

دراسة كفاءة توليد الطاقة ومعالجة المياه في خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب

د. هاجر ناصر*

د. حسين جنيدي**

باسم منصور***

(تاريخ الإيداع 11 / 6 / 2020. قُبل للنشر في 30 / 9 / 2020)

□ ملخص □

دُرست خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب من حيث توليد الطاقة الكهربائية ومعالجة المياه. وبهدف تصميم خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب (SMFC) (Sediment Microbial Fuel Cell)، أُحضرت الرواسب من سرير نهر الصنوبر، حيث جرى توصيفها لبيان المحتوى العضوي وعناصر التغذية فيها. زودت الخلية بمنظومة تهوية سطحية، وبدأ العمل فيها. حيث تمت مراقبة مؤشرات التيار الكهربائي ومؤشرات تلوث المياه بمرور الزمن. لاحقاً تم تغيير نمط التهوية وأُجريت القياسات السابقة لتوليد الكهرباء، ومؤشرات تلوث المياه، وتمت مقارنتها مع المرحلة السابقة.

أظهرت نتائج النمط الأول من التهوية أنّ القيمة العظمى لتيار الدارة القصيرة [Short Circuit Current (ISC)] بلغت 0.905 mA، بينما بلغت القيمة العظمى لجهد الدارة المفتوحة [Open Circuit Voltage (VOC)] 0.390 V. في حين لوحظ ارتفاع في قيم التيار والجهد الكهربائي في النمط الثاني من التهوية، حيث بلغت القيمة العظمى لتيار الدارة القصيرة 1.240 mA، والقيمة العظمى لجهد الدارة المفتوحة 0.430 V. عند وصل الدارة إلى مقاومة خارجية $R = 100 \Omega$ ، بلغت شدة التيار الكهربائي $I_R = 0.805 \text{ mA}$ ، والجهد $V_R = 0.084 \text{ V}$ ، وبلغت كثافة التيار الناتج 3.18 mA/m^2 ، وكثافة الطاقة 0.269 mW/m^2 . بالنسبة لتحاليل المياه فقد لوحظ ارتفاع في قيم الـ pH التي بلغت (8.90)، كما ارتفعت كفاءة إزالة الـ COD والفوسفات والنترات والأملاح المنحلة الكلية، حيث بلغت: 72.11 %، 62.70 %، 35.60 %، 30.61 %، على الترتيب.

الكلمات المفتاحية: خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب، توليد الكهرباء، الأقطاب الكهربائية، معالجة المياه.

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

** مدرّس - قسم هندسة النظم البيئية، المعهد العالي لبحوث البيئة، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

*** طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الكيمياء البيئية، المعهد العالي لبحوث البيئة، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

Bassemmansour115@gmail.com

A Study of the Efficiency of Power Generation and Water Treatment in the Sediment Microbial Fuel Cells (SMFC)

Dr. Hajar Nasser*
Dr. Hussein Juniedi**
Bassem Mansour***

(Received 11 / 6 / 2020. Accepted 30 / 9 / 2020)

□ ABSTRACT □

The Sediment microbial Fuel Cell (SMFC) has been studied in terms of electrical power generation, and water treatment. With the aim to design the Sediment Microbial Fuel Cell (SMFC), the sediment was brought from the Al-sonobar River bed, where it was described to indicate the organic content and nutrients in it. The cell was equipped with a surface aeration system and started working in it. Where it monitored the electrical current and water pollution indicators over time. Later the aeration mode was changed and previous measurements of electricity generation, water pollution indicators were carried out, and compared with the previous stage.

Results of the first mode of aeration have shown that the greatest value for Short Circuit Current (I_{SC}) was (0.905) mA while the greatest value for Open Circuit Voltage (V_{OC}) was (0.390) V. While a rise in current and voltage values was observed in the second mode of aeration, in which the greatest value of Short Circuit Current was (1.240) mA, and the greatest value of open circuit voltage (0.430) V. When the circuit has been connected to an external resistance $R=100\ \Omega$, the values for current, voltage, current density and power density were (0.805) mA, (0.084) V, (3.18) mA/m², and (0.269) mW/m², respectively. For water analysis, an increase in pH values of 8.90 was observed. The efficiency of removing of Chemical Oxygen Demand (COD), phosphates, nitrates and Total Dissolved Salts (TDS) has also increased, reaching: 72.11%, 62.70%, 35.60%, and 30.61%, respectively.

Keywords: Sediment Microbial Fuel Cells (SMFCs), Electricity generation, Electrodes, Water analysis.

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

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

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

E-mail: Bassemmansour115@gmail.com

مقدمة:

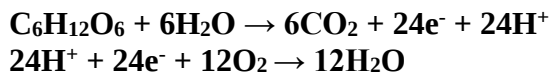
نظراً لتزايد عدد سكان العالم، فإن متطلبات الطاقة في ازدياد دائم، ووفقاً لوكالة الطاقة الدولية International Energy Agency (IEA) من المتوقع أن يرتفع الطلب على الطاقة ليصل بحدود عام 2035 إلى ما يعادل 18 مليار طن من النفط المكافئ سنوياً [1].

بالإضافة إلى ذلك، سيكون الوصول إلى مياه نظيفة محدوداً في أجزاء كثيرة من العالم، حيث أن معظم تقنيات معالجة المياه في وقتنا الحاضر تستهلك الكثير من الطاقة، ووفقاً للتقارير الأخيرة في الولايات المتحدة الأمريكية، فإن أنظمة معالجة المياه تستهلك حوالي 5% من الطاقة الكلية المنتجة في البلاد، مما يسبب عبئاً هائلاً على قطاع الطاقة [2]. لمعالجة هذه المشاكل، تم اكتشاف خلايا الوقود الميكروبية (Microbial fuel cells) (MFCs) كتنقية مبتكرة لإنتاج الطاقة ومعالجة المياه بطريقة أكثر اقتصادية واستدامة [2].

كانت الفكرة التي طورها عالم النبات البريطاني Potter [3] عام 1911 هي إنتاج الكهرباء باستخدام البكتيريا التي تؤكد الجزيئات العضوية، إلا أن هذا المفهوم لم يكن موضع تقدير جيد حتى عام 1999، عندما تبين أن البكتيريا يمكنها نقل الإلكترونات من وإلى الأقطاب الكهربائية [4]، حيث تقوم خلايا الوقود الميكروبية بتوليد الكهرباء ومعالجة المياه من خلال استهلاك المواد العضوية الموجودة في المياه [5,6]. شهدت هذه الفكرة اهتماماً هائلاً في المراكز البحثية العلمية في السنوات الأخيرة كمصدر واعد لتوفير الطاقة للأجهزة الإلكترونية [7]، كما شهدت تطوراً ملحوظاً حيث ظهرت خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب (Sediment Microbial Fuel Cells) (SMFCs) التي لعبت دوراً هاماً في تطوير خلايا الوقود الميكروبية، والتي تُعد أكثر قابلية للتطبيق كونها تؤمن الاحتياج الطاقوي، ومراقبة مؤشرات التلوث في البيئات البعيدة عن مصادر الطاقة دون الحاجة إلى استخدام البطاريات. تلعب الكائنات الحية الدقيقة دوراً رئيساً في توليد الكهرباء بواسطة (SMFCs)، وتنتج الطاقة من فرق الكمون الناتج بين طبقة المياه المهواة وطبقة الرواسب اللاهوائية [8].

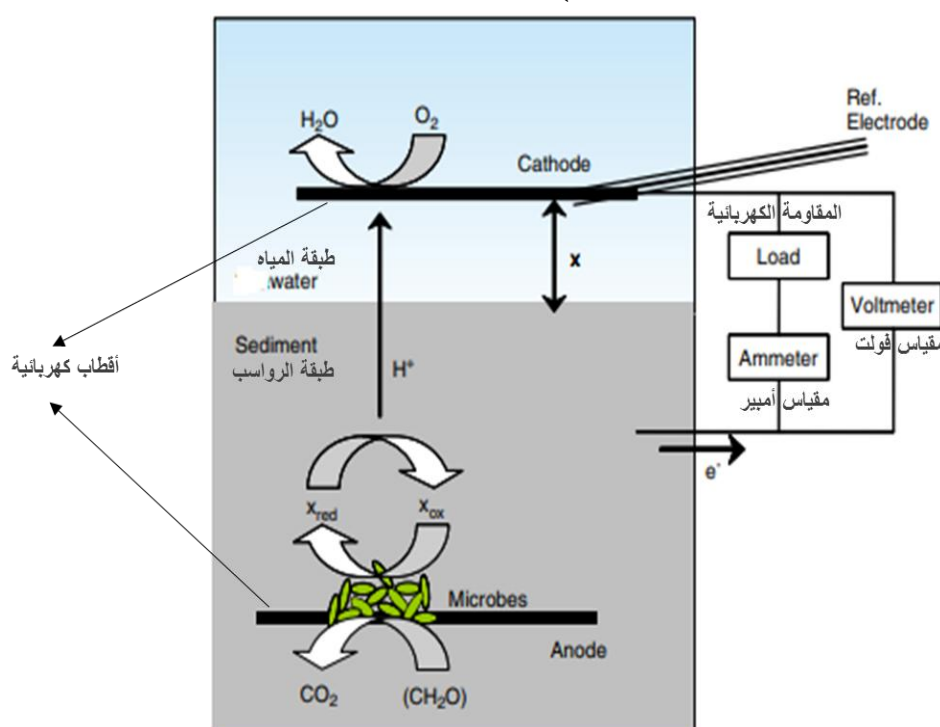
2. خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب (SMFC) (Sediment Microbial Fuel Cell)

خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب (SMFC) (Sediment Microbial Fuel Cell) هي نموذج متقدم لخلية الوقود الميكروبية، التي تعتبر الرواسب أحد مكوناتها الرئيسية الغنية بالمواد العضوية والتي تزود الكائنات الحية الدقيقة بالركائز اللازمة للتنفس الخلوي. تمثل الرواسب المصعد (Anode) في هذه الخلية، حيث تقوم الكائنات الحية الدقيقة باستقلاب المواد العضوية من خلال تفاعلات كيميائية حيوية، تلك التفاعلات تؤدي إلى إنتاج الإلكترونات، ثم تنتقل هذه الإلكترونات عبر الأقطاب باتجاه المهبط (Cathode) حيث تتحد مع الأكسجين المنحل لتكوين الماء، كما هو موضح في المعادلات أدناه. يؤدي حركة الإلكترونات المستمرة من خلال هذه الدارة الكهربائية إلى توليد التيار الكهربائي [9].



إن أهم الفروق الرئيسية بين خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب وخلية الوقود الميكروبية التقليدية هي أن الأولى تستخدم حجرة واحدة فقط لبناء خلية الوقود، تحتوي على المصعد (Anode) المغمور داخل المهبط (Cathode)، حيث يغمس الكترود المصعد داخل طبقة الرواسب، بينما يطفو الكترود المهبط في الماء، على عكس خلايا الوقود الميكروبية التقليدية التي تتكون من حجرتين: حجرة للمصعد وأخرى للمهبط يفصل بينهما غشاء تبادل بروتوني [10].

إن ميزة هذا النظام هو سهولة استخدامه في أي موقع، على اعتبار أن المواد اللازمة لبنائه بشكل أساسي هي الرواسب والمياه، وبالتالي يمكن تركيب هذه الخلايا في البحيرات والأنهار حيث تتوفر الرواسب القاعية. ولما كانت الرواسب والمياه متجددة في هذه المناطق من خلال عمليات التجدد الطبيعي الدائمة، فإن خلايا الوقود هذه يمكن أن تستمر لفترة زمنية غير محددة طالما أن هناك تجدداً للمياه، وبالتالي توافر المغذيات المنحلة والعالقة بصورة دائمة. يعد العمر الطويل أحد الميزات الهامة لخلايا الوقود الميكروبية، حيث يسمح التجدد الطبيعي لمكوناتها، واستخدام مواد خاملة في بنائها (أقطاب لا تتداخل مع التفاعلات والعمليات الحيوية) في توفير ميزات إضافية لهذه الخلايا: من حيث ندرة أعطالها، وبالتالي صيانتها المحدودة [11]. يظهر الشكل (1) نموذج لخلاية وقود ميكروبية لطبقة الرواسب (Sediment Microbial Fuel Cell):



الشكل (1) نموذج لخلاية وقود ميكروبية لطبقة الرواسب (SMFC) [12].

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث نظراً لكون الكثير من محطات الرصد البيئية في الأنهار والبحيرات السورية بحاجة للكهرباء بصورة مستمرة من أجل عمل أجهزة مراقبة مؤشرات التلوث في البيئة المائية. ونظراً لبعد هذه المراصد عن مصادر الكهرباء، واحتمالية انقطاع الكهرباء، فلا بد من وجود مصدر بديل لتوليد الطاقة الكهربائية. إضافة إلى ذلك، هناك أهمية بيئية تتمثل في كون هذه الخلايا صديقة للبيئة، والطاقة الناتجة عنها هي طاقة نظيفة، بالإضافة إلى الدور الذي تلعبه في معالجة المياه، وتقليل مستوى تلوثها. وهناك أيضاً أهمية اقتصادية، حيث أن مكوناتها الأساسية متوفرة وهي الرواسب والمياه، بالإضافة إلى استخدام مواد صديقة للبيئة، الأمر الذي يزيد من عمرها ويقلل من أعطالها.

تتلخص أهداف هذا البحث بما يأتي:

- توليد الطاقة الكهربائية وتأمينها في الموقع عن طريق تصميم خلية وقود ميكروبية لطبقة الرواسب؛
- تحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية لعينات التربة والمياه المدروسة؛
- مقارنة بين تراكيز مؤشرات تلوث المياه قبل وبعد تشغيل الخلية.

طرائق البحث ومواده:

مراحل البحث

تم في البداية تصميم خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب (Sediment Microbial Fuel Cell) (SMFC)، ثم تم العمل، بعد ذلك، على مرحلتين: في المرحلة الأولى، تم تحليل طبقة الرواسب (التربة) لتحديد الخصائص الكيميائية وأهم العناصر السائدة. تم بعد ذلك تشغيل الخلية وإجراء قياسات متكررة للجهد والتيار الكهربائي لمدة عشرة أيام وقياس تراكيز أهم مؤشرات تلوث المياه خلال هذه المرحلة. ولتأمين الأوكسجين اللازم في الطبقة السطحية بما يمثل طبيعة المياه في البيئة النهرية فقد تم اعتماد نظام تهوية مؤلف من مضخة تسريع، وأنبوب ضخ مثقب ومثبت فوق الخلية. أما في المرحلة الثانية، فقد تم تغيير نمط التهوية السطحية بحيث يحاكي البيئة النهرية من جهة، ويلغي إمكانية وصول الأوكسجين إلى طبقة الرواسب من جهة أخرى مع المحافظة على الشروط والتحليلات الخاصة بالمنظومة السابقة.

تصميم خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب (SMFC)

تم تصميم خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب (Sediment Microbial Fuel Cell) (SMFC) من حوض من البولي إيثيلين بأبعاد (100، 100، 50) سم، وسعة (500) لتر. وضعت فيه طبقة من الرواسب بسماكة 10 سم. زودت تلك الطبقة بشبكة أنابيب للمساعدة في إيصال المادة العضوية إلى طبقة الرواسب. غمرت طبقة الرواسب بالمياه بارتفاع 36 سم، كما زودت المنظومة بقطبين من الستانلس ستيل (304) (الذي يتكون من 8% نيكل و 18% كروم) [13]، بأبعاد (97.5، 26) سم، وسماكة (1) ملم. غُمر القطب الموجب (المصعد) في طبقة الرواسب على عمق (3) سم، أما القطب السالب فقد وضع في طبقة المياه على عمق (3) سم تحت سطح المياه، وبتباعد بين القطبين (33) سم. تم وصل الأقطاب باستخدام أسلاك من النحاس قطر (2) مم. ويهدف زيادة فعالية المنظومة السابقة تم تزويدها بمنظومة تهوية للطبقة السطحية من المياه بهدف زيادة تركيز الأوكسجين المنحل فيها.

المرحلة الأولى

تم في هذه المرحلة تزويد خلية الوقود الميكروبية بمنظومة تهوية سطحية. استخدمت في هذه المنظومة مضخة تسريع تقوم بسحب المياه من الحوض. تم تزويد المضخة بأنبوب ضخ مثبت فوق الخلية وعلى ارتفاع (20) سم فوق سطح المياه، ومثقب بثقوب قطر كل منها (1) مم، حيث تمر المياه عبر هذا الخط وتخرج من الثقوب لتصطدم بعواكس تساهم في ترديد المياه وزيادة تركيز الأوكسجين في الطبقة السطحية. يظهر الشكل (2) الخلية بشكلها الكامل مع منظومة التهوية المستخدمة.



الشكل (2) خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب (SMFC) مع نمط التهوية الأول المستخدم

المرحلة الثانية

لوحظ في المرحلة السابقة أن عملية التهوية والترذيز لم تكن مركزة، ومن الممكن أن تكون قد تخطت المنطقة المراد تهويتها، وبناءً على ذلك، تم في هذه المرحلة تغيير نمط التهوية السطحي للمياه (للحيلولة دون وصول الأكسجين إلى طبقة الرواسب) بحيث تصبح أقرب ما يمكن لظروف البيئة النهرية، حيث تم في هذه المرحلة وصل مضخة التسريع إلى خط ضخ مثبت على سطح طبقة المياه تماماً، يساير حركة جريان المياه في الطبقة السطحية، ومثقب بنقوب قطر كل منها (1 mm)، وبحيث تخرج المياه من الثقوب لتتصادم بسطح المياه مما يساهم بتشكيل أمواج أفقية تحاكي المياه في البيئة النهرية. يوضح الشكل (3) نمط التهوية الجديد المستخدم في الخلية في هذه المرحلة.



الشكل (3) نمط التهوية السطحية الثاني المستخدم في خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب

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 (Water Quality Tester) موديل (COM 100) لقياس الناقلية الكهربائية، والأملاح المنحلة الكلية؛
- ❖ جهاز قياس الأكسجين المنحل، ودرجة الحرارة (Dissolved Oxygen/temp. Meter) موديل (PDO-408) شركة (Ezdo)؛
- ❖ جهاز قياس الـ (COD) (Chemical Oxygen Demand) موديل (NVC 0747) شركة Macherey-Nagel؛

- ❖ جهاز قياس الأس الهيدروجيني الـ pH، موديل (7011) شركة (Ezdo)؛

- ❖ مضخة هواء + مضخة؛

- ❖ صفائح ستانلس ستيل + أسلاك نحاس؛

- ❖ مقاومات كهربائية؛

- ❖ أدوات مخبرية وزجاجيات لجمع العينات.

جمع العينات

تم جمع عينات التربة والمياه من حوض الخلية الموجود في مركز أبحاث طلاب الدراسات العليا التابع للمعهد العالي لبحوث البيئة، والواقع بين الـ وحدتين السكنيتين 17 و 18 في جامعة تشرين. تم إجراء القياسات الكهربائية وقياس بعض مؤشرات تلوث المياه بشكل مباشر ويومي وباستخدام أجهزة القياس الحقلية المناسبة، أما بالنسبة لباقي تحاليل المياه فقد تم إجراؤها في مخابر المعهد العالي لبحوث البيئة، قسم الكيمياء البيئية، وبالنسبة لعينات التربة فقد تم تحليلها في مخابر مركز البحوث الزراعية في الهنادي.

الحسابات الكهربائية

- تم حساب الاستطاعة الكهربائية من العلاقة:

$$P = V_R \times I_R \quad [14]$$

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:

$$i = I_R / A \quad [15]$$

A: مساحة سطح الأنود (m^2).

i: كثافة التيار (mA/m^2).

- تم حساب كثافة الطاقة من العلاقة:

$$p = P / A \quad [16]$$

p: كثافة الطاقة الناتجة (mW/m^2).

النتائج والمناقشة:**المرحلة الأولى**

تم في هذه المرحلة تحليل التربة، ثم تم إجراء قياسات كهربائية يومية لجهد الدارة المفتوحة وتيار الدارة القصيرة لمدة عشرة أيام، وبالتزامن مع القياسات الكهربائية تم إجراء قياسات فيزيائية وكيميائية لأهم مؤشرات تلوث المياه خلال الفترة الزمنية السابقة.

تحليل التربة

تم في البداية تحليل التربة بهدف تحديد المحتوى العضوي لها وكمية المغذيات المتوفرة للبكتريا أثناء توليد الطاقة الكهربائية. يظهر الجدول (1) أهم المؤشرات المقاسة عند تحليل التربة.

الجدول (1) أهم المؤشرات المقاسة أثناء تحليل التربة

المؤشر	القيمة	الوحدة
C/N	15.000	
pH	7.750	
EC	0.603	$\mu\text{S}/\text{cm}$
المادة العضوية	0.930	g/100 (g)
الأزوت المتاح	16.000	ppm
الفوسفور المتاح	4.000	ppm
البوتاسيوم	252.000	ppm

لوحظ من الجدول (2) أن معظم المؤشرات المقاسة كانت مناسبة لعمل البكتريا وضمن الحدود المسموح بها من أجل المعالجة اللاهوائية، حيث بلغت نسبة C/N (15) وهي مناسبة من أجل نمو البكتريا وتغذيتها [17]، وقيمة الـ pH (7.75) وهي ضمن الحدود المسموح بها لنشاط البكتريا اللاهوائية والتي تتراوح بين (6.5-8.5) [18]، وبلغ تركيز الأزوت المتاح (16 ppm)، والفوسفور المتاح (4 ppm).

التحليل الكهربائي

تم في هذه المرحلة تزويد خلية الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب بمنظومة التهوية السطحية وفق النمط الأول، ثم تركت الخلية بعد تزويدها بطبقة الرواسب والمياه اللازمة لمدة (48) ساعة كي تستقر، كما هو متبع في بروتوكول القياسات الكهروكيميائية (Standard Electrochemical Protocol). ثم تم، بعد ذلك، تشغيل جهاز التهوية السطحية وقياس جهد الدارة المفتوحة (V_{oc}) (Open Circuit Voltage) وتيار الدارة القصيرة (I_{sc}) (Short Circuit Current)، ومراقبة تغيرات الجهد والتيار الكهربائي على مدار عشرة أيام، حيث تم القياس بشكل يومي وضمن فواصل زمنية محددة. تم، بعد ذلك، حساب الاستطاعة الكهربائية الناتجة. يبين الجدول (2) تعيير قيم جهد الدارة المفتوحة وتيار الدارة القصيرة بمرور الزمن.

الجدول (2) القياسات الكهربائية الناتجة عن خلية الوقود الميكروبية بمرور الزمن

اليوم	مساحة سطح الأنود (m^2)	$I(sc)$ (mA)	$V(oc)$ (v)
1	0.253	0.905	0.358
2	0.253	0.397	0.264
3	0.253	0.410	0.279
4	0.253	0.606	0.289
5	0.253	0.607	0.390
6	0.253	0.693	0.354
7	0.253	0.707	0.295
8	0.253	0.483	0.210
9	0.253	0.650	0.200
10	0.253	0.603	0.200

يلاحظ من الجدول (1) انخفاض في جهد الدارة المفتوحة $V(oc)$ والتيار الدارة القصيرة $I(sc)$ مع بداية تشغيل جهاز التهوية السطحية، ثم عاد كل منهما للارتفاع تدريجياً، حيث بلغت أعظم قيمة لجهد الدارة المفتوحة $V(0.390)$ في نهاية اليوم الخامس، بينما بلغت شدة التيار الكهربائي في نهاية اليوم السابع $mA(0.707)$ وذلك عند قيمة $pH=8.90$ عند قطب الكاثود وهذا يتفق مع Puig وآخرون (2010) و Carlsson وآخرون (2008). قد يعزى السبب في ذلك إلى زيادة النشاط الميكروبي المساهم في تفكيك المادة العضوية، وبالتالي زيادة إنتاج الإلكترونات مع مرور الزمن. الأمر الذي ساهم في ارتفاع قيم شدة التيار تدريجياً. ثم لوحظ بعد ذلك انخفاض في قيم الجهد الكهربائي وشدة التيار وتآرجحها الذي قد يعزى إلى انخفاض تركيز المغذيات والمادة العضوية في طبقة الرواسب [19, 20].

لوحظ أيضاً انخفاض سريع في تيار الدارة القصيرة وجهد الدارة المفتوحة في اليوم الثامن، وقد يعزى السبب إلى انخفاض تركيز الأكسجين في الطبقة السطحية، حيث أنه وبسبب ارتفاع الحرارة وتوقف نظام التهوية حدث ما يشبه التطبق الحراري في الحوض والذي نجم عنه بقاء المياه الدافئة في الطبقة السطحية وباعتبار أن انحلالية الغازات تتناسب عكساً مع ارتفاع درجة الحرارة فإن تراكيز الأكسجين في هذه الطبقة كانت أقل، لذلك لوحظ تغيراً سريعاً في جهد الدارة المفتوحة والتيار الدارة القصيرة، وبعد أن تم تشغيل نظام التهوية من جديد، والذي أعاد مجانسة مياه الحوض، مما أدى إلى انخفاض حرارة المياه في الطبقة السطحية، وبالتالي زيادة تركيز الأكسجين المنحل فيها، وارتفاع قيم جهد الدارة المفتوحة والتيار الدارة القصيرة تدريجياً.

بلغت أعظم قيمة لشدة التيار الكهربائي $mA(0.707)$ في اليوم السابع، ولم تصل هذه القيمة إلى القيمة البدائية والتي كانت $mA(0.905)$ قبل بدء عملية التهوية السطحية. وقد يعزى السبب إلى أن طريقة التريز هذه تعدت بتأثيرها الطبقة السطحية للمياه، وبالتالي وصول اضطراب إلى مناطق قريبة من طبقة الرواسب مما أثر على كفاءة الطاقة الناتجة.

تحاليل المياه

تم في هذه المرحلة قياس أهم الخصائص الفيزيائية للمياه:

درجة الحرارة (t (°C)، الأس الهيدروجيني (pH)، الناقلية الكهربائية (Electrical Conductivity-EC)، الأملاح المنحلة الكلية (Total Dissolved Salts-TDS)، وذلك بالتزامن مع القياسات الكهربائية، حيث تم قياس هذه المؤشرات في كل يوم من الأيام التي تمت فيها القياسات الكهربائية. يوضح الجدول (3) أهم الخصائص الفيزيائية المقاسة للمياه خلال هذه المرحلة:

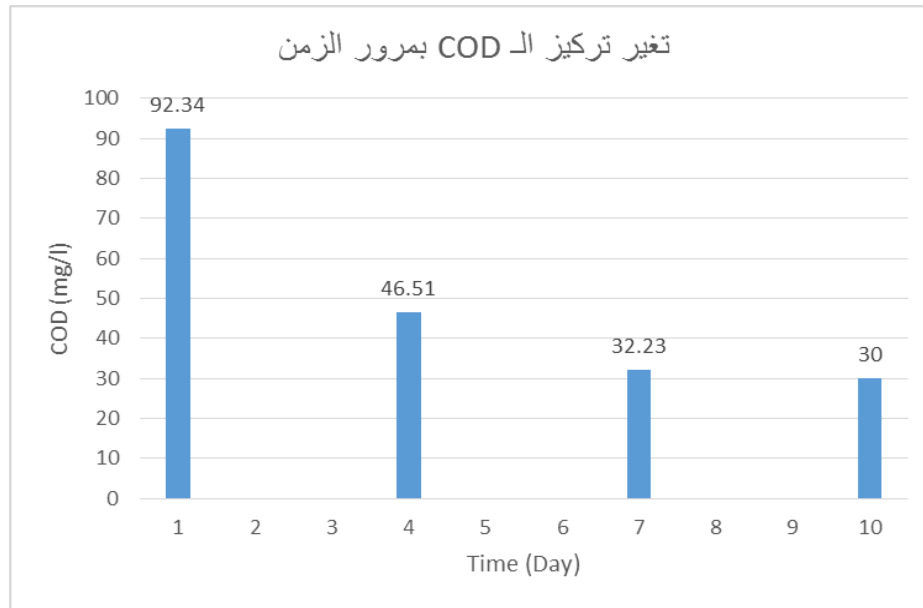
الجدول (3) الخصائص الفيزيائية للمياه خلال فترة القياس

اليوم	t (°C)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS (ppm)
1	18.700	8.300	523.000	238.000
2	16.600	8.660	481.500	235.500
3	21.200	8.690	473.000	234.000
4	21.700	8.820	449.200	222.600
5	16.700	8.550	404.900	199.380
6	18.400	8.700	405.700	200.800
7	17.400	8.900	394.300	195.100
8	17.300	9.000	394.000	196.300
9	18.000	8.900	395.800	195.800
10	17.700	8.900	400.600	197.000

لوحظ من الجدول (3) ارتفاع في قيم pH المياه عند قطب الكاثود حيث تراوحت بين (8.3-9) خلال فترة الدراسة. قد يعود السبب إلى استهلاك البروتونات أثناء تفاعلات الإرجاع على الكاثود، الأمر الذي أدى إلى رفع قيمة الـ pH [18].

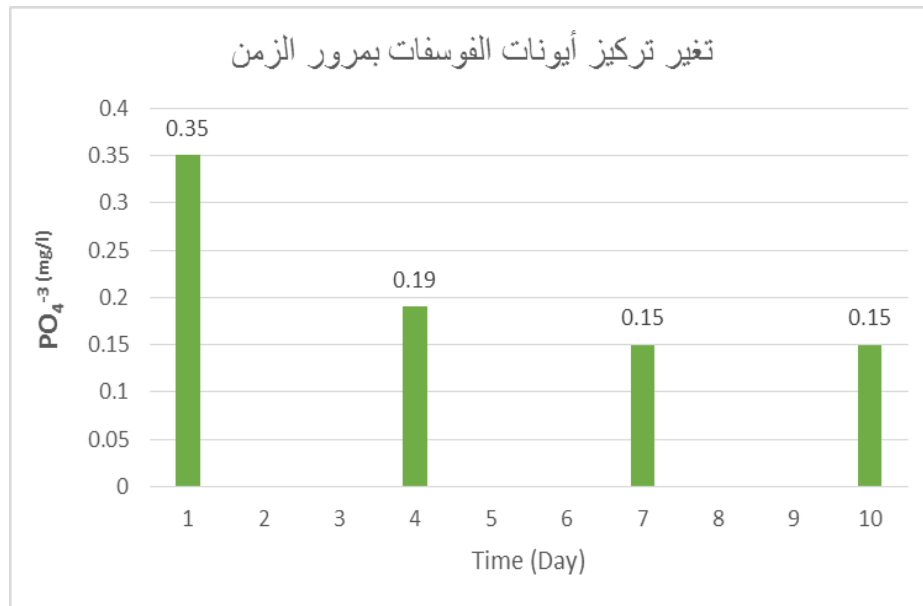
تراوحت درجة حرارة المياه بين (16.6-21.7) درجة مئوية، ولوحظ انخفاض في تركيز الأملاح المنحلة الكلية (TDS) (Total Dissolved Salt) بالتزامن مع بدء عملية التهوية السطحية، حيث بلغت كفاءة الإزالة في نهاية هذه المرحلة (17.23) %.

تم بعد ذلك قياس أهم مؤشرات تلوث المياه: الاحتياج الكيميائي للأكسجين Chemical Oxygen Demanded (COD)، تركيز أيونات الفوسفات (PO_4^{3-})، تركيز أيونات النترات (NO_3^-)، في المياه خلال هذه المرحلة. تظهر الأشكال (4، 5، 6) على الترتيب تغير تراكيز هذه المؤشرات بالتزامن مع توليد الطاقة الكهربائية خلال المرحلة السابقة.



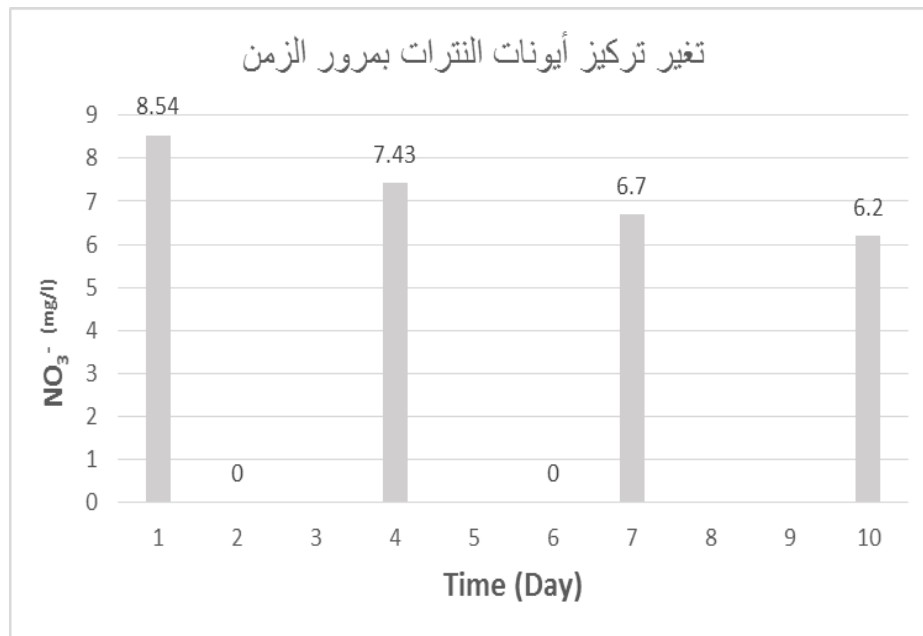
الشكل (4) تغير تركيز الـ COD بمرور الزمن خلال المرحلة السابقة

يظهر الشكل (4) انخفاض في تراكيز الـ (COD) بمرور الزمن، حيث بلغت كفاءة الإزالة (67.51) %، عند قيمة للأس الهيدروجيني بلغت $pH=8.90$ عند سطح الكاثود. قد يعزى ذلك إلى عمليات التحلل الحيوي التي تقوم بها البكتريا بالتزامن مع إنتاج الطاقة الكهربائية.

الشكل (5) تغير تراكيز الفوسفات (PO_4^{-3}) بمرور الزمن خلال المرحلة السابقة

يظهر الشكل (5) أن تراكيز الفوسفات كانت منخفضة نسبياً في المياه، ولوحظ انخفاض ملحوظ في هذه التراكيز خلال الأيام الأربعة الأولى. وقد يعزى السبب إلى أن الكائنات الحية أثناء عملية التغذية تستهلك المغذيات (فوسفات ونترات) من أجل بناء كتلتها الحيوية، أو بسبب الترسيب الكيميائي على شكل أملاح الفوسفات (فوسفات البوتاسيوم)، وخاصةً

أنه عند قيم الـ pH المرتفعة ($pH > 8.5$) تنخفض قابلية ذوبان أملاح الفوسفات بصورة عامة [17]. بلغت كفاءة إزالة الفوسفات في نهاية هذه المرحلة (57.14)%.



الشكل (6) تغير تراكيز النترا (NO_3^-) بمرور الزمن خلال المرحلة السابقة

يظهر الشكل (6) انخفاض قليل في تراكيز أيونات النترا بمرور الزمن بالتزامن مع إنتاج الطاقة الكهربائية، وبلغت كفاءة الإزالة في نهاية المرحلة السابقة (27.4)%.

المرحلة الثانية

لوحظ في المرحلة السابقة أن عملية التهوية لم تكن مركزة، ومن الممكن أن تكون قد تخطت المنطقة المراد تهويتها، وبناءً على ذلك، تم في هذه المرحلة تغيير نمط التهوية السطحية للحيلولة دون وصول الأكسجين إلى طبقة الرواسب بحيث تصبح أقرب ما يمكن لظروف البيئة النهرية، كما هو موضح في الشكل (3) الذي تم عرضه في مواد وطرائق البحث.

تم بعد ذلك تشغيل جهاز التهوية السطحية وقياس جهد الدارة المفتوحة (V_{oc}) وتيار الدارة القصيرة (I_{sc})، ثم وصلت الخلية إلى مقاومة خارجية 100Ω . وقياس شدة التيار الكهربائي (I_R)، والجهد الكهربائي (V_R)، بمرور الزمن ومراقبة تغيرات الجهد والتيار الكهربائي على مدار عشرة أيام. تم القياس بشكل يومي وضمن فواصل زمنية محددة. بعد ذلك تم حساب الاستطاعة الكهربائية الناتجة، وكثافة التيار الناتج وكثافة الطاقة الناتجة، وتحديد تراكيز أهم مؤشرات تلوث المياه، ومن ثم مقارنة نتائج هذه المرحلة مع المرحلة السابقة.

التحاليل الكهربائية

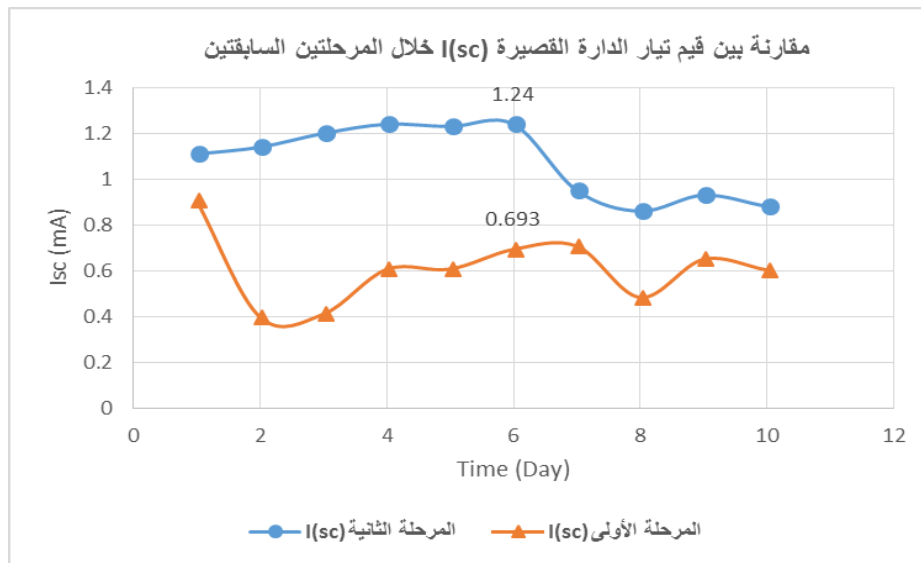
تم تشغيل جهاز التهوية السطحية ثم قياس جهد الدارة المفتوحة (V_{oc}) وتيار الدارة القصيرة (I_{sc})، ومراقبة تغيرات الجهد والتيار الكهربائي على مدار عشرة أيام، حيث تم

القياس بشكل يومي وفي أوقات محددة. تم بعد ذلك حساب الاستطاعة الكهربائية الناتجة. يظهر الجدول (4) قيم الجهد والتيار الكهربائي والاستطاعة الكهربائية الناتجة بمرور الزمن:

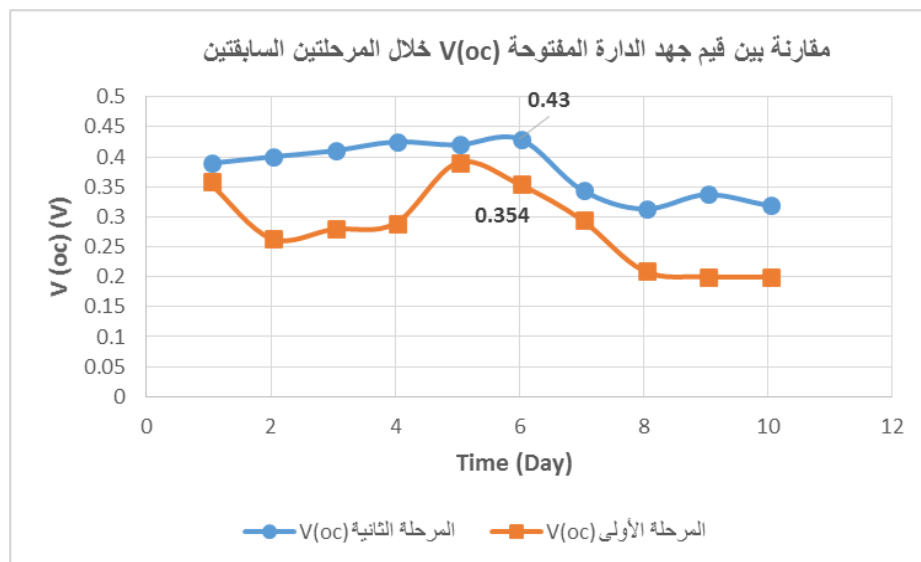
الجدول (4) القياسات الكهربائية الناتجة عن خلية الوقود الميكروبية بمرور الزمن خلال النمط الثاني من التهوية

اليوم	مساحة سطح الأنود (m^2)	$I_{(sc)}$ (mA)	$V_{(oc)}$ (V)	$I_{(R)}$ (mA)	$V_{(R)}$ (V)	P (mW)
1	0.253	1.110	0.389	0.712	0.075	0.053
2	0.253	1.140	0.400	0.731	0.078	0.057
3	0.253	1.200	0.410	0.779	0.080	0.062
4	0.253	1.240	0.425	0.795	0.082	0.065
5	0.253	1.230	0.420	0.799	0.082	0.066
6	0.253	1.240	0.430	0.805	0.084	0.068
7	0.253	0.950	0.345	0.660	0.071	0.049
8	0.253	0.860	0.313	0.600	0.065	0.039
9	0.253	0.930	0.337	0.640	0.068	0.044
10	0.253	0.880	0.319	0.610	0.063	0.038

يلاحظ من الجدول (4) ارتفاع واضح في قيم الجهد الكهربائي وشدة التيار مع مرور الزمن خلال الأيام الستة الأولى مقارنةً مع القيم ذاتها خلال نمط التهوية الأول، حيث بلغت قيم جهد الدارة المفتوحة والتيار الدارة القصيرة في اليوم السادس V (0.430)، و mA (1.240) على الترتيب، مقارنةً بـ V (0.354)، و mA (0.693) خلال المرحلة السابقة، وقد يعزى السبب إلى زيادة تركيز الأكسجين في الطبقة السطحية باستخدام نمط التهوية الجديد، واقتصار التهوية على الطبقة السطحية وعدم التأثير على طبقة الرواسب، الأمر الذي أدى إلى زيادة إنتاج الإلكترونات في طبقة الرواسب، وبالتالي ارتفاع في قيم تيار الدارة القصيرة وجهد الدارة المفتوحة. بلغت القيمة العظمى لشدة التيار الكهربائي $I_R = (0.805) mA$ ، والجهد الكهربائي $V_R = (0.084) V$ ، في اليوم السادس من الدراسة، مقارنةً بـ mA (0.098)، و V (0.098) في دراسة سابقة لـ Nurettin Cek عام 2017 [14]. يوضح الشكل (7) و (8) تيار الدارة القصيرة وجهد الدارة المفتوحة خلال المرحلتين السابقتين.



الشكل (7) مقارنة بين قيم تيار الدارة القصيرة $I(sc)$ خلال المرحلتين السابقتين



الشكل (8) مقارنة بين جهد الدارة المفتوحة $V(oc)$ خلال المرحلتين السابقتين

يلاحظ من الشكلين السابقين ارتفاع في كفاءة عمل الخلية: جهد الدارة المفتوحة $V(oc)$ ، وتيار الدارة القصيرة $I(sc)$ ، في مرحلة التريز الثانية مقارنةً مع مرحلة التريز الأولى. قد يعزى السبب إلى أن العملية الأخيرة قد ساهمت في زيادة تركيز الأكسجين وإبقائه في الطبقة السطحية والحبولة دون تأثيره على طبقة الرواسب، مما زاد من فاعلية البكتريا اللاهوائية في استقلاب المواد العضوية وإنتاج الإلكترونات. بلغت أعظم قيمة للاستطاعة الكهربائية الناتجة في اليوم السادس حيث بلغت 0.068 mW ، وبلغت كثافة التيار الناتج عندها 3.18 mA/m^2 ، وكثافة الطاقة الناتجة 0.269 mW/m^2 .

تحاليل المياه

تراوحت قيم pH المياه في هذه المرحلة بين (8.4-9)، ودرجة حرارة المياه بين (20-22) درجة مئوية، وبلغت كفاءة إزالة الأملاح المنحلة الكلية (30.61) % مقارنةً مع (17.23) % خلال المرحلة السابقة. بالنسبة للتحاليل الكيميائية: لوحظ ارتفاع في كفاءة إزالة الـ COD، والفوسفات والنترات في هذه المرحلة مقارنةً بالمرحلة السابقة، حيث بلغت كفاءة الإزالة على الترتيب (72.11) %، (62.70) %، (35.60) %. وقد يعزى السبب في ذلك إلى زيادة فعالية أداء البكتريا اللاهوائية في استقلاب المواد العضوية عند تغيير نمط التريز بحيث يحول دون وصول الأكسجين إلى طبقة الرواسب، الأمر الذي ساهم في رفع كفاءة المعالجة بالتزامن مع توليد الطاقة الكهربائية.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- i. أظهرت النتائج إمكانية توليد الطاقة الكهربائية باستخدام خلايا الوقود الميكروبية لطبقة الرواسب، بالتزامن مع معالجة المياه؛
- ii. لُحظ ارتفاع في قيم شدة التيار الكهربائي والجهد الكهربائي بتغيير نوع التهوية السطحي بما يحاكي البيئة النهرية؛
- iii. أظهرت النتائج ارتفاع نسبي في كفاءة معالجة المياه بتغيير نوع التهوية والتريز السطحي من النمط الأول الشاقولي إلى النمط الثاني الأفقي بحيث تصبح التهوية أقرب ما يمكن إلى البيئة النهرية.

التوصيات:

- ✓ دراسة إمكانية تطوير النموذج الحالي عن طريق استخدام أنواع جديدة من الأقطاب الكهربائية؛
- ✓ دراسة تأثير بعض العوامل: كالمسافة بين الأقطاب الكهربائية والأس الهيدروجيني والمقاومة الخارجية، على توليد الطاقة الكهربائية ومعالجة المياه؛
- ✓ البحث في إمكانية تخزين الطاقة المتولدة بحيث يتم الحصول على مصدر طاقي ثابت من أجل عمل أجهزة قياس مؤشرات تلوث المياه.

Reference:

1. CHU, S., MAJUMDAR, A. *Opportunities and challenges for a sustainable energy future.* 2012 Nature 488(7411), <http://www.nature.com/nature/journal/v488/n7411/pdf/nature11475>
2. WILLIAMS, S.E. *Energy usage comparison between activated sludge treatment and rotating biological contactor treatment of municipal wastewater.* 2012, www.williams-works.com
3. POTTER, M.C. *Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds.* Proc. R. Soc. Lond. Ser. B Contain. Pap. Biol. Character. 260-276.
4. KIM, B.H., KIM, H.J., HYUN, M.S., PARK, D.H. *Direct electrode reaction of Fe (III)-reducing bacterium, Shewanella putrefaciens.* J. Microbiol. Biotechnol. 9(2), 1999, 127.
5. RABAEY, K., VERSTRAETE, W. *Microbial fuel cells novel biotechnology for energy generation.* Trends Biotechnol. 23(6), 2005, 291.

6. MIN, B., LOGAN, B.E. *Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell*. Environ. Sci. Technol. 38(21), 2004, 5809.
7. SHUKLA, A., SURESH, P., BERCHMANS, S., RAJENDRAN, A. *Biological fuel cells and their applications*. Curr. Sci. 87(4), 2004, 455.
8. SAJANA, T. K., GHANGREKAR, M. M., MITRA, A. *Effect of pH and Distance between Electrodes on the Performance of a Sediment Microbial Fuel Cell*." Water Science and Technology 68, no. 3, 2013, 537-43.
9. DEWAN, A. BEYENAL, H. *Alternative power sources for remote sensors: A review*. Journal of Power Sources, No. 245, 2014, 129-143.
10. HAANDEL, C. GATZ, L. *Anaerobic Sewage Treatment*, John Wiley & Sons, Singapore, 1994.
11. DONOVAN, C. DEWAN, A. LEWANDOWSKI, Z. BEYENAL, H. *Sediment microbial fuel cell powering a submersible ultrasonic receiver: New approach to remote monitoring*. Journal of Power Sources. No. 233, 2013, 79-85.
12. SCOTT, K., COTLARCIUC, I., HEAD, I., KATURI, K. P., LAKEMAN, J. B., BROWNING, D. *Fuel Cell Power Generation from Marine Sediment: Investigation of Cathode Materials*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, United Kingdom, 83, 2008, 1244-1254.
13. *Stainless Steel Grade Datasheets*. Atlas Steels Technical Department. 2013. <http://www.atlassteels.com.au/http://www.atlassteels.com.au>
14. CEK, N. *Examination of Zinc Electrode Performance in Microbial Fuel Cells*. Journal of Science. Turkey, 30 (4), 2017, 395-402.
15. PRASAD, J., TRIPATHI, R.K. *Maximum Electricity Generation from Low Cost Sediment Microbial Fuel Cell using Copper and Zinc Electrodes*. International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control, 2017, Paper Id: 206.
16. HAQUE, N., CHO, D., KWON, S. *Characteristics of electricity production by metallic and nonmetallic anodes immersed in mud sediment using sediment microbial fuel cell*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 88, 2015, 1-12.
17. LIU, S. X. *Food and Agricultural Wastewater Utilization and Treatment*, Blackwell Publishing, USA, 2007, 277.
18. JADHAV, G.S., GHANGREKAR, M.M. *Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration*. Bioresour. Technol. 100 (2), 2009. 717-723.
19. PUIG, S., SERRA, M., COMA, M., CABRE, M., COLPRIM, J. *Effect of pH on nutrient dynamics and electricity production using microbial fuel cells*. Bioresource Technology, 101, 2010. 9594-9599.
20. CARLSSON, H., ASPEGREN, H., LEE, N., HILMER, A. *Calcium phosphate precipitation in biological phosphorus removal systems*. Water Res. 31 (5), 1997. 1047-1055.