

دراسة تأثير مادة المصعد المستخدم وإضافة المغذيات على استدامة عمل خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب

* أ.د هاجر ناصر

** د. حسين جنيدي

*** باسم منصور

(تاريخ الإيداع 2021 /7/7 – تاريخ النشر 2021 /9 /23)

□ ملخص □

تناول هذا البحث دراسة تأثير بعض العوامل (مادة المسرى الموجب المستخدم، وإضافة المغذيات) على استدامة عمل خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب. تم تصميم خليتين، الأولى مزودة بأقطاب (نحاس/زنك)، والثانية مزودة بأقطاب (فولاذ عديم الصدأ/فولاذ عديم الصدأ). استخدم النحاس كمسرى كهربائي موجب (كمصعد) في الخلية الأولى، بينما استخدم الفولاذ عديم الصدأ كمصعد في الخلية الثانية. في مرحلة لاحقة، تم تغذية الخليتين بمحلول سكري تركيزه 50 gr/l، ثم تمت دراسة تغيير قيمة التيار الناتج، ودراسة تغيير قيم الاحتياج الكيميائي للأكسجين Chemical Oxygen Demanded (COD)، لمعرفة مدى فعالية الكائنات الحية الدقيقة في أكسدة المادة العضوية وإنتاج الكهرباء.

أظهرت النتائج ارتفاعاً أولياً في جهد الدارة المفتوحة في كلتا الخليتين بمرور الزمن. لوحظ بعد ذلك استقرار في جهد الدارة المفتوحة في كلتا الخليتين أعقبه انخفاض ملحوظ في الجهد في الخلية الأولى المزودة بمصعد النحاس، بينما بقي الجهد مستقرًا في الخلية الثانية المزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ. أما عند دراسة منحنى الاستقطاب، فقد أظهرت الخليتان نفس السلوك، حيث انخفض جهد الخرج وكثافة التيار الناتج بالتزامن مع ازدياد المقاومة الخارجية المطبقة. عند إضافة المغذيات ووصل الدارة إلى مقاومة ثابتة، لوحظ انخفاض في قيمة شدة التيار المتولد عن خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد النحاس رافقه انخفاض في كفاءة إزالة الـ (COD) في هذه الخلية، والتي بلغت في نهاية هذه المرحلة % 5.940، بينما لوحظ ارتفاع واضح في قيم شدة التيار المتولد عن خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ، المترافق بارتفاع في كفاءة إزالة الـ (COD)، تلك التي بلغت % 78.06 في نهاية هذه المرحلة.

الكلمات المفتاحية: خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب، توليد الكهرباء، مصعد الفولاذ عديم الصدأ، مصعد النحاس، المغذيات.

* أستاذ -قسم الكيمياء -كلية العلوم -جامعة تشرين - اللاذقية -سورية

** مدرس - قسم هندسة النظم البيئية -المعهد العالي لبحوث البيئة-جامعة تشرين-اللاذقية -سورية

*** طالب دكتوراه -قسم الكيمياء البيئية -المعهد العالي لبحوث البيئة -جامعة تشرين - اللاذقية -سورية

A study of the effect of used anode material and nutrients addition on the sustainability of Sediment Microbial Fuel Cells work

Prof. Dr. Hajar Nasser*

Dr. Hussein Juniedi**

Bassem Mansour***

(Received 7/7/2021. Accepted 23/9/2021)

□ ABSTRACT □

This search was performed to study the effect of some factors (material of anode used, nutrients addition) on the sustainability of sediment microbial fuel cells work. Two cells were designed. The first cell was equipped with electrodes (copper/zinc), and the second cell was equipped with electrodes (stainless steel/stainless steel). Copper was used as anode in the first cell, while stainless steel was used as anode in the second cell. At a later stage, the two cells have been fed with a (50) g/l sugar solution. Then, changes in the values of current intensity and Chemical Oxygen Demeaned (COD) have been studied, to determine the efficiency of microorganisms in oxidizing organic matter and electricity generation

The results showed an initial rise in the open circuit voltage in both cells over time. After that, a stabilization of the open circuit voltage was observed in both cells, followed by a marked decrease in the voltage in the first cell with copper anode, while the voltage remained stable in the second cell with stainless steel anode. When studying the polarization curve, the two cells showed the same behavior, as the output voltage and output current density decreased simultaneously with the increased external resistance applied. When the nutrients were added and the Circuit connected to a constant resistance, a decrease in the current intensity value generated by the microbial fuel cell with copper anode was observed, accompanied by a decrease in the efficiency of COD removal in this cell, which at the end of this stage reached (5.940, %).

A clear increase in the current intensity values generated by the microbial fuel cell with stainless steel anode was observed, along with an increase in the COD removal efficiency, which reached 78.06% at the end of this stage.

Key words: Sediment Microbial Fuel Cells (SMFCs), Electricity generation, stainless steel Anodes, copper Anodes, nutrients.

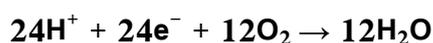
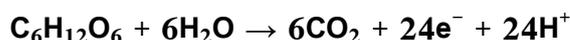
* Professor- Chemistry Department - Faculty of Sciences- Tishreen University-Lattakia-Syria.

** Lecturer - Department of Environmental Engineering Systems- High Institute for Environmental Researches- Tishreen University- Lattakia-Syria.

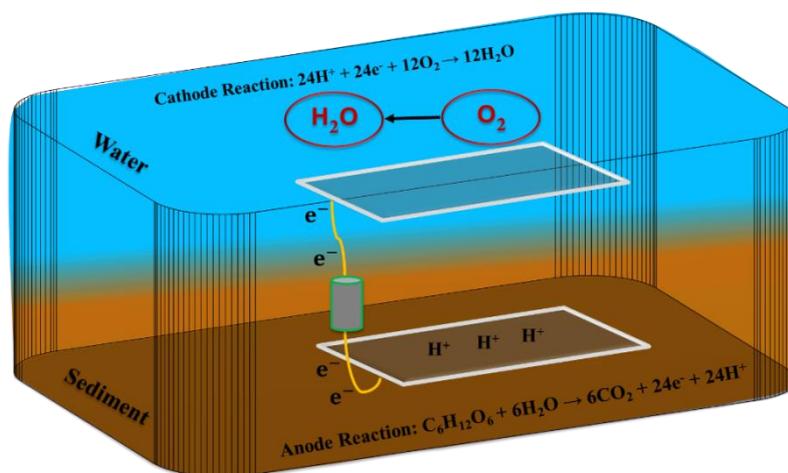
*** PhD Student- Department of Environmental Chemistry- High Institute for Environmental Researches- Tishreen University- Lattakia-Syria.

١ - مقدمة

تُعرّف خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب (SMFCs) (Sediment Microbial Fuel Cells) بأنها أنظمة كهروكيميائية حيوية يمكنها تحويل الطاقة الكيميائية للمركبات العضوية إلى طاقة كهربائية عن طريق عمليات الاستقلاب الحيوي التي تقوم بها الكائنات الحية الدقيقة في طبقة الرواسب [١]. أبدت هذه الخلايا آفاق تطبيق واسعة كمصدر للطاقة لأجهزة الاستشعار بعيدة المدى أو تلك المستخدمة في أعماق البحار، بالإضافة لدورها الإيجابي في معالجة المياه [٢، ٣]. تتكون خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب (SMFC) من حجرة واحدة، مؤلفة من طبقتين: طبقة الرواسب وتوضع أسفل هذه الحجرة، ويغمر فيها المسرى الموجب (المصعد)، وتكون هذه الطبقة غنية بالكائنات الحية الدقيقة والركائز العضوية، إلا أنها تقتصر إلى الأكسجين، لذلك فهي تعتبر طبقة لا هوائية. تغمر هذه الطبقة بطبقة المياه، حيث يوضع المسرى السالب (المهبط)، وتكون هذه الطبقة غنية بالأكسجين لذلك فهي تعتبر طبقة هوائية. يتم وصل الأقطاب الكهربائية مع بعضها البعض باستخدام أسلاك معدنية وغالباً تستخدم أسلاك من النحاس. تضمن الجاذبية الفصل الطبيعي بين الرواسب الصلبة، حيث يغمر المسرى الموجب، وطبقة المياه حيث يغمر المسرى السالب [٤، ٥]. يلعب السطح الفاصل بين الطبقتين (صلب/سائل) دوراً رئيساً في عملية النقل الأيوني، حيث يسمح للبروتونات بالمرور فقط، مما يزيد من المقاومة الداخلية لخلية الوقود الميكروبية [٦]. تقوم الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في طبقة الرواسب بأكسدة المادة العضوية خلال عملية التنفس الخلوي، وينتج عنها بروتونات والكترونات. تنتقل الإلكترونات عبر الدارة الخارجية باتجاه المهبط حيث يوجد الأكسجين الذي يعتبر المستقبل النهائي للإلكترونات في هذه العملية، كما تتدفق البروتونات من خلال سطح طبقة الرواسب باتجاه المهبط وتتحد مع جزيئات الأكسجين الغنية بالإلكترونات لتشكيل جزيئات الماء كما هو موضح في التفاعلات أدناه [٧]. إن حركة الإلكترونات المستمرة عبر الدارة تؤدي إلى خلق فرق في الكون بين المصعد والمهبط مما يؤدي إلى توليد التيار الكهربائي [٨، ٩].



يظهر الشكل (١) نموذجاً لخلية وقود ميكروبية لطبقة الرواسب (Sediment Microbial Fuel Cell) (SMFC):



الشكل (١) نموذج لخلية وقود ميكروبية لطبقة الرواسب (SMFC)

من أهم مزايا خلايا الوقود الميكروبية أنها تستخدم مصدراً متجدداً من الطاقة وهي الكتلة الحيوية بما تحتويه من كائنات حية ومادة عضوية ومغذيات، بالإضافة إلى سهولة استخدام هذه الخلايا في أي موقع، على اعتبار أن المواد اللازمة لبنائها بشكل أساسي هي الرواسب والمياه، وبالتالي يمكن تركيب هذه الخلايا في البحيرات والأنهار حيث تتوفر الرواسب القاعية. وبما أن الرواسب والمياه متجددة في هذه المناطق من خلال عمليات التجدد الطبيعي الدائمة، بالإضافة إلى توافر المغذيات المنحلة والعالقة بصورة دائمة، فإن خلايا الوقود هذه يمكن أن تستمر لفترة زمنية غير محددة. بالإضافة إلى ذلك هناك ميزات إضافية لهذه الخلايا، حيث يمكن استخدامها إلى جانب توليد الكهرباء في معالجة المياه، والتي تعتبر غنية بالمادة العضوية، حيث أن الكائنات الحية الدقيقة يمكنها أن تحطم هذه المادة العضوية لإنتاج الإلكترونات مما يسمح بتوليد الكهرباء بالتزامن مع معالجة المياه [١٠]. تؤثر عدة عوامل على كفاءة عمل خلايا الوقود الميكروبية، منها نوع المسرى المستخدم فيها، حيث استخدمت عالمياً أنواع كثيرة من الأقطاب أهمها ألياف الكربون (Carbon fiber) والشعر الكربوني (Carbon felt) والغرافيت والقماش الكربوني (Carbon cloth) والحديد والنحاس والزنك [١١-١٥]. من العوامل الأخرى المؤثرة على كفاءة توليد الطاقة في خلايا الوقود الميكروبية هي نقصان الكتلة المتحولة، والتي تحدث عندما لا يتوفر كمية كافية من المادة العضوية أو مستقبل الإلكترون النهائي، مما يجعل خلية الوقود لا تعمل بطاقتها القصوى [٧]، أيضاً من العوامل المؤثرة هي المسافة بين الأقطاب، حيث أشارت الدراسات أنه كلما كانت المسافة أبعد، كانت خسارة الإلكترونات أكبر، مما يؤدي إلى إنتاج تيار منخفض [١٦]. ومن العوامل المؤثرة على كفاءة توليد الطاقة في خلايا الوقود الميكروبية خصائص المسرى الموجب، مثل: التوصيل الكهربائي الجيد، والمقاومة المنخفضة، والتوافق الحيوي، والاستقرار الكيميائي، ومقاومة التآكل، ومساحة السطح، والقوة والمتانة الميكانيكية [١٧]، كما يؤثر العمق الذي يغمر عنده المصعد ضمن طبقة الرواسب على إنتاج الطاقة في خلايا الوقود الميكروبية، وقد أشارت الدراسات أنه كلما كان العمق أكبر إلى حدود 5 cm كان جهد الدارة الناتج أكبر، وقد يعود السبب إلى المبدأ الأساسي لوظائف خلية الوقود الميكروبية، حيث يجب أن يكون المصعد خالياً من الأكسجين وبما أن الطبقة السطحية تكون على تماس مع المياه فقد تكون تراكيز الأكسجين فيها كبيرة [١٨]. كما أظهرت الدراسات أن عمق دفن المصعد في طبقة الرواسب يؤثر على أداء خلية الوقود الميكروبية، حيث كلما زاد العمق انخفض تنوع الكائنات الحية [١٩]. بالنسبة لمساحة سطح المسرى السالب (المهبط)، فقد أظهرت بعض الدراسات أن زيادة مساحة سطح المسرى لم تؤثر على قيمة الجهد الناتج [٢٠].

٢. أهمية البحث وأهدافه

تأتي أهمية البحث من أن هذه الخلايا قادرة على توليد الطاقة الكهربائية اللازمة لعمل أجهزة مراقبة مؤشرات التلوث وبخاصة في المناطق النائية، والوقوف على مدى إمكانية استخدام بعض المعادن ذات الموصلية الكهربائية العالية (النحاس) كمسرى كهربائي موجب (مصعد) في هذا النوع من الخلايا. تتلخص أهداف البحث بما يأتي:

- دراسة تأثير نوع المصعد المستخدم على استدامة عمل خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب عن طريق تصميم خلتي وقود، الأولى مزودة بمصعد نحاس والثانية مزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ.

- دراسة إمكانية استخدام النحاس كمسرى كهربائي موجب في خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب
- دراسة تأثير إضافة المغذيات في تحسين كفاءة الطاقة الناتجة في كلتا الخليتين.

٣. طرائق البحث ومواده

٣-١ مراحل البحث

- المرحلة الأولى: تم تصميم خليتي وقود ميكروبيتين، زودت الخلية الأولى بأقطاب (نحاس/زنك)، بينما زودت الخلية الثانية بأقطاب (الفولاذ عديم الصدأ)، ثم تمت مراقبة جهد الدارة المفتوحة وتيار الدارة القصيرة في كل من الخليتين مع مرور الزمن.
- المرحلة الثانية: تم وصل الخليتين بمجموعة من المقاومات من أجل دراسة منحنيات الاستقطاب، ومقارنة كثافة التيار والطاقة الناتجة في كلتا الخليتين.
- المرحلة الثالثة: تم فيها تزويد طبقة الرواسب بكمية من المغذيات عن طريق شبكة من الأنابيب ودراسة إنتاج الطاقة الكهربائية بعد إضافة المغذيات في كلتا الخليتين، ودراسة الاحتياج الكيميائي للأكسجين Chemical Oxygen Demanded (COD) لمعرفة مدى فعالية الكائنات الحية الدقيقة في أكسدة المادة العضوية وإنتاج الكهرباء في كلتا الخليتين.

٣-٢ تصميم الخلية الأولى

تم تصميم الخلية الأولى من: حوض من البولي اتلين بأبعاد $(35 \times 35 \times 45) \text{ cm}^3$ ، وضعت فيه طبقة من الرواسب في قاع الحوض بسماكة 10 cm، وغمرت هذه الطبقة بالمياه بارتفاع 30 cm، وبحيث يكون الحجم الكلي المشغول ٤٩ ليترًا. كما زودت المنظومة بمسربين بأبعاد $(18 \times 18 \times 0.1) \text{ cm}^3$ ، عُمر المسرى الموجب (النحاس) في طبقة الرواسب على عمق 3 cm ضمن هذه الطبقة، أما المسرى السالب (الزنك) فقد وضع في طبقة المياه على عمق 3 cm تحت سطح المياه. تم وصل الأقطاب باستخدام أسلاك من النحاس قطر 2 mm، ويهدف زيادة فعالية المنظومة السابقة تم تزويدها بمنظومة تهوية للطبقة السطحية من المياه بهدف زيادة تركيز الأكسجين فيها.



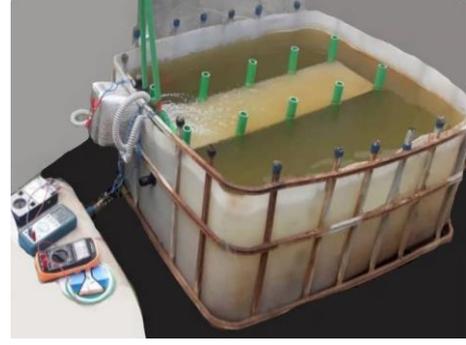
الشكل (٢) خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب المزودة بمصدر النحاس

٣-٣ تصميم الخلية الثانية

تم تصميم هذه الخلية من: حوض من البولي اتلين بأبعاد $(100 \times 100 \times 45) \text{ cm}^3$ ، وضعت طبقة من الرواسب بسماكة 10 cm. غمرت طبقة الرواسب بالمياه بارتفاع 30 cm، بحيث يكون الحجم الكلي المشغول ٤٠٠ ليترًا. تم تزويد هذه الخلية بأقطاب من الفولاذ عديم الصدأ (٣٠٤) [٢١]، بأبعاد $(95 \times 25 \times 0.1) \text{ cm}^3$ ، عُمر المسرى الموجب (المصدر) في طبقة الرواسب على عمق 3 cm، أما المسرى السالب فقد وضع في طبقة المياه على عمق 3 cm تحت سطح المياه. تم وصل الأقطاب باستخدام أسلاك من النحاس قطر 2 mm، ويهدف زيادة فعالية المنظومة السابقة تم تزويدها بمنظومة تهوية للطبقة السطحية من المياه بهدف زيادة تركيز الأكسجين فيها.



الشكل (٤) شبكة الأنابيب المستخدمة لإيصال المغذيات إلى طبقة الرواسب



الشكل (٣) خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب المزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ

٣-٤ الأدوات والأجهزة المستخدمة

- ❖ جهاز (Digital Multimeter) موديل (DT 9205) شركة Hytais لقياس شدة التيار والجهد الكهربائي.
- ❖ جهاز (Digital Multimeter) موديل (DT 9201) شركة Hytais لقياس شدة التيار والجهد الكهربائي.
- ❖ جهاز قياس الـ (COD) (Chemical Oxygen Demeaned) موديل (NVC 0747) شركة Macherey-Nagel

- ❖ ناشر هواء + مضخة.
- ❖ صفائح فولاذ عديم الصدأ + أسلاك نحاس.
- ❖ صفائح نحاس وصفائح زنك.
- ❖ مقاومات كهربائية. أدوات مخبرية وزجاجيات لجمع العينات.

٣-٥ المواد الكيميائية والكواشف المستخدمة

- ملح مور (كبريتات الحديد النشادرية) $[(NH_4) Fe(SO_4).6H_2O]$.
- حمض كبريت مركز.
- كاشف ثنائي كرومات البوتاسيوم (0.1 N).
- مشعر الفيرولين (1-10 phenanthroline).
- ماء ثنائي التقطير. (جميع المواد المستخدمة كانت عالية النقاوة).

٣-٦ جمع العينات

تم احضار الرواسب والمياه التي زودت بها الخليتان من سرير نهر الصنوبر. تم جمع عينات المياه من حوضي الخليتين الموجودتين في مركز أبحاث طلاب الدراسات العليا التابع للمعهد العالي لبحوث البيئة، والواقع بين الودعتين السكنيتين ١٧ و ١٨ في جامعة تشرين.

٧-٣ الحسابات الكهربائية

- تم حساب الاستطاعة الكهربائية من العلاقة [٢٢]:

$$P = V_R \times I_R$$

P : الاستطاعة الكهربائية (mW). V_R : الجهد الكهربائي عند المقاومة الخارجية (V).

I_R : شدة التيار الكهربائي المار (mA).

- تم حساب كثافة التيار الناتج من العلاقة [٢٢]:

$$i = I_R/A$$

A : مساحة سطح المصعد (m^2). i : كثافة التيار (mA/m^2).

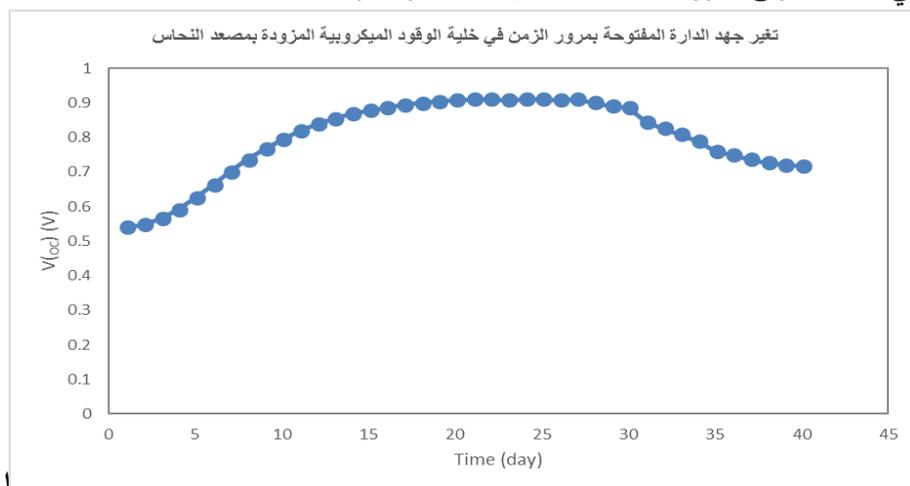
- تم حساب كثافة الطاقة من العلاقة [٢٣]:

$$p = P/A$$

p : كثافة الطاقة الناتجة (mW/m^2).

٤ - النتائج والمناقشة

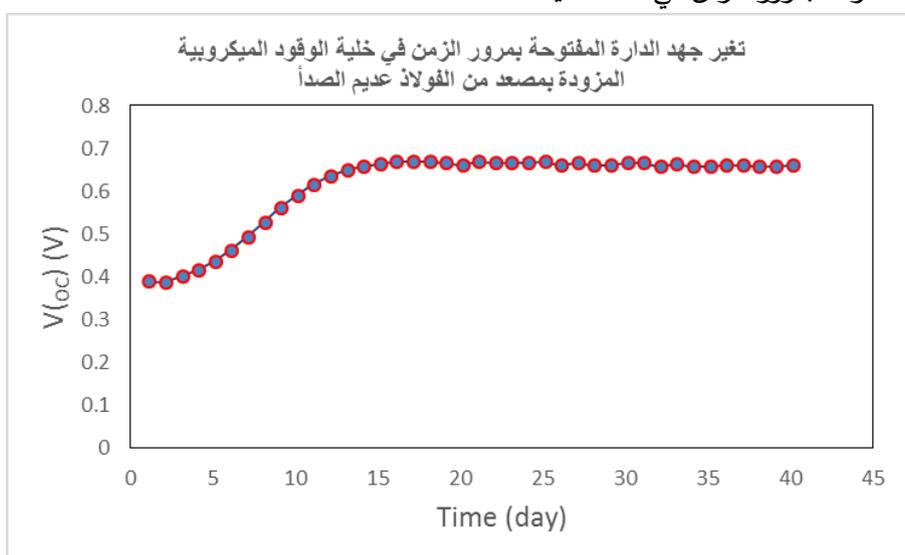
تم في البداية تزويد الخليتين بالرواسب والمياه اللازمة، ثم تركت الخليتين للاستقرار لمدة (٤٨) ساعة كما هو متبع في بروتوكول القياسات الكهروكيميائية (Standard Electrochemical Protocol). ثم تم، بعد ذلك، تشغيل جهاز التهوية السطحية في كلتا الخليتين، وقياس جهد الدارة المفتوحة (V_{oc}) (Open Circuit Voltage) والتيار الدارة القصيرة (I_{sc}) (Short Circuit Current) في كل منهما بمرور الزمن. بدأ توليد الطاقة منذ اليوم الأول في كلتا الخليتين، حيث بلغ جهد الدارة المفتوحة والتيار الدارة القصيرة V (0.540) و mA (0.706) على الترتيب بالنسبة للخلية المزودة بمصعد النحاس، وبلغت أعظم قيمة لجهد الدارة المفتوحة والتيار الدارة القصيرة V (0.910) و mA (1.25) على الترتيب، بعد مرور (21) يوماً على بدء التشغيل. يظهر الشكل (٥) تغير قيم جهد الدارة المفتوحة بمرور الزمن في الخلية الأولى المزودة بمصعد النحاس خلال فترة الدراسة:



الشكل (5) تغير جهد الدارة المفتوحة بمرور الزمن في خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد النحاس

لوحظ من الشكل (٥) ارتفاع تدريجي في قيم جهد الدارة المفتوحة بمرور الزمن، حيث بلغت أعظم قيمة V (0.910) بعد مرور (21) يوماً على بدء عملية التشغيل، وهذا يتفق مع دراسة أجراها Prasad وآخرون عام ٢٠١٧، عند استخدام النحاس كمسرى موجب في خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب حيث بلغت أعظم قيمة لجهد

الدارة المفتوحة V (1.160) بعد مرور (٢٣) يوماً من بدء عملية التشغيل [٩]، بينما يتعارض مع CEK في دراسته التي أجراها عام ٢٠١٧، والتي استخدم فيها الزنك كمسرى موجب، حيث لوحظ انخفاض في جهد الدارة المفتوحة بمرور الزمن [٢٢]. لوحظ بعد ذلك ثبات في قيمة جهد الدارة المفتوحة ثم انخفاض بدأ يظهر بعد مرور (٢٩) يوماً من بدء عملية التشغيل، وقد يعود السبب إلى انخفاض تركيز المغذيات والمادة العضوية في طبقة الرواسب من جهة [٢٤]، وإمكانية تآكل النحاس الذي قد يؤثر سلباً على نمو الكائنات الحية الدقيقة من جهة أخرى [٢٥، ٢٦]. بالنسبة للخلية المزودة بمصعد ومهبط من الفولاذ عديم الصدأ، فقد بلغ جهد الدارة المفتوحة وتيار الدارة القصيرة في اليوم الأول من عملية التشغيل V (0.390)، mA (0.650) على الترتيب. بعد ذلك لوحظ ارتفاع تدريجي في جهد الدارة المفتوحة وتيار الدارة القصيرة بمرور الزمن، حيث بلغت أعظم قيمة لجهد الدارة المفتوحة وتيار الدارة القصيرة V (0.670) و mA (1.482)، بعد مرور (١٧) يوماً على بدء عملية التشغيل، ثم بعد ذلك لوحظ ثبات في قيمة جهد الدارة المفتوحة بمرور الزمن. يوضح الشكل (٦) تغير قيم جهد الدارة المفتوحة بمرور الزمن في هذه الخلية:



الشكل (٦) تغير جهد الدارة المفتوحة بمرور الزمن في خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ

يُلاحظ من الشكل (٦) ارتفاع تدريجي في جهد الدارة المفتوحة ثم استقرار طيلة فترة الدراسة، حيث بلغت أعظم قيمة لجهد الدارة المفتوحة V (0.670)، بعد مرور (١٧) يوماً على بدء عملية التشغيل، مقارنةً بـ V (0.664) في دراسة لـ Xu وآخرون عام ٢٠١٧ تم فيها استخدام ألياف من الغرافيت كأقطاب كهربائية، و V (0.158) في دراسة لـ Abazarian وآخرون عام ٢٠١٦ تم فيها استخدام الشعر الكربوني (Carbon felt) كمسرى كهربائي.

عند استقرار الجهد في الخليتين تم وصل دارة كل منهما بمجموعة من المقاومات (١٠٠، ١٢٠، ١٥٠، ١٨٠، ٢٢٠، ٢٧٠، ٣٣٠، ٣٨٠، ٤٧٠، ٥٥٠) Ω ، من أجل دراسة منحنى الاستقطاب وتحديد جهد الخرج وتيار الخرج الناتج عن كل منهما. يوضح الشكل (٧) مجموعة المقاومات المستخدمة



الشكل (٧) مجموعة المقاومات المستخدمة

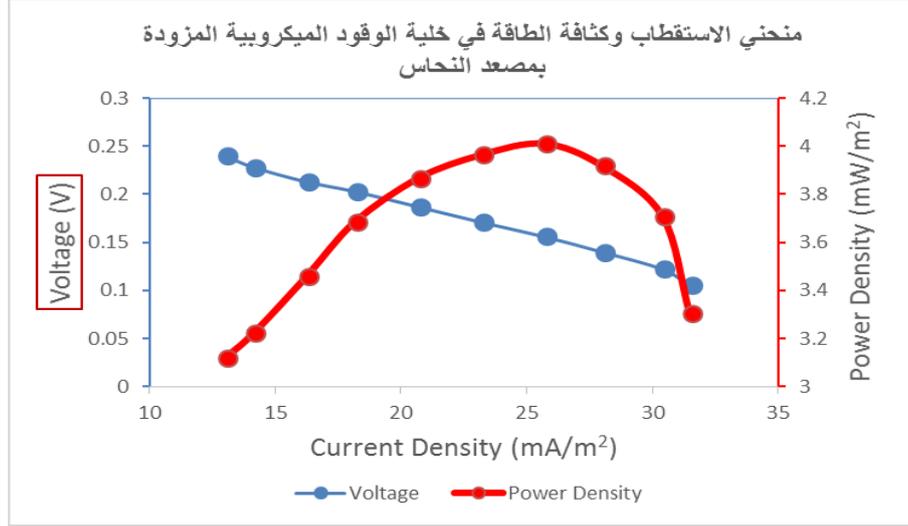
بالنسبة للخلية الأولى المزودة بمصعد النحاس بلغت أعظم قيمة للتيار الناتج 1.02 mA عند قيمة للجهد الكهربائي 0.105 V ، وذلك عند استخدام مقاومة خارجية 100Ω ، بينما بلغت أعظم قيمة للجهد الكهربائي 0.240 V ، عند قيمة للتيار 0.421 mA ، وبلغت أعظم قيمة لكثافة التيار 31.480 mA/m^2 ، عند قيمة للمقاومة الخارجية 100Ω ، مقارنةً بـ 8.871 mA/m^2 في دراسة سابقة لـ Prasad وآخرون عام ٢٠١٧ [٩]. يوضح الجدول (١) قيم التيار الكهربائي والجهد والاستطاعة الناتجة عند المقاومات المستخدمة، إضافةً إلى كثافة التيار والطاقة الناتجة.

الجدول (١) قيم التيار والجهد والاستطاعة وكثافة التيار وكثافة الطاقة الناتجة عند المقاومات المستخدمة

$P_d \text{ (mW/m}^2\text{)}$	$P \text{ (mW)}$	$I_d \text{ (mA/m}^2\text{)}$	$V_R \text{ (V)}$	$I_R \text{ (mA)}$	$S \text{ (m}^2\text{)}$	$R \text{ (}\Omega\text{)}$
3.306	0.107	31.480	0.105	1.020	0.0324	100
3.709	0.120	30.401	0.122	0.985	0.0324	120
3.919	0.127	27.994	0.140	0.907	0.0324	150
4.011	0.130	25.679	0.156	0.883	0.0324	180
3.964	0.128	23.179	0.171	0.751	0.0324	220
3.867	0.125	20.679	0.187	0.670	0.0324	270
3.684	0.119	18.148	0.203	0.588	0.0324	330
3.458	0.112	16.234	0.213	0.526	0.0324	380
3.223	0.104	14.136	0.228	0.458	0.0324	470
3.119	0.101	13.000	0.240	0.421	0.0324	550

يُلاحظ من الجدول (١) انخفاض في قيمة كثافة التيار مع ازدياد المقاومة الخارجية، لتبلغ 13.00 mA/m^2 ، عند قيمة للمقاومة الخارجية 550Ω . قد يعزى الأمر إلى سهولة حركة الإلكترونات عبر الدارة الخارجية عند المقاومة المنخفضة مقارنةً بالمقاومة العالية، وبالتالي ارتفاع إمكانية أكسدة المادة العضوية عند سطح المصعد، وإنتاج عدد أكبر من الإلكترونات [٢٧]. ارتفعت قيمة كثافة الطاقة الناتجة في البداية مع ارتفاع قيمة المقاومة الخارجية المطبقة، حيث بلغت أعظم قيمة لكثافة الطاقة 4.011 mW/m^2 ، عند قيمة للمقاومة الخارجية 180Ω ، مقارنةً بـ

(3.119) mW/m^2 (2.02) في دراسة Prasad عام ٢٠١٧ [٩]، ثم انخفضت هذه القيمة تدريجياً لتبلغ (3.119) mW/m^2 عند قيمة للمقاومة الخارجية Ω (550). يوضح الشكل (٨) منحنى استقطاب الخلية عند تطبيق المقاومات السابقة.



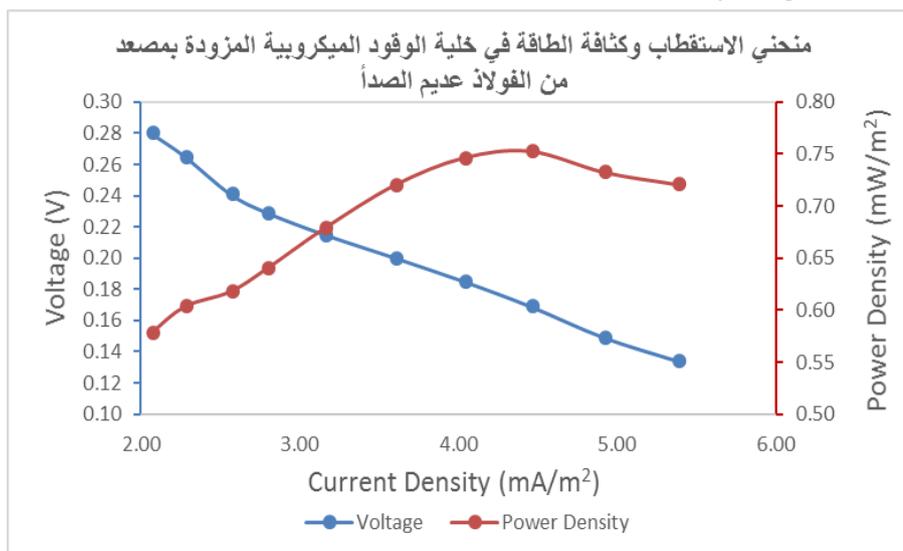
الشكل (٨) منحنى استقطاب الخلية وكثافة الطاقة الناتجة في خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد النحاس

يُظهر الشكل (٨) انخفاضاً في جهد الخلية مع ازدياد كثافة التيار بانخفاض قيمة المقاومة الخارجية، الأمر الذي قد يعود إلى سهولة حركة الإلكترونات بانخفاض قيمة المقاومة المطبقة، وبالتالي إمكانية وصول عدد أكبر من الإلكترونات إلى المسرى السالب (المهبط)، مما يؤدي إلى ارتفاع في كثافة التيار الناتج وانخفاض في الجهد [٢٧]. بالنسبة للخلية الثانية المزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ بلغت أعظم قيمة للتيار الناتج mA (1.280) عند قيمة للجهد الكهربائي V (0.134)، وذلك عند استخدام مقاومة خارجية Ω (100)، بينما بلغت أعظم قيمة للجهد الكهربائي V (0.280)، عند قيمة للتيار mA (0.491)، وذلك عند مقاومة خارجية Ω (550). بلغت أعظم قيمة لكثافة التيار mA/m^2 (5.378)، عند قيمة للمقاومة الخارجية Ω (100). يوضح الجدول (٢) قيم التيار الكهربائي والجهد والاستطاعة الناتجة عند المقاومات المستخدمة، إضافةً إلى كثافة التيار والطاقة الناتجة.

الجدول (٢) قيم التيار والجهد والاستطاعة وكثافة التيار وكثافة الطاقة الناتجة عند المقاومات المستخدمة

P_d (mW/m ²)	P (mW)	I_d (mA/m ²)	V_R (V)	I_R (mA)	S (m ²)	R (Ω)
0.721	0.172	5.378	0.134	1.280	0.238	100
0.732	0.174	4.916	0.149	1.170	0.238	120
0.753	0.179	4.454	0.169	1.060	0.238	150
0.746	0.178	4.034	0.185	0.960	0.238	180
0.720	0.171	3.601	0.200	0.857	0.238	220
0.678	0.161	3.155	0.215	0.751	0.238	270
0.640	0.152	2.794	0.229	0.665	0.238	330
0.618	0.147	2.563	0.241	0.610	0.238	380
0.603	0.144	2.277	0.265	0.542	0.238	470
0.578	0.137	2.063	0.280	0.491	0.238	550

لوحظ من الجدول (٢) انخفاض في قيمة كثافة التيار مع ازدياد المقاومة الخارجية، لتبلغ (2.063) mA/m²، عند قيمة للمقاومة الخارجية Ω (550). قد يعزى الأمر إلى سهولة حركة الالكترونات عبر الدارة الخارجية عند المقاومة المنخفضة مقارنة بالمقاومة العالية، وبالتالي ارتفاع إمكانية أكسدة المادة العضوية عند سطح المصعد، وإنتاج عدد أكبر من الالكترونات [٢٧]. ارتفعت قيمة كثافة الطاقة الناتجة في البداية مع ارتفاع قيمة المقاومة الخارجية المطبقة، حيث بلغت أعظم قيمة لكثافة الطاقة (0.753) mW/m²، عند قيمة للمقاومة الخارجية Ω (150)، ثم انخفضت تدريجياً لتبلغ (0.578) mW/m² عند قيمة للمقاومة الخارجية Ω (550). يوضح الشكل (٩) منحنى استقطاب الخلية عند تطبيق المقاومات السابقة.

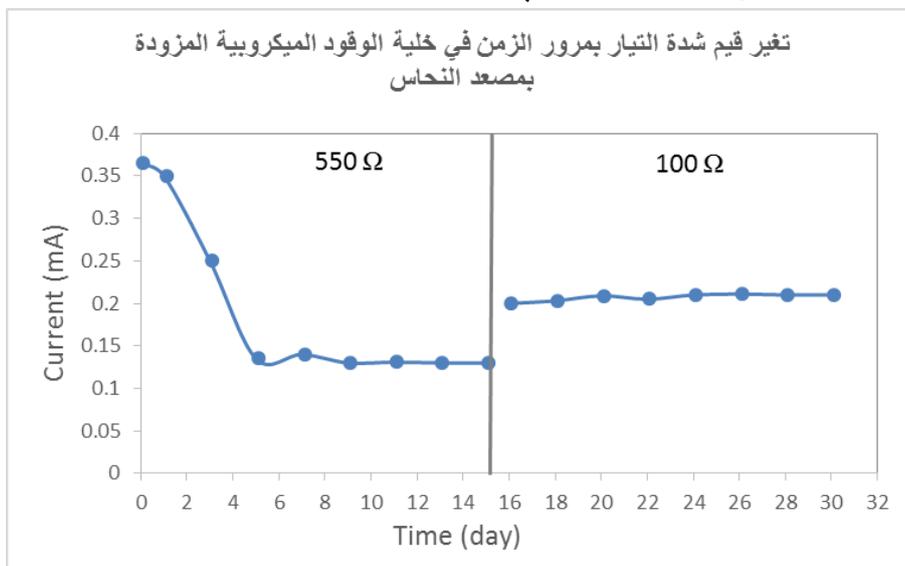


الشكل (٩) منحنى استقطاب الخلية وكثافة الطاقة الناتجة في خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ

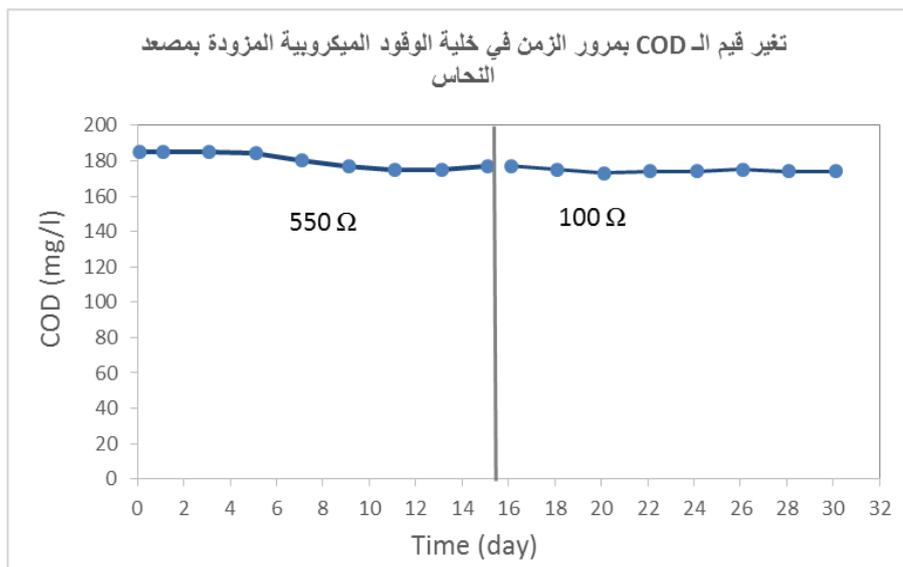
لوحظ من دراسة منحنيات الاستقطاب أن الخليتين قد سلكتا نفس السلوك مع فارق في قيم كثافة التيار والطاقة الناتجة قد يكون له علاقة باختلاف مساحة سطح المصعد المستخدم في كلتا الخليتين.

تم في المرحلة الأخيرة تزويد كل خلية بمحلول سكري تركيزه 50 g/l كمادة مغذية للكائنات الحية في طبقة الرواسب لمعرفة مدى فعالية الكائنات الحية في أكسدة المادة العضوية وإنتاج الكهرباء في كلتا الخليتين، ولأن الجهد في الخلية الأولى المزودة بمصعد النحاس قد انخفض بشكل ملحوظ. وصلت دارة كل خلية بمقاومة ثابتة 550Ω ، لمدة (١٥) يوماً، ثم تم تغيير المقاومة إلى 100Ω لمدة (١٥) يوماً أيضاً. تم أثناء ذلك دراسة تغير شدة التيار الناتج في كل منهما بمرور الزمن، ودراسة الاحتياج الكيميائي للأكسجين (COD) للوقوف على مدى فعالية الكائنات الحية الدقيقة في أكسدة المادة العضوية وإنتاج الكهرباء.

بالنسبة لخلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد النحاس، بلغت قيمة شدة التيار الأولية $(0.365) \text{ mA}$ ، عند وصل الدارة إلى مقاومة 550Ω ، لوحظ بعدها انخفاض واضح في شدة التيار خلال الأيام الخمسة الأولى ثم استقرار في قيمته، حيث بلغت قيمة شدة التيار في نهاية هذه المرحلة $(0.13) \text{ mA}$. في المرحلة الثانية، عند وصل الدارة إلى مقاومة 100Ω ، لوحظ ارتفاع بسيط في قيمة التيار المتولد، حيث بلغت قيمته الابتدائية $(0.2) \text{ mA}$ ، لوحظ بعدها استقرار في قيمة التيار، حيث بلغت في نهاية هذه المرحلة $(0.21) \text{ mA}$. لم يلاحظ تغير واضح في قيم تراكيز الـ (COD) في هذه المرحلة، حيث بلغت كفاءة الإزالة في نهاية هذه المرحلة % (5.940). يوضح الشكلان (١٠) و (١١) تغير قيم شدة التيار والـ (COD) بمرور الزمن عند تطبيق المقاومتين السابقتين على خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد النحاس.

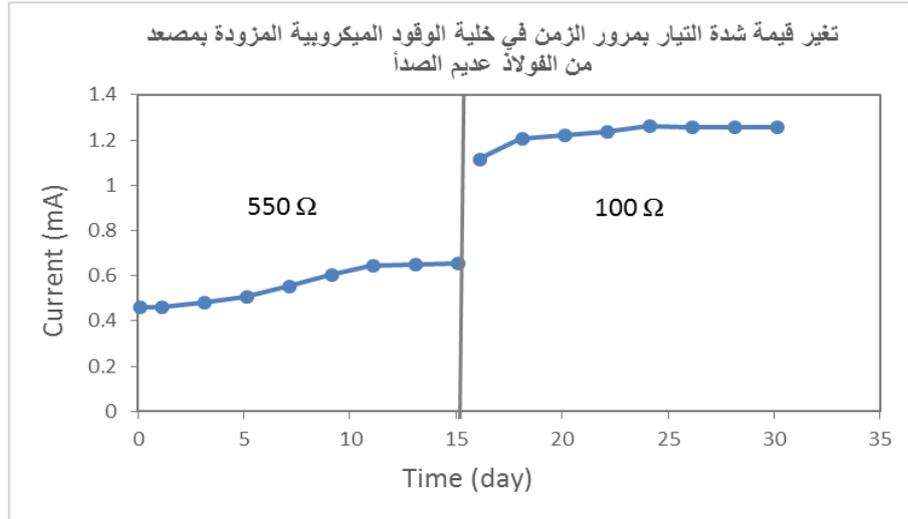


الشكل (١٠) التيار المتولد عن خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد النحاس عند تطبيق المقاومتين 100Ω و 550Ω .

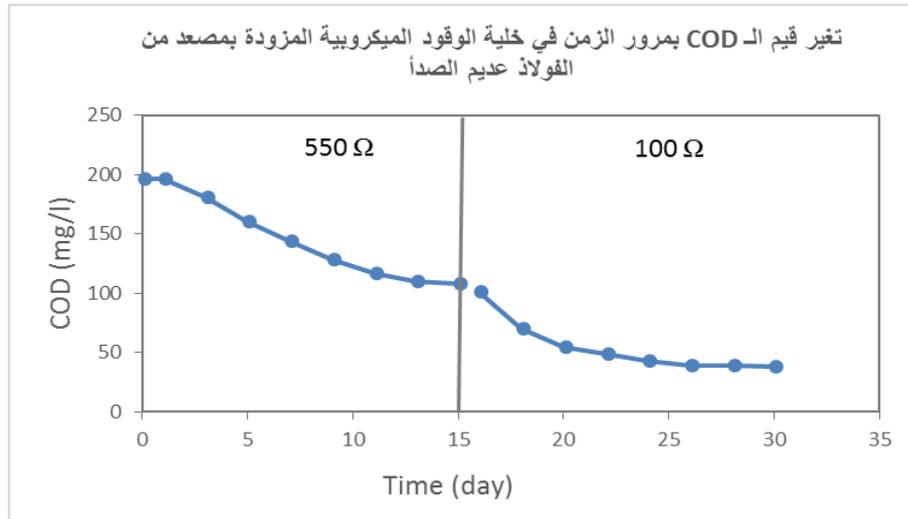


الشكل (١١) تغير قيم الـ (COD) بمرور الزمن في خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد النحاس عند تطبيق المقاومتين 100Ω ، و 550Ω

تشير النتائج الموضحة في الشكلين (١٠) و (١١) إلى انخفاض قيمة التيار الناتج عن مصعد النحاس، الأمر الذي قد يعزى إلى احتمال تآكل النحاس، وبالتالي الحصول على أيونات النحاس التي تُعرف بسميتها للكائنات الحية الدقيقة، مما أدى إلى انخفاض في قيمة التيار المنتج [٢٥، ٢٦]، كما يشير ثبات تركيز الـ COD تقريباً بمرور الزمن إلى انخفاض كفاءة الإزالة، حيث بلغت كفاءة إزالة الـ COD في نهاية هذه المرحلة % (5.940). قد يعود السبب في ذلك إلى تثبيط عمل الكائنات الحية الدقيقة في طبقة الرواسب، أي أن نمو البكتيريا قد تأثر سلباً بسبب سمية أيونات النحاس على الكائنات الحية الدقيقة [٢٧]، وبالتالي لم تؤدي إضافة المغذيات لهذه الخلية إلى رفع قيمة التيار الكهربائي. بالنسبة لخلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد الفولاذ عديم الصدأ بلغت قيمة شدة التيار الأولية 0.458 mA ، عند وصل الدارة إلى مقاومة 550Ω ، لوحظ بعدها ارتفاع في قيمة شدة التيار، ثم استقرار لتبلغ قيمته في نهاية هذه المرحلة 0.655 mA . عند وصل الدارة إلى مقاومة 100Ω ، لوحظ ارتفاع واضح في قيمة التيار المتولد، حيث بلغت قيمته الابتدائية 1.113 mA ، ثم استقرت مع مرور الزمن لتبلغ في نهاية هذه المرحلة 1.258 mA . لوحظ انخفاض واضح في قيم الـ (COD) في هذه الخلية حيث انخفضت قيمته من 196 mg/l ، إلى 108 mg/l ، عند وصل الدارة إلى مقاومة 550Ω ، كما انخفضت قيمته من 101 mg/l إلى 43 mg/l عند وصل الدارة إلى مقاومة 100Ω . بلغت كفاءة إزالة الـ (COD) في نهاية هذه المرحلة % (78.06). يوضح الشكلان (١٢) و (١٣) تغير قيم شدة التيار والـ (COD) بمرور الزمن عند تطبيق المقاومتين السابقتين على خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ.



الشكل (١٢) التيار المتولد عن خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ عند تطبيق المقاومتين 100Ω و 550Ω .



الشكل (١٣) تغير قيم الـ (COD) بمرور الزمن في خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ عند تطبيق المقاومتين 100Ω و 550Ω .

تشير النتائج الموضحة في الشكلين (١٢) و (١٣) إلى ارتفاع قيمة التيار المتولد عن مصعد الفولاذ عديم الصدأ بمرور الزمن بعد إضافة المغذيات، الأمر الذي قد يعزى إلى قيام البكتريا بأكسدة المادة العضوية وبالتالي إنتاج الإلكترونات مما أدى إلى ارتفاع قيمة التيار المتولد، كما لوحظ ارتفاع واضح في قيمة التيار بتخفيض قيمة المقاومة الخارجية إلى 100Ω ، الأمر الذي قد يعود إلى أنه عند المقاومة المنخفضة تتحرك الإلكترونات بسهولة أكبر عبر الدارة الخارجية مقارنةً بالمقاومة العالية، وبالتالي زيادة إمكانية توليد التيار الكهربائي. لوحظ أيضاً انخفاض في قيمة الـ (COD) بمرور الزمن بالتزامن مع ارتفاع قيمة التيار المتولد، الأمر الذي قد يعزى إلى زيادة إمكانية أكسدة المادة العضوية من قبل الكائنات الحية الدقيقة وبالتالي ارتفاع في كفاءة إزالة الـ (COD).

٥- الاستنتاجات والتوصيات

١-٥ الاستنتاجات

١. أظهرت النتائج الأولية ارتفاعاً في جهد الدارة المفتوحة عند بدء التشغيل في كلتا الخليتين.
٢. لوحظ ثبات في جهد الدارة المفتوحة مع مرور الزمن في خلية الوقود المزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ، في حين انخفض جهد الدارة المفتوحة بمرور الزمن في خلية الوقود المزودة بمصعد النحاس.
٣. تبين عند دراسة منحنيات الاستقطاب أن الخليتين قد سلكتا نفس السلوك مع فارق في قيم كثافة التيار والطاقة الناتجة قد يكون له علاقة باختلاف مساحة سطح المصعد المستخدم في كلتا الخليتين.
٤. لوحظ عند وصل دارتي الخليتين إلى مقاومة ثابتة انخفاض في قيمة التيار المتولد عن خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد النحاس بمرور الزمن، بينما ارتفعت قيمة التيار المتولد عن خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد الفولاذ عديم الصدأ بمرور الزمن.
٥. لم تحسن إضافة المغذيات إنتاج الطاقة الكهربائية في خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد النحاس، وإنما انخفضت قيمة التيار المتولد، بينما ارتفعت قيمة التيار المتولد عن خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد من الفولاذ عديم الصدأ عند إضافة المغذيات إليها.
٦. بلغت كفاءة إزالة الـ (COD) % (5.940) في خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد النحاس، بينما بلغت كفاءة الإزالة في خلية الوقود الميكروبية المزودة بمصعد الفولاذ عديم الصدأ % (78.06).
٧. أظهرت النتائج عدم كفاءة استخدام النحاس كمسرى كهربائي موجب على المدى الطويل في خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب.

٢-٥ التوصيات

١. البحث في إمكانية استخدام أنواع أخرى من المعادن كأقطاب كهربائية في خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب.
٢. البحث في إمكانية إدارة الطاقة الناتجة عن طريق تخزينها واستخدامها في أوقات محددة.
٣. إجراء أبحاث إضافية حول العوامل المؤثرة على إنتاج الطاقة الكهربائية في خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب.

المراجع - ٢

١. Ma, F., et al., *Control strategy for adaptive active energy harvesting in sediment microbial fuel cells*. Journal of Energy Engineering, 2020. 146(1): p. 04019034.
٢. Wang, Y., et al., *Integrating sludge microbial fuel cell with inclined plate settling and membrane filtration for electricity generation, efficient sludge reduction and high wastewater quality*. Chemical Engineering Journal, 2018. 331: p. 152-160.
٣. Liu, B., et al., *Distributed multiple-anodes benthic microbial fuel cell as reliable power source for subsea sensors*. Journal of Power Sources, 2015. 286: p. 210-216.
٤. Liu, L., et al., *Performance of freshwater sediment microbial fuel cells: Consistency*. International journal of hydrogen energy, 2016. 41(7): p. 4504-4508.
٥. Arias-Thode, Y.M., et al., *Demonstration of the SeptiStrand benthic microbial fuel cell powering a magnetometer for ship detection*. Journal of Power Sources, 2017. 356: p. 419-429.
٦. Olliot, M., et al., *Ion transport in microbial fuel cells: Key roles, theory and critical review*. Applied energy, 2016. 183: p. 1682-1704.
٧. Muler, A.I.C., *Effect of experimental parameters on the voltage output of a sediment microbial fuel cell*. 2016.
٨. Dewan, A., et al., *Alternative power sources for remote sensors: A review*. Journal of power sources, 2014. 245: p. 129-143.
٩. Prasad, J. and R.K. Tripathi. *Maximum electricity generation from low cost sediment microbial fuel cell using copper and zinc electrodes*. in *2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)*. 2017. IEEE.
١٠. Donovan, C., et al., *Sediment microbial fuel cell powering a submersible ultrasonic receiver: New approach to remote monitoring*. Journal of Power Sources, 2013. 233: p. 79-85.
١١. Wotawa-Bergen, A., et al. *Operational testing of sediment microbial fuel cells in San Diego Bay*. in *OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE*. 2010. IEEE.
١٢. Xu, X., et al., *Biodegradation of organic matter and anodic microbial communities analysis in sediment microbial fuel cells with/without Fe (III) oxide addition*. Bioresource technology, 2017. 225: p. 402-408.
١٣. Abazarian, E., R. Gheshlaghi, and M.A. Mahdavi, *The effect of number and configuration of sediment microbial fuel cells on their performance in an open channel architecture*. Journal of Power Sources, 2016. 325: p. 739-744.
١٤. Zhang, H., et al., *Effects of the presence of sheet iron in freshwater sediment on the performance of a sediment microbial fuel cell*. international journal of hydrogen energy, 2015. 40(46): p. 16566-16571.
١٥. Majumder, D., et al., *Electricity generation with a sediment microbial fuel cell equipped with an air-cathode system using photobacterium*. International journal of hydrogen energy, 2014. 39(36): p. 21215-21222.
١٦. Hong, S.W., et al., *Experimental evaluation of influential factors for electricity harvesting from sediment using microbial fuel cell*. Bioresource Technology, 2009. 100(12): p. 3029-3035.
١٧. Zhou, M., et al., *An overview of electrode materials in microbial fuel cells*. Journal of Power Sources, 2011. 20 (١٠) ١٩٦. ١١ p. 4427-4435.

١٨. An, J., et al., *Comparison in performance of sediment microbial fuel cells according to depth of embedded anode*. Bioresource technology, 2013. 127: p. 138-142.
١٩. Wu, Y.-c., et al., *Burial depth of anode affected the bacterial community structure of sediment microbial fuel cells*. Environmental Engineering Research, 2020. 25(6): p. 871-877.
٢٠. Ewing, T., et al., *Scale-up of sediment microbial fuel cells*. Journal of Power Sources, 2014. 272: p. 311-319.
٢١. Steels, A., *Stainless Steel Grade Datasheets*. Atlas Steels Technical Department, 2013.
٢٢. Nurettin, Ç., *Examination of zinc electrode performance in microbial fuel cells*. Gazi University Journal of Science, 2017. 30(4): p. 395-402.
٢٣. Haque, N., D. Cho, and S. Kwon. *Characteristics of electricity production by metallic and nonmetallic anodes immersed in mud sediment using sediment microbial fuel cell*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. IOP Publishing.
٢٤. Puig, S., et al., *Effect of pH on nutrient dynamics and electricity production using microbial fuel cells*. Bioresource technology, 2010. 101(24): p. 9594-9599.
٢٥. Taskan, E., B. Ozkaya, and H. Hasar, *Combination of a novel electrode material and artificial mediators to enhance power generation in an MFC*. Water Science and Technology, 2015. 71(3): p. 320-328.
٢٦. Zhu, X. and B.E. Logan, *Copper anode corrosion affects power generation in microbial fuel cells*. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2014. 89(3): p. 471-474.
٢٧. Ghangrekar, M. and V. Shinde. *Microbial fuel cell: a new approach of wastewater treatment with power generation*. in *International Workshop on R&D Frontiers in Water and Wastewater Management. Nagpur, India*. 2006. Citeseer.