمَّى أيضًا الحمل)، ويُطلَق على r المقاومة الداخلية.

يمكن التعبير عن فرق الجهد V بالمعادلة:

$$V = \frac{W}{Q},$$

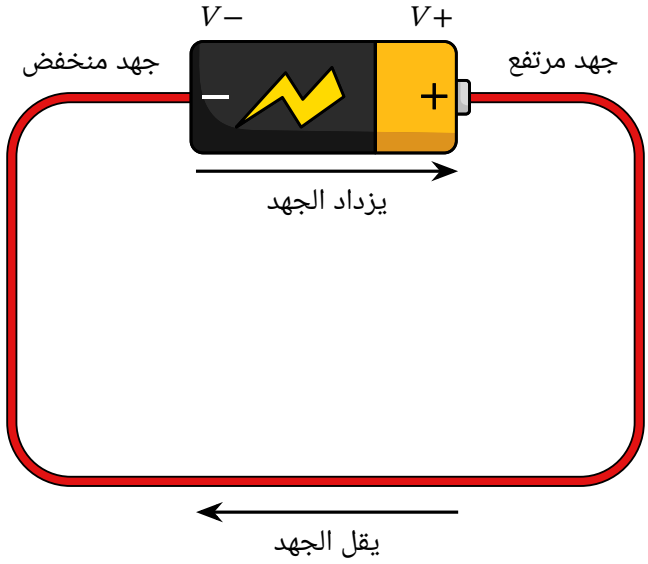
حيث W هو الشغل المبذول بواسطة فرق الجهد على الشحنة Q عبر الدائرة.

الفرق في الجهد عبر طرفَي سلك يمثِّل انخفاض الجهد عبر السلك. كما هو موضَّح في الشكل الآتي:

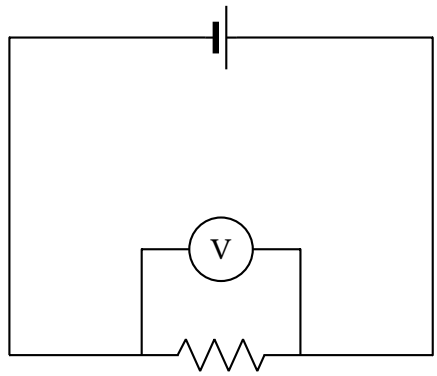


إن فرق الجهد الذي تنتجه بطارية عبر سلك يساوي الشغل المبذول لكل كولوم من الشحنات التي تتحرَّك عبر السلك من أحد طرفَي البطارية إلى الطرف الآخر. يقل الجهد على طول السلك.

وكذلك عند التحرُّك عبر السلك، لا بد أن تبذل البطارية شغلًا لتحريك الشحنات. وعندما يحدث ذلك، تزيد طاقة وضع الشحنات بدلًا من أن تقل. في هذه الحالة، لا بد أن يزداد الجهد على طول البطارية. هذا موضَّح في الشكل الآتي:

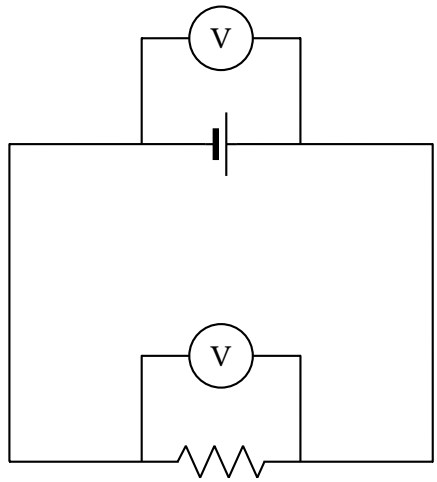


في كثير من التطبيقات، يمكن تمثيل الدائرة التي تحتوي على بطارية على أن لها مقاومة خارجية فقط. يمكن قياس فرق الجهد عبر دائرة كهربية خارجية باستخدام فولتميتر متصل على التوازي مع المقاومة في الدائرة الكهربية، كما هو موضَّح في الشكل الآتي:



من المهم ملاحظة أن الأسلاك التي تصل بين البطارية، والمقاومة، والفولتميتر تمثَّل على أن لها مقاومة ضئيلة للغاية.

قد يُتوقَّع أن يقيس الفولتميتر فرق الجهد عبر بطارية عن طريق توصيل الفولتميتر بالبطارية الموضَّحة في الشكل الآتي:



لكن هذه الدائرة الكهربية لا تقيس فرق الجهد عبر البطارية. ويقيس كلا الفولتميترين في الدائرة القيمة نفسها، وهي فرق الجهد عبر الدائرة الخارجية.

فإذا أردنا قياس فرق الجهد عبر طرفَي البطارية، بالنسبة إلى الشحنات التي تتحرَّك داخل البطارية، فلا بد أن يقيس الفولتميتر الشغل المبذول على الشحنات التي تتحرَّك عبر البطارية وليس عبر الدائرة الخارجية.

نلاحظ هنا أن كلا الفولتميترين في الدائرة لا يمكن أن يقيس فرق الجهد عبر البطارية. يبدو أن هذا يعني أنه لا تُوجَد طريقة لمعرفة قيمة المقاومة الداخلية للبطارية أو فرق الجهد عبرها. في الواقع، من الممكن تحديد هاتين القيمتين عن طريق إجراء أكثر من قياس.

باعتبار البطارية مكوَّنًا في دائرة لها مقاومة خارجية R، فإننا نلاحظ أنه لا بد من وجود انخفاض في الجهد، $V_{\text{البطارية}}$، عبر البطارية. وهذا مُعطى بالمعادلة:

$$V_{\text{البطارية}} = Ir,$$

حيث I هو شدة التيار في الدائرة.

نتناول الآن المعادلة:

$$V = I(R + r),$$

حيث V هو فرق الجهد عبر المقاومة الخارجية، الذي يمكن قياسه باستخدام الفولتميتر.

ويمكن كتابة هذا على الصورة:

$$V = IR + Ir$$
$$V = IR + V_{\text{البطارية}}.$$

لاستخدام الفولتميتر لقياس فرق الجهد الكلي للبطارية، لا بد أن يساوي $V_{\text{البطارية}}$ صفرًا.

لا بد أن تساوي $V_{\text{البطارية}}$ صفرًا إذا كانت قيمة I صفرًا. وهذا يُعطينا المعادلة:

$$V = IR + 0$$
$$V = IR.$$

يُشير V إلى إجمالي فرق جهد البطارية الذي يبذل شغلًا في الدائرة الخارجية.

لسوء الحظ، إذا كانت قيمة I صفرًا، فإن المعادلة:

$$V = IR$$

تصبح كالآتي:

$$V = 0 \times R.$$

ويبدو أن هذا يُشير إلى أن الطريقة الوحيدة التي يمكن أن يقيس بها الفولتميتر فرق الجهد الكلي للبطارية هي إذا كان فرق الجهد يساوي صفرًا. يبدو أن هذا أمرٌ لا مفر منه، فالبطارية التي لها فرق جهد لا يساوي صفرًا ستولِّد تيارًا لا يساوي صفرًا، وبهذا فإن قيمة $V_{\text{البطارية}}$ لن تساوي صفرًا.

لكن هذا الاستنتاج غير صحيح. وسنعرف لاحقًا في هذا الشارح سبب كون هذا الاستنتاج غير صحيح. ومع ذلك، فإن فهم سبب خطأ الاستنتاج يستلزم منا التفكير في المعادلة مرةً أخرى:

$$V = IR + Ir.$$

لقد علمنا أن القراءة التي يوضِّحها الفولتميتر تساوي IR. وبما أننا نعلم أن مجموع فرق الجهد عبر الدائرة الخارجية وفرق الجهد عبر البطارية يساوي فرق الجهد الكلي، إذن يمكننا كتابة المعادلة الآتية:

$$V_{\text{الكلية}} = V_{\text{فولتميتر}} + V_{\text{البطارية}}.$$

تُوجَد أسماء محدَّدة للكميات في هذه المعادلة. يُسمَّى $V_{\text{البطارية}}$ الجهد المفقود، ويُسمَّى $V_{\text{فولتميتر}}$ الجهد الطرفي، ويُسمَّى $V_{\text{الكلية}}$ القوة الدافعة الكهربية.

كل هذه الكميات مقيسة بوحدة الفولت. يُرمَز إلى القوة الدافعة الكهربية بالرمز ε. القوة الدافعة الكهربية ليست قوة، على الرغم من اسمها، بل فرق جهد.

صيغة: القوة الدافعة الكهربية لبطارية

القوة الدافعة الكهربية ε لبطارية جهدها الطرفي V تُعطى بالمعادلة:

$$\varepsilon = V + Ir,$$

حيث I هو شدة التيار في البطارية، r هو المقاومة الداخلية للبطارية.

نتناول الآن مثالًا على إيجاد القوة الدافعة الكهربية لبطارية.

مثال ١: تحديد القوة الدافعة الكهربية لبطارية

تُزوَّد دائرة بالقدرة بواسطة بطارية جهدها الطرفي يساوي 2.5 V. تحتوي الدائرة على مقاومة قيمتها 3.5 Ω، والمقاومة الداخلية للبطارية تساوي 0.65 Ω. ما مقدار القوة الدافعة الكهربية للبطارية؟ اكتب إجابتك لأقرب منزلة عشرية.

الحل

القوة الدافعة الكهربية ε تُعطى بالمعادلة:

$$\varepsilon = V + Ir,$$

حيث V هو الجهد الطرفي للبطارية، r هو المقاومة الداخلية للبطارية، I هو شدة التيار في الدائرة.

بالتعويض بالقيم المعلومة في هذه المعادلة، نحصل على:

$$\varepsilon = 2.5 + 0.65I.$$

نلاحظ أن I غير مُعطاة، ولذلك لن نتمكَّن بعدُ من تحديد ε.

لعلنا نتذكَّر أن الجهد الطرفي يُعطى بالمعادلة:

$$V = IR.$$

يمكن إعادة ترتيب هذه المعادلة لجعل I في طرف بمفردها، لنحصل على:

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

بالتعويض بالقيم المعلومة في هذه المعادلة، نحصل على:

$$I = \frac{2.5\ \text{V}}{3.5\ \Omega} = \frac{2.5}{3.5}\ \text{A}.$$

يمكن التعويض بقيمة I في:

$$\varepsilon = 2.5 + 0.65I$$

لنحصل على:

$$\varepsilon = 2.5 + 0.65 \times \frac{2.5}{3.5}.$$

بتقريب قيمة ε لأقرب منزلة عشرية، نحصل على $\varepsilon = 3.0\ \text{V}$.

نتناول الآن مثالًا على إيجاد المقاومة الداخلية للبطارية.

مثال ٢: إيجاد المقاومة الداخلية للبطارية

بطارية قوتها الدافعة الكهربية تساوي 4.50 V موصَّلة بدائرة بها مقاومة قيمتها 2.75 Ω. شدة التيار المار في الدائرة 1.36 A. ما المقاومة الداخلية للبطارية؟ أوجد الإجابة لأقرب منزلتين عشريتين.

الحل

القوة الدافعة الكهربية ε للبطارية تُعطى بالمعادلة:

$$\varepsilon = V + Ir,$$

حيث V هو الجهد الطرفي للبطارية، r هو المقاومة الداخلية للبطارية، I هو شدة التيار في الدائرة.

يمكن إعادة ترتيب هذه المعادلة، لجعل r في طرف بمفردها، كالآتي.

$$\begin{aligned}\varepsilon &= V + Ir\\ \varepsilon - V &= Ir\\ \frac{\varepsilon - V}{I} &= r\\ r &= \frac{\varepsilon - V}{I}.\end{aligned}$$

بالتعويض بالقيم المعلومة في هذه المعادلة، نحصل على:

$$r = \frac{4.50 - V}{1.36}.$$

نلاحظ أن V غير مُعطاة، إذن لن نتمكَّن من إيجاد r بعدُ.

ولكننا نتذكَّر أن الجهد الطرفي يُعطى بالمعادلة:

$$V = IR.$$

بالتعويض بالقيم المعلومة في هذه المعادلة، نحصل على:

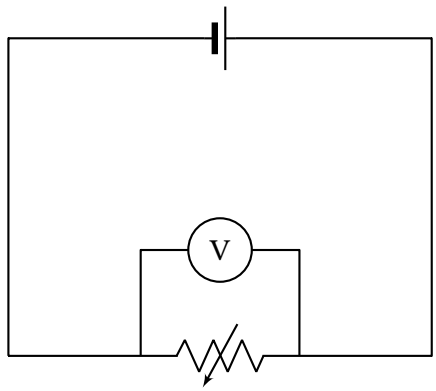
$$V = 1.36\ \text{A} \times 2.75\ \Omega = 3.74\ \text{V}.$$

بالتعويض بقيمة V، نحصل على:

$$r = \frac{4.50 - 3.74}{1.36},$$

وبتقريب قيمة r لأقرب منزلتين عشريتين، نحصل على: $r = 0.56\ \Omega$.

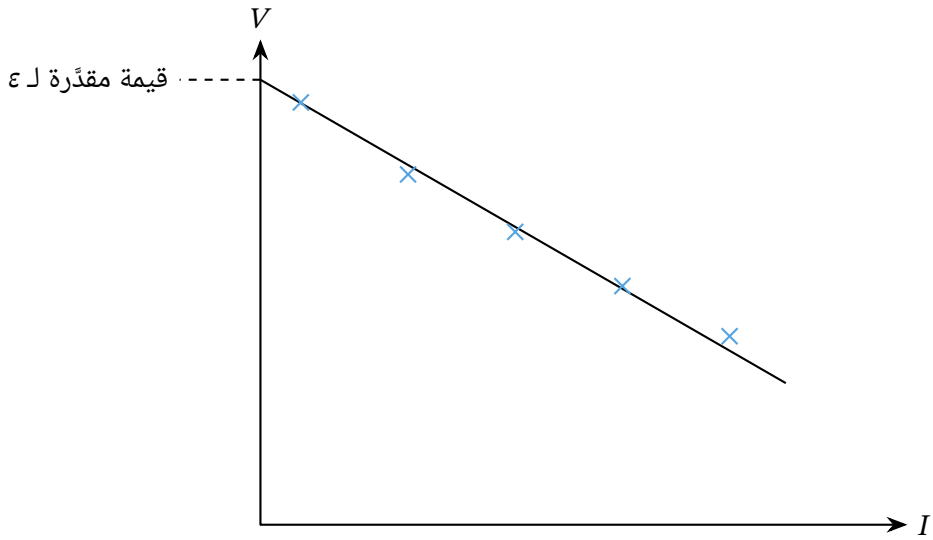
يمكن استخدام دائرة كالموجودة في الشكل الآتي لإيجاد القوة الدافعة الكهربية والمقاومة الداخلية لبطارية.



يقيس الفولتميتر في الدائرة الجهد الطرفي للبطارية. تسمح المقاومة المتغيِّرة في الدائرة بتغيير قيمة المقاومة في الدائرة. تغيير مقاومة الدائرة يغيِّر شدة التيار في الدائرة. ومن ثَمَّ، يمكن قياس قيمة الجهد الطرفي لقيم مختلفة لشدة التيار.

يمكن رسم القيم المقيسة على تمثيل بياني.

كلما قلَّت قيمة I، زادت قيمة V. لا يمكن إيجاد قيمة I عند $V = 0$ من قراءة الفولتميتر، ولكن يمكن تقديرها باستخدام قياسات الفولتميتر عند $I > 0$. وهذا موضَّح في الشكل الآتي:



يوضِّح التمثيل البياني خطًّا مستقيمًا يقطع المحور y عند ε. وللخط ميل سالب.

يمكن كتابة معادلة الخط المستقيم في التمثيل البياني على الصورة:

$$y = mx + c,$$

حيث m هو ميل المنحنى، وc هو الجزء المقطوع من المحور y.

التمثيل البياني المستخدَم لحساب ε له قيم I على المحور x، وقيم V على المحور y. وهذا يوضِّح لنا أن معادلة خط هذا التمثيل البياني هي:

$$V = mI + \varepsilon$$
$$V = \varepsilon + mI$$
$$V = \varepsilon + Im.$$

يمكننا إعادة ترتيب المعادلة:

$$\varepsilon = V + Ir$$

لتكون على الصورة:

$$\varepsilon - Ir = V$$
$$V = \varepsilon - Ir.$$

بمقارنة المعادلة:

$$V = \varepsilon - Ir$$

بمعادلة الخط في التمثيل البياني المستخدَم لتقدير ε:

$$V = \varepsilon + Im,$$

نجد أن:

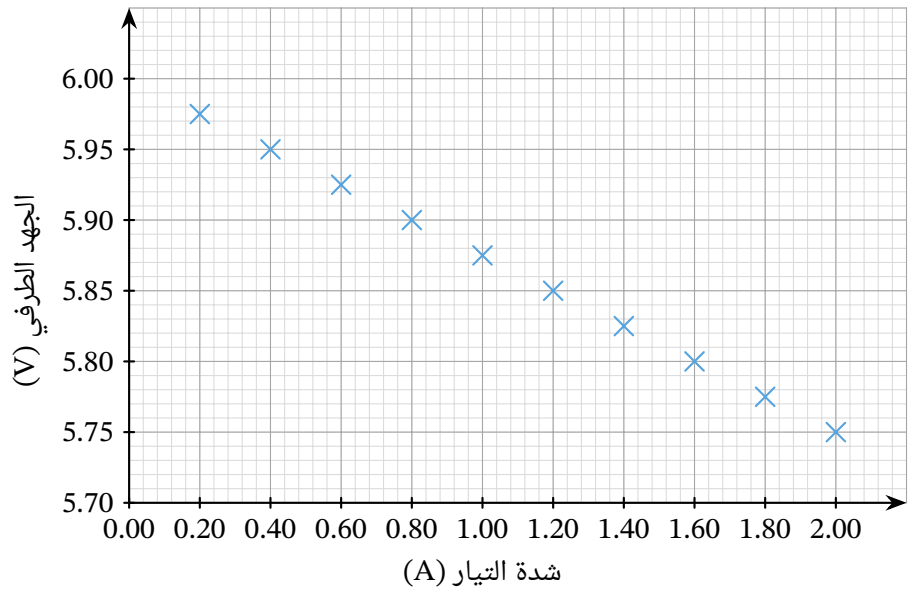
$$-m = r.$$

ويمكننا إذن استخدام التمثيل البياني لتحديد قيمة r، وكذلك ε. يمكن إيجاد كلٍّ من القوة الدافعة الكهربية والمقاومة الداخلية للبطارية.

نتناول الآن مثالًا على إيجاد قيمتَي القوة الدافعة الكهربية والمقاومة الداخلية للبطارية من خلال القياسات.

مثال ٣: إيجاد القوة الدافعة الكهربية والمقاومة الداخلية للبطارية باستخدام القياسات

يوضِّح التمثيل البياني التغيُّر في التيار الكهربي في دائرة، مقابل الجهد الطرفي للبطارية التي تُنتج التيار.



١. ما القوة الدافعة الكهربية للبطارية؟

٢. ما المقاومة الداخلية للبطارية؟

الحل

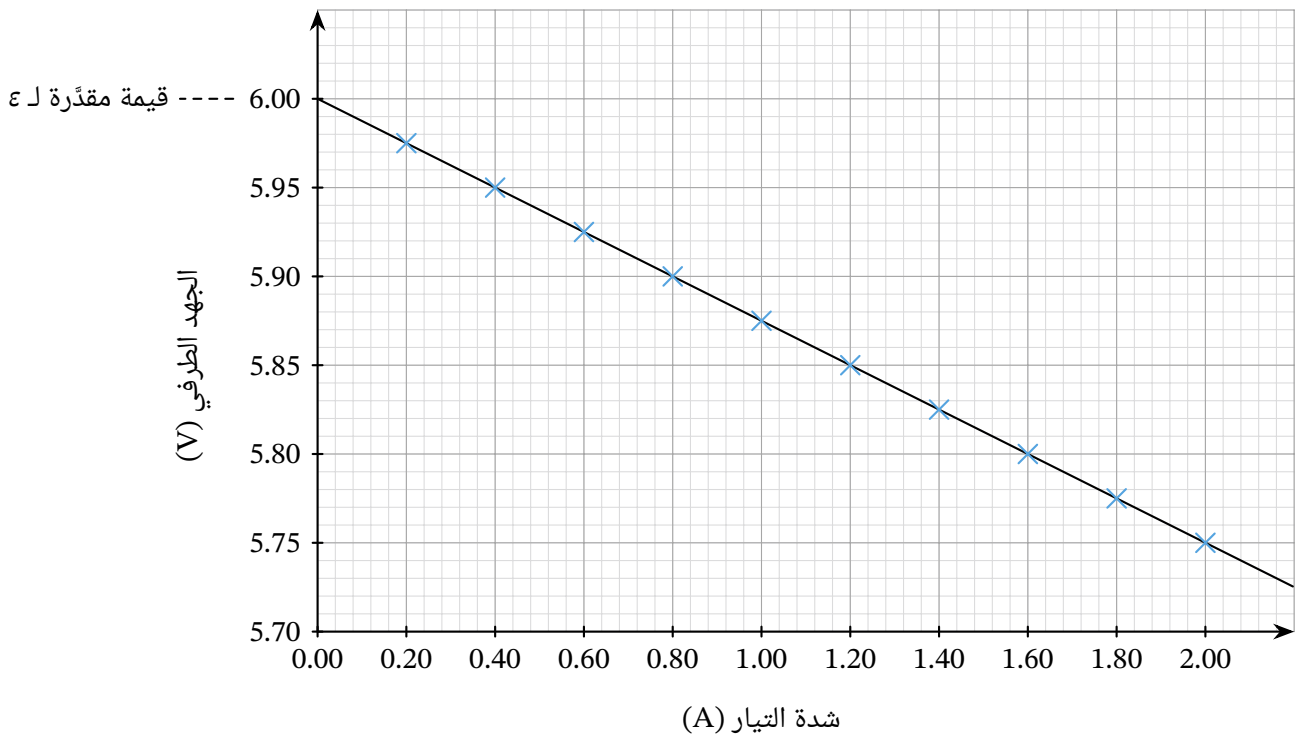
الجزء الأول

القوة الدافعة الكهربية ε للبطارية تُعطى بالمعادلة:

$$\varepsilon = V + Ir,$$

حيث V هو الجهد الطرفي للبطارية، r هو المقاومة الداخلية للبطارية، I هو شدة التيار في الدائرة.

قيمة القوة الدافعة الكهربية ε للبطارية تساوي الجزء المقطوع من المحور y لخط أفضل مطابقة للنقاط المرسومة على التمثيل البياني. هذا موضَّح في الشكل الآتي:



القوة الدافعة الكهربية للبطارية تساوي 6 V.

الجزء الثاني

تُحدَّد المقاومة الداخلية r للبطارية باستخدام المعادلة:

$$\varepsilon = V + Ir.$$

يمكن إعادة ترتيب هذه المعادلة لتكون على الصورة:

$$V = \varepsilon - Ir$$

وكتابتها على الصورة:

$$V = \varepsilon + (-r)\,I.$$

يمكن مقارنة هذه المعادلة بمعادلة خط أفضل مطابقة:

$$y = c + mx,$$

حيث y هو الجهد الطرفي، x هو شدة التيار، c هو القوة الدافعة الكهربية، m هو ميل الخط.

نرى بعد ذلك أن:

$$m = -r,$$

وبهذا:

$$r = -m.$$

ويُعطى ميل خط أفضل مطابقة بالمعادلة:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta V}{\Delta I}.$$

يمكننا أن نأخذ قيمتين واضحتين لـ V وI من التمثيل البياني: $V = 5.90\ \text{V}$ و$I = 0.80\ \text{A}$ و$V = 5.85\ \text{V}$ و$I = 1.20\ \text{A}$.

هذا يُعطينا قيمة ΔV كالآتي:

$$\Delta V = 5.90\ \text{V} - 5.85\ \text{V} = 0.05\ \text{V}.$$

ويُعطينا قيمة ΔI كالآتي:

$$\Delta I = 0.80\ \text{A} - 1.20\ \text{A} = -0.40\ \text{A}.$$

ويُعطينا قيمة m كالآتي:

$$m = \frac{0.05\ \text{V}}{-0.40\ \text{A}} = -0.125\ \Omega.$$

ونحن نعرف أن:

$$r = -m,$$

وبهذا، r يساوي $0.125\ \Omega$.

هيا نلخِّص الآن ما تعلَّمناه في هذا الشارح.

النقاط الرئيسية

- للبطارية مقاومة تُسمَّى المقاومة الداخلية للبطارية.
- جزءٌ من فرق الجهد الذي تنتجه البطارية يبذل شغلًا لتحريك الشحنات عبر البطارية. لا يشارك فرق الجهد هذا في نقل الشحنات عبر الدائرة الكهربية المتصلة بالبطارية.
- يُسمَّى فرق الجهد الكلي الذي تنتجه بطارية ما القوة الدافعة الكهربية للبطارية.
- يُسمَّى فرق الجهد الذي توفِّره البطارية لدائرة متصلة بالبطارية الجهد الطرفي للبطارية.
- تُوجَد علاقة تربط بين القوة الدافعة الكهربية ε، والجهد الطرفي V، والمقاومة الداخلية r، لبطارية متصلة بدائرة كهربية يمر بها تيار شدته I من خلال المعادلة:

$$\varepsilon = V + Ir.$$

- لا يمكن قياس القوة الدافعة الكهربية والمقاومة الداخلية مباشرةً، لكن يمكن تقديرهما بصورة غير مباشرة.