

دراسة تأثير شدة الإضاءة في الأداء الكهربائي لخلايا الوقود الميكروبية النباتية (PMFC) باستخدام نبات النعناع الفلفلي

م. علا الوردى¹ د. منير العاروض² د. علي امير³ د. وسام عبدالقادر⁴

1. طالبة ماجستير في قسم البيئة والحراج - كلية الهندسة الزراعية بدير الزور - جامعة الفرات
2. أستاذ في قسم البيئة والحراج - كلية الهندسة الزراعية بدير الزور - جامعة الفرات
3. أستاذ في قسم الأراضي - كلية الهندسة الزراعية بدير الزور - جامعة الفرات
4. مدرس في قسم الفيزياء - كلية العلوم بدير الزور - جامعة الفرات

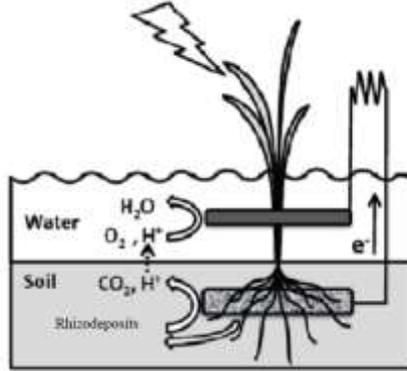
الملخص

تُعدّ خلايا الوقود الميكروبية النباتية (PMFC) من التقنيات الواعدة لإنتاج الطاقة المتجددة بطريقة مستدامة وصديقة للبيئة، إذ تجمع بين العمليات الحيوية للنباتات والنشاط الميكروبي في الوسط الجذري لتوليد تيار كهربائي ناتج عن التفاعلات الحيوية-الكهروكيميائية. في هذا البحث تم تصميم خلية (PMFC) باستخدام نبات النعناع الفلفلي (الشيكلس) (*Mentha piperita*) بعمر شهرين، واستُخدم فيها الغرافيت النقي كمصعد والفولاذ الكريوني كمهبط. تألف النظام التجريبي من ثلاث خلايا مستقلة (ثلاث مكررات)، وُضعت تحت منظومة ضوئية صناعية من نوع (LED Panel)، جرى ترتيبها على شكل مصفوفة لتأمين توزيع متجانس لشدة الضوء على جميع العينات. استُخدمت خلية شمسية معيارية لتقدير شدة الإضاءة الاصطناعية، وتمت المقارنة بالاعتماد على بيانات منصة (PVGIS) لتحديد مستويات الإشعاع المكافئة لكل حالة إضاءة. تم قياس شدة التيار الكهربائي الناتج من الخلايا عند ثلاث مستويات مختلفة من الإضاءة: منخفضة، متوسطة، وعالية، حيث جُمعت القراءات الكهربائية بفواصل زمنية منتظمة مقدارها خمس دقائق على مدى تسعين دقيقة متواصلة لكل مستوى من مستويات الإضاءة، وأظهرت النتائج وجود علاقة طردية بين شدة الإضاءة والتيار الكهربائي للخلية.

الكلمات المفتاحية: خلايا الوقود الميكروبية النباتية (PMFC)، النعناع، شدة الإضاءة، الطاقة الحيوية المستدامة، الكائنات الميكروبية الكهربية.

1- المقدمة:

في ظل تفاقم التلوث البيئي الناجم عن أنماط الإنتاج والاستهلاك الطاقية التقليدية. برزت الحاجة الملحة إلى تطوير مصادر طاقة متجددة وصديقة للبيئة. في هذا السياق، ظهرت خلايا الوقود الميكروبية النباتية (Plant Microbial Fuel Cells – PMFCs) كأحد أهم التقنيات الحيوية الواعدة الصديقة للبيئة في إنتاج الطاقة المتجددة، التي تمثل نموذجًا متقدمًا لتقنيات التحويل الحيوي للطاقة. تتميز هذه الخلايا بقدرتها على تحويل المواد العضوية التي يفرزها النبات في التربة إلى طاقة كهربائية بشكل مباشر وذلك باستخدام الكائنات الحية الدقيقة. (Logan, et al., 2006).

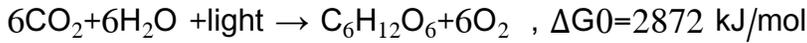


الشكل 1: آلية عمل خلية الوقود الميكروبية النباتية

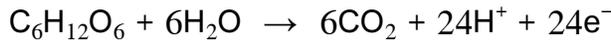
يبين الشكل (1) آلية عمل خلية الوقود الميكروبية النباتية وفق الخطوات التالية: تقوم النباتات الحية بعملية التركيب الضوئي التي تنتج مركبات عضوية. (Aftab, et al., 2020)، ثم تطرح النباتات المواد التي تفرزها على شكل إفرازات جذرية في منطقة الرايزوسفير. (Flores, et al., 2018)، حيث تقوم الكائنات الحية الدقيقة في الرايزوسفير بتحويل المواد العضوية لإنتاج الطاقة (Shaikh, et al., 2021). بعض من هذه الكائنات يدعى الكائنات الحية الدقيقة الكهربائية، والتي تنتج إلكترونات وتنقلها إلى خارج أجسامها، وتقوم الكائنات الحية الدقيقة الكهربائية بالملصقة بالمصعد بنقل الإلكترونات إلى دارة خارجية. (Nitorisav & Regmi, 2017)، ثم تمر الإلكترونات عبر الدارة الخارجية لتصل إلى المهبط، حيث يتم إرجاع مستقبلات الإلكترونات لإكمال

دورة الأكسدة والإرجاع (Strik, et al., 2008). يمكن تلخيص دورة المعادلات التي تحدث في النظام بما يلي (Nitorisravu & Regmi, 2017):

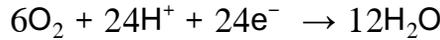
1- التركيب الضوئي



2- أكسدة المركبات العضوية بواسطة الكائنات الحية الدقيقة الكهروكيميائية في غرفة المصعد



3- الإرجاع في حجرة المهبط



ومن أهم العوامل المؤثرة على أداء الخلايا:

1. نوع النبات المستخدم حيث يختلف أداء نوع النبات المستخدم فيها (Helder, 2012)، إذ تكون الأولوية للنباتات التي تتمتع بقدرة ممتازة على البقاء والنمو في ظروف مشبعة بالماء (Shaikh, et al., 2021). كما يُوصى بالنباتات ذات القدرة العالية على إنتاج الكتلة الحيوية (Apollon, et al., 2021).
2. الظروف البيئية والتي تشمل درجة الحرارة، الرطوبة، الإضاءة، التهوية. يعتمد التركيب الضوئي على عاملين، وهما تركيز ثاني أكسيد الكربون وشدة الإشعاع الضوئي (Neogi, et al., 2021)، حيث يؤثر ارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون على نمو النبات وتطوره نتيجة لامتناس الكربون في عملية التركيب الضوئي (Wang, et al., 2020).
3. المواد العضوية حيث تعتمد كفاءة إنتاج الكهرباء على نوع وكمية المواد العضوية المستخدمة (Helder, et al., 2010).
4. الكائنات الحية الدقيقة في التربة: تلعب البكتيريا والفطريات دوراً مهماً في تحسين أداء خلايا PMFC (He, et al., 2021). حيث أن اختيار السلالات البكتيرية المناسبة هو عامل حاسم في كفاءة توليد الطاقة (Nitorisravu & Regmi, 2017).

بما أن إفرزات الجذور تختلف من نبات لآخر من حيث التركيب والتركيز بالتالي يتفاوت تنوع الميكروبات في منطقة الرايزوسفير وفقاً للاحتياجات الغذائية والوسط الداعم والمحصول المستخدم (Rani, et al., 2021). وفي النهاية، تعد بنية التربة (Wakelin, et al., 2008)، وقوام التربة (Sessitsch, et al., 2001) وتوافر النيتروجين (Frey, et al., 2004) ودرجة حموضة التربة (Lauber, et al., 2009) من العوامل الرئيسية التي تشكل المجتمعات البكتيرية.

5. نوع وشكل ومساحة الأقطاب: يجب أن تكون مادة القطب المستخدمة للمصعد في خلية (PMFC) موصلة، متوافقة مع الكائنات الحية، مستقرة كيميائياً (Sonawane, et al., 2020). يُفضل استخدام مصعد مصنوعة من مواد مقاومة للصدأ غير القابل للتآكل (Li et al., 2021) بالإضافة إلى كفاءة جمع التيار الكهربائي (Kim, et al., 2021)..

في هذا البحث تم استخدام نبات النعناع الفلفلي (الشيكس) (*Mentha piperita L*)، وهو نبات عطريّ ناتج عن تهجين النعناع المائي مع النعناع المدبب، يتميز بقدرته العالية على النمو والتأقلم في ظروف بيئية متنوعة، مما يجعله من الأنواع المثالية للدراسات الحيوية والبيئية (Majkowska–Gadomska, 2024). يمتلك النبات ديمومة خضرية، مما يزيد النشاط الحيوي داخل منظومة الخلية النباتية والميكروبية. يُعد هذا النبات من الأنواع منخفضة الأثر البيئي، إذ يمكن تنميته في بيئات مختلفة دون الحاجة إلى كميات كبيرة من الأسمدة أو المبيدات الكيميائية (Haddou , et al., 2023). وإضافةً إلى خصائصه الزراعية، يتميز النعناع الفلفلي بأهمية اقتصادية وطبية بارزة نظراً لغناه بالزيوت العطرية والمركبات الفعالة مثل المنترول والمنتون، التي تمتلك خصائص مضادة للبكتيريا والأكسدة وتُستخدم على نطاق واسع في الصناعات الدوائية والغذائية والعطرية. (Hudz , et al., 2023).

في هذا البحث تم دراسة العلاقة بين شدة الإضاءة والأداء الكهربائي لخلايا PMFC المزروعة بنبات النعناع الفلفلي (*M. piperita*) ، من خلال قياس التيار الكهربائي

الناتج تحت ثلاث مستويات مختلفة من الإضاءة (منخفضة، متوسطة، وعالية) على مدة 90 دقيقة.

2- هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى تحليل تأثير شدة الإضاءة في كفاءة خلايا الوقود الميكروبية النباتية (PMFC) من خلال دراسة العلاقة بين شدة الإشعاع الضوئي وشدة التيار الخلوية تحت ثلاث مستويات مختلفة من الإضاءة. كما يهدف إلى تفسير السلوك الزمني للتيار الكهربائي وربطه بالآليات الحيوية-الكهروكيميائية المرافقة.

3- مواد وطرائق البحث

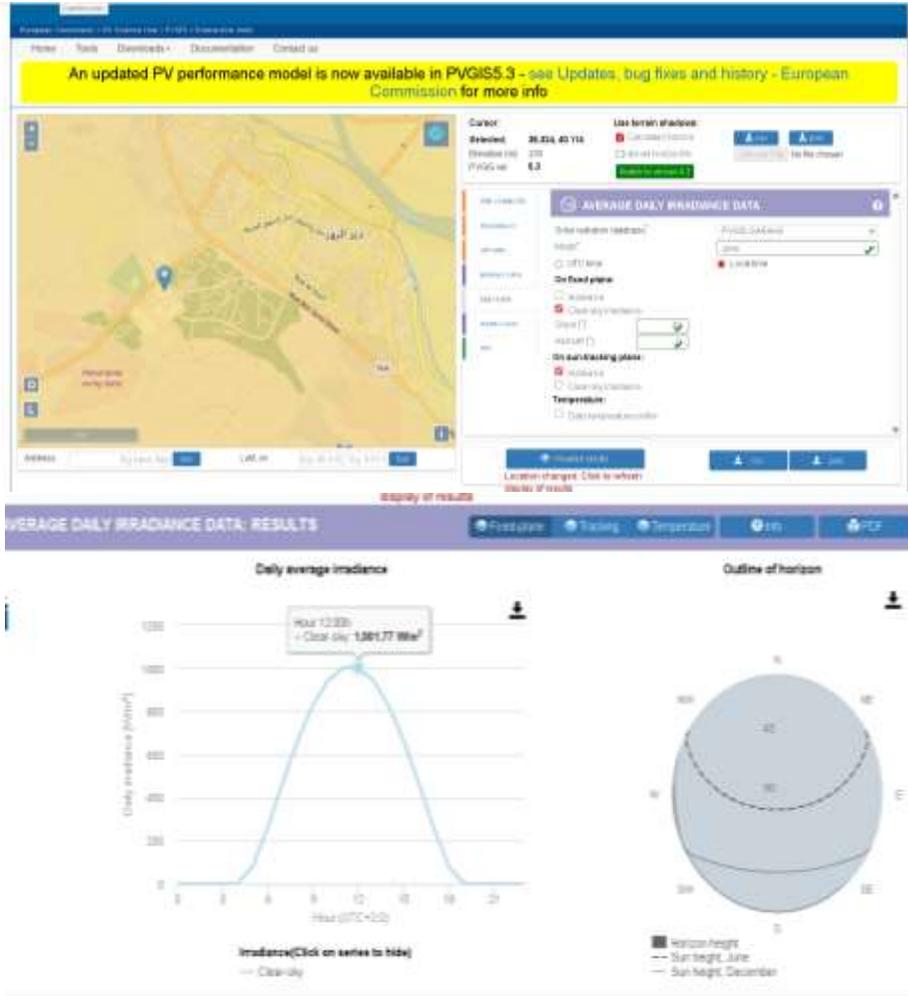
في هذا البحث تم تصميم تجربة مخبرية (الشكل 2)، حيث تألفت التجربة من ثلاث خلايا (مكررات) كل خلية أنشئت باستخدام نبات النعناع الفلفلي (*M. piperita*) بعمر شهرين. استُخدم الغرافيت النقي كمصعد (Anode) والفولاذ الكريوني كمهبط (Cathode)، وربطت الأقطاب بأسلاك نحاسية عالية التوصيل لضمان تقليل الفقد في الطاقة الكهربائية. وُضعت الخلايا تحت منظومة إضاءة صناعية من نوع (LED Panel) مرتبة على شكل مصفوفة لتأمين توزيع متجانس لشدة الضوء على جميع العينات. جُهزت المنظومة بمزود طاقة تيار مستمر يسمح بالتحكم في الجهد والتيار المطبقين. كما استُخدم ثلاثة أجهزة ملتي ميتر رقمية عالية الدقة، وُصل كل منها بدائرة مستقلة خاصة بإحدى الخلايا لقياس التيار الكهربائي بشكل متزامن لجميع المكررات.

ولأغراض المعايرة، استُخدمت خلية شمسية معيارية لتقدير شدة الإضاءة الاصطناعية ومقارنتها بالإشعاع الشمسي الطبيعي. تمت القياسات تحت ثلاث مستويات مختلفة من الإضاءة: منخفضة، متوسطة، وعالية. تم تنفيذ التجربة على مدى تسعين دقيقة مع تسجيل القراءات بفواصل زمنية منتظمة.



الشكل (2) تجربة قياس التيار لخلايا PMFC باستخدام مصفوفة إنارة LED

وبهدف معايرة المنظومة الضوئية المستخدمة في هذه التجربة، تم إجراء قياسات مقارنة بين استجابة الخلية الشمسية عند تعريضها للإشعاع الشمسي الطبيعي المباشر في فترة الظهيرة (الساعة 12:00 ظهراً)، وبين استجابتها عند تعريضها لمصادر الإضاءة الاصطناعية الخاصة بالمنظومة الضوئية التجريبية. تم تقدير شدة الإشعاع الشمسي بالاعتماد على قاعدة بيانات (Photovoltaic Geographical Information System) التابعة للمفوضية الأوروبية، وذلك كما هو موضح في الشكل (3). وقد كانت معطيات الموقع والإعدادات كما يلي: الموقع مدينة دير الزور في الجمهورية العربية السورية، حيث تقع عند خط عرض 35.324° وخط طول 40.114° ، وعلى ارتفاع يبلغ نحو 233 متراً فوق سطح البحر. تم تقدير شدة الإشعاع الشمسي خلال شهر حزيران في ظروف سماء صافية، عند الساعة الثانية عشرة ظهراً بالتوقيت المحلي، وهي الفترة التي تمثل ذروة الإشعاع الشمسي اليومي في الموقع الجغرافي المدروس. وبناءً على ذلك، كانت قيمة شدة الإشعاع الشمسي عند الظهيرة حوالي $E = 1001 \text{ W/m}^2$.



الشكل (3) شدة الإشعاع الشمسي بالاعتماد على قاعدة بيانات PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)

تم توصيل مصفوفة الإضاءة إلى منبع كهربائي متغير الجهد. ولأغراض المعايرة، جرى اعتماد ثلاث مستويات مختلفة من شدة الإشعاع أمكن حسابها كما يلي:

- عند تعريض الخلية الشمسية للإشعاع الشمسي الطبيعي (الظهيرية)، بلغ التيار الكهربائي الناتج 0.6 A بينما كان الجهد المقاس 5.9 V

- في الحالة الأولى، وعند تعريض الخلية الشمسية للمنظومة الضوئية عند شدة الإضاءة الأولى، بلغ التيار الكهربائي الناتج 4.4 mA بينما كان الجهد 4.4 V
- في الحالة الثانية، وعند تعريض الخلية الشمسية للمنظومة الضوئية عند شدة الإضاءة الثانية، بلغ التيار الكهربائي الناتج 3.5 mA بينما كان الجهد 3.2 V
- في الحالة الثالثة، وعند تعريض الخلية الشمسية للمنظومة الضوئية عند شدة الإضاءة الثالثة، بلغ التيار الكهربائي الناتج 2.0 mA بينما كان الجهد 2.8 V .
وعليه، فإن الاستطاعة المرجعية للإشعاع الشمسي تساوي:

$$P_{ref} = I_{sun} \times V_{sun} = 0.6 \times 5.9 = 3.54 W$$

تعطى الاستطاعة التي تولدها الخلية الشمسية بالعلاقة:

$$P_{out} = \eta \cdot A \cdot E$$

حيث أن:

- E شدة الإشعاع الساقط. (W/m²)
 - P_{out} الاستطاعة الكهربائية الناتجة عن الخلية الشمسية. (W)
 - η الكفاءة التحويلية للخلية.
 - A المساحة الفعالة للخلية. (m²)
- بما أن الخلية ذاتها استُخدمت في جميع القياسات، فإن A و η ثابتتان، وبالتالي يمكن كتابة العلاقة النسبية كالتالي:

$$E_{sys} = E_{ref} \times \frac{P_{sys}}{P_{ref}}$$

عند شدة الإشعاع الأولى:

$$P_{sys} = 0.0044 \times 4.4 = 0.01936 W$$

$$E_{sys} = 1001 \times \frac{0.01936}{3.54} \approx 5.47 W/m^2$$

عند شدة الإشعاع الثانية:

$$P_{\text{eye}} = 0.0035 \times 3.2 = 0.0112 \text{ W}$$

$$E_{\text{eye}} = 1001 \times \frac{0.0112}{3.54} \approx 3.16 \text{ W/m}^2$$

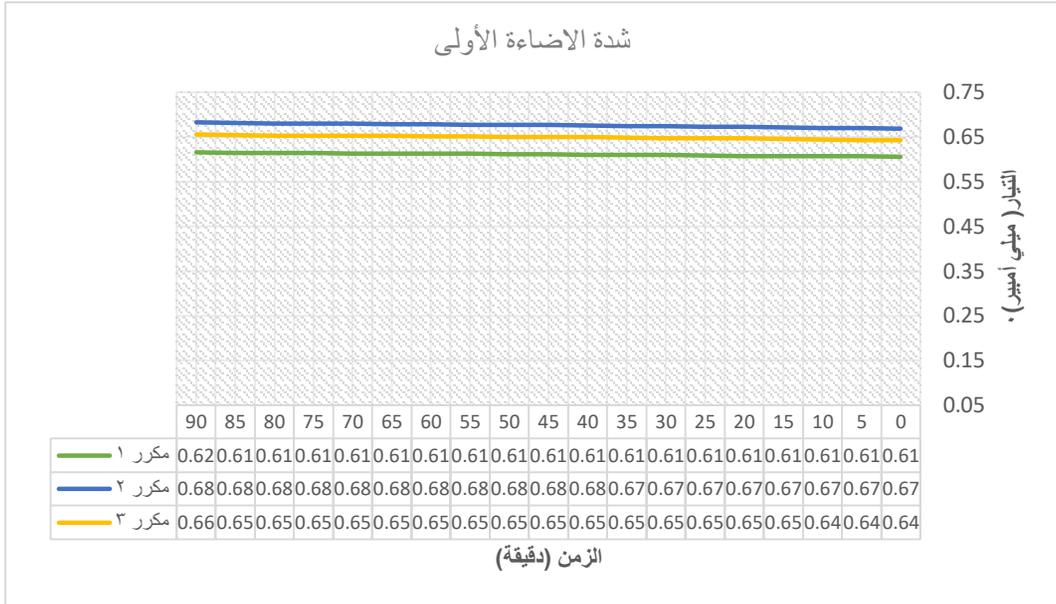
عند شدة الإشعاع الثالثة:

$$P_{\text{eye}} = 0.0020 \times 2.8 = 0.0056 \text{ W}$$

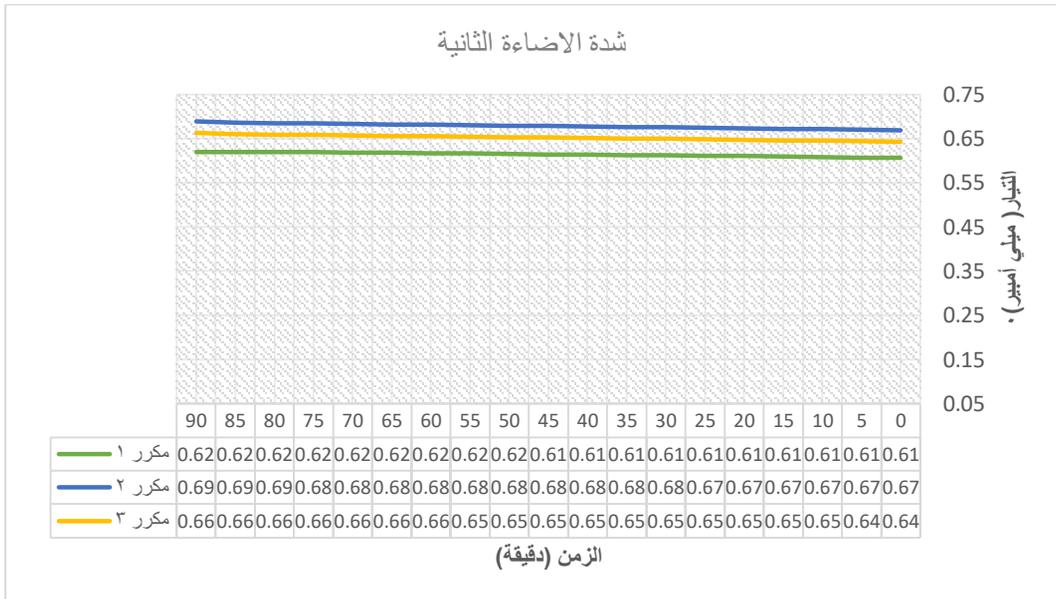
$$E_{\text{eye}} = 1001 \times \frac{0.0056}{3.54} \approx 1.58 \text{ W/m}^2$$

4- النتائج والمناقشة

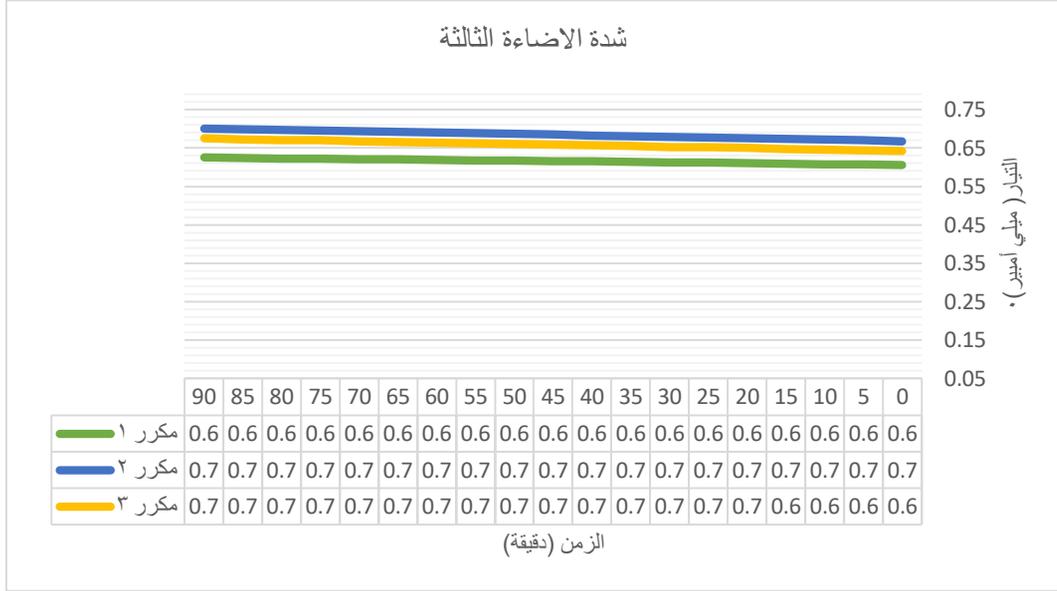
تبين المخططات التالية النتائج التي حصلنا عليها عند كل شدة من شدات الإضاءة، حيث تم تسجيل تغيرات شدة التيار الكهربائي الناتج عن كل نبضة بفواصل زمنية مقدارها خمس دقائق، وذلك على مدى فترة زمنية متواصلة قدرها 90 دقيقة.



الشكل (4) نتائج قياس التيار عند الشدة الضوئية الأولى لثلاث مكررات من التجربة



الشكل (5) نتائج قياس التيار عند الشدة الضوئية الثانية لثلاث مكررات من التجربة



الشكل (6) نتائج قياس التيار عند الشدة الضوئية الثالثة لثلاث مكررات من التجربة

رابعاً: تفسير النتائج:

يبين الشكل 4 تغيرات التيار بدلالة الزمن من أجل المكررات الثلاثة تحت شدة الإضاءة الأولى حيث سجلت المكررات الثلاثة قيمةً ابتدائيةً للتيار بحدود 0.61 ميلي أمبير، وارتفعت تدريجياً لتصل إلى حوالي 0.68 ميلي أمبير بعد 90 دقيقة.

يبين الشكل 5 تغيرات التيار بدلالة الزمن من أجل المكررات الثلاثة تحت شدة الإضاءة الثانية، حيث تراوحت القيم بين 0.60 ميلي أمبير في البداية وارتفعت إلى حوالي 0.69 ميلي أمبير بعد 90 دقيقة.

يبين الشكل 6 تغيرات التيار بدلالة الزمن من أجل المكررات الثلاثة تحت شدة الإضاءة الثالثة، حيث بدأت القيم عند حوالي 0.61 ميلي أمبير وارتفعت بشكل منتظم لتصل

إلى 0.70 ميلي أمبير بعد 90 دقيقة، وهو أعلى معدل زيادة مسجل. يُظهر المنحنى ميلاً تصاعدياً أكثر وضوحاً في بداية الفترة الزمنية ثم استقراراً تدريجياً. تعكس المخططات الثلاثة تطور النشاط الحيوي الكهربائي في خلايا الوقود الميكروبية النباتية (PMFC) تحت تأثير تغير شدة الإضاءة. في شدة الإضاءة المنخفضة، يلاحظ أن النظام الحيوي يعمل ضمن مرحلة استقرار محدودة، حيث تكون معدلات البناء الضوئي منخفضة نسبياً، ما يؤدي إلى إنتاج محدود من المركبات العضوية التي تمثل المصدر للطاقة بالنسبة للكائنات الميكروبية. في هذه الحالة، يكون النشاط الميكروبي في الوسط الجذري محكوماً بكمية الركائز المتاحة، مما يجعل معدل انتقال الإلكترونات إلى المصعد محدوداً، وهو ما ينعكس على الأداء الكهربائي العام للنظام. أما في شدة الإضاءة المتوسطة، فيبدو أن التفاعل الحيوي بين النبات والميكروبات أفضل، إذ تتحسن كفاءة التركيب الضوئي ويزداد تدفق المركبات العضوية إلى المنطقة الجذرية، ما يزيد من عمليات الأكسدة الميكروبية وإطلاق الإلكترونات. في المقابل، تكشف شدة الإضاءة العالية عن استجابة حيوية مكثفة للنظام، إذ يؤدي فائض الطاقة الضوئية إلى تنشيط واضح للبناء الضوئي، ما يضاعف إفراز المركبات. هذه المواد تُحفز الكائنات الميكروبية على الأكسدة بشكل أكثر كفاءة. كما يُلاحظ أن الخلايا في هذا المستوى تميل إلى الوصول إلى حالة اتزان كهرو-كيميائي مستقر بعد فترة قصيرة من التكيف، يمكن تفسير ذلك أن معدل إنتاج الإفرازات الجذرية وصل حالة حدية أو أن البكتيريا أصبحت تعمل بكامل طاقتها.

5- الاستنتاجات والتوصيات

أظهرت النتائج وجود علاقة طردية بين شدة الإضاءة والتيار الكهربائي الناتج في خلايا الوقود الميكروبية النباتية (PMFC)، حيث أدى ارتفاع شدة الضوء إلى زيادة كفاءة البناء الضوئي وزيادة إفراز المركبات العضوية المغذية للميكروبات الكهروفعالة، مما رفع من مردود الطاقة. كما تبين أن النظام يمرّ بمرحلة تكيف حيوي-ميكروبي قبل بلوغ

مرحلة التوازن، وأن نبات النعناع الفلفلي أظهر أداءً مستقرًا يجعله نموذجاً مناسباً لتطبيقات PMFC البيئية.

بناءً على نتائج الدراسة، يوصى بتوسيع نطاق الأبحاث المستقبلية لتشمل أنواعاً نباتية مختلفة (مثل النباتات التي تعتمد على نظام التمثيل الضوئي C3 كالبطاطا) ومواد أقطاب متنوعة بهدف رفع كفاءة خلايا الوقود الميكروبية النباتية (PMFC)، ودراسة تأثير العوامل البيئية كدرجة الحرارة والرطوبة ودرجة الحموضة على الأداء الكهربائي للنظام. كما ينصح بدراسة تأثير شدة الإضاءة على مدى زمني أطول لتحديد السلوك الديناميكي للخلايا خلال مراحل النمو المختلفة، والاستفادة من نتائج البحث في تصميم أنظمة هجينة تجمع بين الإضاءة الشمسية الطبيعية والإضاءة الاصطناعية لتشغيل خلايا PMFC في البيئات المغلقة أو ذات الإشعاع الشمسي المحدود. كذلك يُقترح دمج هذه الأنظمة مع تقنيات معالجة المياه أو النفايات العضوية لتطوير منظومات حيوية قادرة على إنتاج الطاقة ومعالجة الملوثات في آن واحد.

المراجع

1. Aftab, S., Shah, A., Jan, N., & Ashiq, M. (2020). Marketability Prospects of Microbial Fuel Cells for Sustainable Energy Generation. *Energy & Fuels*, 34(8).
2. Apollon, W., Luna-Maldonado, A., Kamaraj, S., & Antonio, J. (2021). Progress and recent trends in photosynthetic assisted microbial fuel cells. *Biomass and Bioenergy*, 148.
3. Flores, S., Custodio, A., & Soriano, N. (2018). Electricidad a partir de plantas vivas. *Cientifi-K*.
4. Frey, S., Knorr, M., Parrent, J., & Simpson, R. (2004). Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(4).

5. Haddou , M., Taibi , M., Elbouzidi , A., Loukili , E., Yahyaoui , M., & Ou-Yahia , D. (2023). Investigating the Impact of Irrigation Water Quality on Secondary Metabolites and Chemical Profile of *Mentha piperita* Essential Oil: Analytical Profiling, Characterization, and Potential Pharmacological Applications. *International Journal of Plant Biology*, 14.
6. He, J., Xin, X., Pei, Z., & Chen, L. (2021). Microbial profiles associated improving bioelectricity generation from sludge fermentation liquid via microbial fuel cells with adding fruit waste extracts. *Bioresource Technology*, 337.
7. Helder, M. (2012). Design criteria for the plant-microbial fuel cell: electricity generation with living plants—from lab to application. *Wageningen University and Research*.
8. Helder, M., Strik, D., Hamelers, H., Kuhn, A., & Buisman, C. (2010). Concurrent bioelectricity and biomass production in three plant-microbial fuel cells using *spartina anglica*, *arundinella anomala* and *arundo donax*. *Bioresource technology*, 101(10).
9. Hudz , N., Kobylinska , L., Pokajewicz , K., Sedláčková , V., Fedin , R., & Voloshyn , M. (2023). *Mentha piperita*: Essential Oil and Extracts, Their Biological Activities, and Perspectives on the Development of New Medicinal and Cosmetic Products. *Molecules*, 28(21).
10. Kim, J., Yoo, S., Murphy, R., Chen, Y., Ding, Y., Pei, K., . . . Liu, M. (2021). Promotion of oxygen reduction reaction on a double perovskite electrode by a water-induced surface modification. *Energy & Environmental Science*, 14(3).
11. Lauber, C., Hamady, M., Knight, R., & Fierer, N. (2009). Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of

- soil bacterial community structure at the continental scale. *Applied and environmental microbiology*, 75(15).
12. Li, Q., Liu, Z., Sun, Y., Yang, S., & Deng, C. (2021). temperature control of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 487.
 13. Logan, B., Hamelers, B., & Rozendal, R. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental science & technology*, 40(17).
 14. Majkowska-Gadomska, J. (2024). Effect of different sustainable cultivation methods on the biometric parameters and yield of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Sustainability*, 16(16).
 15. Neogi, S., Bhattacharyya, P., & Nayak, A. (2021). Characterization of carbon dioxide fluxes in tropical lowland flooded rice ecology. *Paddy and Water Environment*, 19(3).
 16. Nitorisavu, R., & Regmi, R. (2017). A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy*, 76.
 17. Rani, V., Bhatia, A., Nain, L., Tomar, G., & Kaushik, R. (2021). Methane utilizing plant growth-promoting microbial diversity analysis of flooded paddy ecosystem of India. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37.
 18. Sessitsch, A., Weilharter, A., Gerzabek, M., Kirchmann, H., & Kandeler, E. (2001). Microbial population structures in soil particle size fractions of a long-term fertilizer field experiment. *Applied and environmental microbiology*, 67(9).
 19. Shaikh, R., Rizvi, A., Quraishi, M., Pandit, S., Mathuriya, A., Gupta, P., & Prasad, R. (2021). Bioelectricity production using plant-microbial fuel cell: Present state of art. *South African journal of botany*, 140.

20. Sonawane, J., Ezugwu, C., & Ghosh, P. (2020). Microbial fuel cell-based biological oxygen demand sensors for monitoring wastewater: state-of-the-art and practical applications. *ACS sensors*, 5(8).
21. Strik, D., Hamelers, H., & Snel, J. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International journal of energy research*, 32(9).
22. Wakelin, S., Macdonald, L., Rogers, S., Gregg, A., Bolger, T., & Baldock, J. (2008). Habitat selective factors influencing the structural composition and functional capacity of microbial communities in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(3).
23. Wang, Z., Li, H., Li, X., Xin, C., Si, J., & Wang, F. (2020). Nano-ZnO priming induces salt tolerance by promoting photosynthetic carbon assimilation in wheat. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(9).

Studying the effect of light intensity on the electrical performance of plant microbial fuel cells (PMFCs) using peppermint plant

Abstract

Plant-microbial fuel cells (PMFCs) are promising technologies for generating renewable energy in a sustainable and environmentally friendly manner, as they combine the biological processes of plants with microbial activity in the rhizosphere to produce an electric current resulting from bio-electrochemical reactions. In this research, a (PMFC) cell was designed using the peppermint plant (*Mentha piperita*) aged two months, in which pure graphite was used as the anode and Carbon steel as the cathode. The experimental system consisted of three independent cells (three replicates), placed under an artificial lighting system of the (LED Panel) type, arranged in a matrix form to ensure uniform distribution of light intensity over all samples. A standard solar cell was used to estimate the artificial light intensity, and the comparison was based on the (PVGIS) platform data to determine the equivalent radiation levels for each lighting condition. The electric current generated by the cells was measured at three different light intensity levels: low, medium, and high, where the electrical readings were collected at regular time intervals of five minutes over a continuous period of ninety minutes for each light intensity level, and the results showed a direct relationship between light intensity and the electric current of the cell.