

Electricity from Wastewater Treatment Plants

Abdulhakeem B. Miskeen ¹, Rahma S. Elzer ², Ibrahim K. Mangir ³,
Yasser F. Nassar ⁴, Hala J. ElKhozondar ^{5,6}, Mohamed M. Khaleel ⁷,
Abdussalam A. Ahmed ⁸, Abdulgader Alsharif ⁹, Ibrahim Imbayah ¹⁰.

^{1,4}Mechanical engineering and renewable energies, Wadi Alshatti University, Brack -Libya.

²Physics Department, Faculty of Science, Derna University, Derna-Libya.

³Higher Institute of Sciences and Technology, Tamezawa-Libya.

⁴Center for renewable energy and sustainable development research and studies, Wadi Alshatti University, Brack-Libya.

⁵Electrical engineering and smart systems, Faculty of engineering, Islamic University of Gaza, Palestine.

⁶Materials and London centre for nanotechnology, Imperial College, London-UK.

⁷Research and Development, College of Civil Aviation, Misrata-Libya.

⁸Mechanical Engineering, Bani Waleed University, Bani Waleed-Libya.

⁹Electrical & Electronics Engineering, Faculty of Technical Sciences, Sebha-Libya.

¹⁰Department of Energy Engineering, College of Renewable Energy, Tajura-Libya.

E-mail: a.binmiskeen@wau.edu.ly ¹, rahmaelzer454@gmail.com ², Engibrahim1019@gmail.com ³, y.nassar@wau.edu.ly ⁴, hkhonzondar@iugaza.edu.ly ⁵, lykhaleel@yahoo.co.uk ⁷, abdussalam.a.ahmed@gmail.com ⁸, alsharif@ctss.edu.ly ⁹, ibrahim.alzayani@gmail.com ¹⁰.

ARTICLE INFO.

Article history:

Received 20 August 2023

Received in revised form 23 August 2023

Accepted 10 September 2023

Available online 29 September 2023

KEYWORDS

Hydropower energy, wastewater treatment plant, potential energy, biomass energy, Gharyan, Libya.

ABSTRACT

Wastewater treatment plants that are located in high places can provide opportunities for generating sustainable energy, by installing hydroturbines at inlet and exit pipes of wastewater treatment plants, as well as exploiting the sludge resulting from the treatment process as a source for generating biogas, which can be used to generate electric power. Then the treated water is used to irrigate ornamental trees in the roads, gardens and forests, as well as the residues of the fermentation process are used as organic fertilizer and to improve the quality of agricultural soil. In this research, a hybrid system consisting of a hydroelectric station and an electric generator working on biogas was proposed at the wastewater treatment plant in Gharyan.

This is because the city is distinguished by its high location, about 713 m above sea level. The obtained results showed that the proposed hybrid renewable energy system will provide the wastewater treatment plant an electric power of 490 kW, which is sufficient to cover 87.5% of the plant's electrical energy consumption.

*Corresponding author.



DOI: -----

This is an open access article under the CC BY-NC license ([http://Attribution-NonCommercial 4.0 \(CC BY-NC 4.0\)](http://Attribution-NonCommercial 4.0 (CC BY-NC 4.0))).

The amount of treated water was about 13,000 m³/day, and the amount of organic fertilizer was about 17 tons/day. The investment value was estimated at about \$1,478,000, and the leveled cost of energy LCOE was estimated at about 2.88 ¢/kWh. The annual net profit from the proposed system is estimated at \$307,765/year, and the payback time money at 3.44 years. The proposed system will prevent the release of an annual amount of CO₂ gas estimated at 1,886 tons.

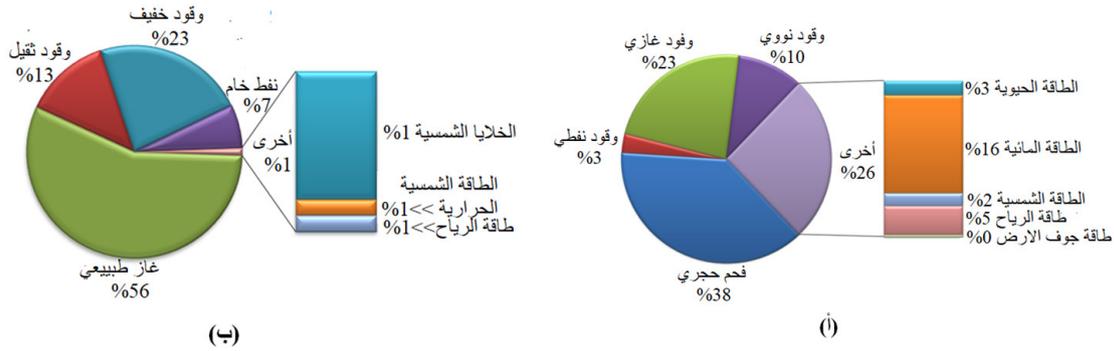
توليد الطاقة الكهربائية من محطات مياه الصرف الصحي

عبدالحكيم بشير بن مسكين¹، رحمة سعد الزبير²، ابراهيم خميس معنقر³، باسرفتحى نصار⁴، هالة جارالله الخزندار⁵، محمد محمد خليل⁷، عبدالسلام علي أحمد⁸، عبدالقادر حسين الشريف⁸، ابراهيم امبيبة¹⁰.

ملخص: تيمكن أن توفر محطات معالجة مياه الصرف الصحي التي توجد في أماكن مرتفعة فرصاً لتوليد الطاقة المتجددة والمستدامة، وذلك بتركيب توربينات كهرومائية عند مدخل ومصب محطات معالجة مياه الصرف الصحي، وكذلك استغلال الحمأة الناتجة من عملية المعالجة كمصدر لتوليد البيوغاز والذي يمكن استخدامه لتوليد الطاقة الكهربائية. ثم تستخدم الماء المعالج لري اشجار الزينة في الطرقات والحدائق والغابات، وكذلك تستخدم مخلفات عملية التخمير كسماد عضوي ولتحسين جودة التربة الزراعية. في هذا البحث تم اقتراح منظومة هجينة تتكون من محطة كهرومائية ومولد كهربائي يعمل على البيوغاز في محطة الصرف الصحي بمدينة غريان. وذلك لتميز المدينة بموقعها المرتفع بحوالي 713 متراً فوق سطح البحر. بينت النتائج المتحصلة عليها من ان النظام المقترح سيؤمّن طاقة كهربائية قدرها 490 kW، وهو ما يكفي لتغطية 87.5% من استهلاك المحطة للطاقة الكهربائية. وبلغت كمية المياه المعالجة حوالي 13,000 m³/day وكمية السماد العضوي حوالي 17 ton/day. وقدرت قيمة الاستثمار بحوالي \$1,478,000، وتكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية بحوالي 2.88 ¢/kWh. وصافي الربح السنوي من هذه المنظومة يقدر بحوالي \$307,765/year. وأن فترة استرداد رأس المال يقدر بحوالي 3.44 years. وستحول المنظومة الهجينة المقترحة دون اطلاق كمية من غاز CO₂ سنوية تقدر بحوالي 1,886 ton.

1. مقدمة

تعتبر الطاقة أحد أهم العناصر الأساسية للحياة البشرية، وذلك لأهميتها في تعزيز البنية التحتية، وأيضاً عاملاً حاسماً للتنمية الاقتصادية وتوفير فرص العمل. في نهاية القرن الماضي أخذت المشاكل المتعلقة بالطاقة نحواً جديداً، وخاصة تلك المتعلقة بتوليد الطاقة الكهربائية من الوقود الأحفوري. ظهور المشاكل البيئية الخطيرة التي تهدد الحياة البشرية على الكرة الأرضية مثل، التغيير المناخي والاحتباس الحراري. حيث يتم توليد أكثر من 64% من الكهرباء والطاقة الحرارية في العالم عن طريق حرق الوقود الأحفوري في محطات الطاقة التقليدية [1]، وتبلغ مجموع انبعاثات الغازات الدفيئة حوالي 15.83 بليون طن حسب احصائيات عام 2019 [2]. أما في ليبيا فيتم توليد الكهرباء بنسبة 99% تقريباً على أساس الوقود الأحفوري، مما يضع صناعة الطاقة في المقام الأول من حيث الانبعاثات من بين جميع الأنشطة البشرية الأخرى التي تمثل حوالي 36% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في البلاد [3,4]. يوضح الشكل 1 مساهمة انواع الطاقات الابتدائية المستخدمة في توليد الكهرباء في عام 2020 في العالم وفي ليبيا. في نفس الوقت، سُجل ارتفاعاً كبيراً للطلب على الكهرباء في جميع أنحاء العالم. وتتزايد هذه التحديات باستمرار، مما يشير إلى الحاجة إلى بدائل أخرى لتوليد الطاقة بكفاءة عالية وصديقة للبيئة ومستدامة [5-7]. أحد هذه البدائل هو توليد الكهرباء في أقرب مكان ممكن من موقع الاستهلاك، باستخدام مصادر الطاقات المتجددة والنظيفة المتاحة محلياً، مثل طاقة الرياح [8-18]، والطاقة الشمسية [19-30]، وطاقة الكتلة الحيوية [31-34]، والطاقة الكهرومائية [35-38].



الشكل 1: نسب توليد الطاقة الكهربائية على أساس الوقود المستخدم (أ) في العالم [1] ، (ب) في ليبيا (GECOL, 2022).

سعيًا من الحكومة الليبية لتحقيق التزاماتها تجاه المجتمع الدولي في تخفيض نسب انبعاث غاز CO_2 من جهة، وامتداد مجتمعها بمصدر طاقة آمن ومستدام، أعلنت الحكومة الليبية عن خطتها الاستراتيجية لتوليد الطاقة الكهربائية من بعض الطاقات المتجددة المتاحة في الدولة للثلاثين سنة القادمة في COP 27 (مؤتمر الأمم المتحدة لتغير المناخ) المنعقد في مدينة شرم الشيخ بمصر في الفترة 6-18 نوفمبر 2022، والتي تهدف إلى تحقيق مشاركة الطاقات المتجددة في مزيج إنتاج الطاقة الكهربائية بنسبة 25% بحلول عام 2025 ، وبحدود 30% بحلول عام 2030 ، وحوالي 60% بحلول عام 2050، عن طريق التوليد الكهروضوئي والحراري للطاقة الشمسية وطاقة الرياح [39]. وبالرغم من عدم احتواء الخطة على الطاقة الكهرومائية ولا طاقة الكتلة الحيوية إلا أن استخدامها ضرورة حتمية كمصدر لتوليد الطاقة، كما هو الحال في محطات معالجة المياه في المناطق الجبلية، أو كمصدر للوقود الحيوي لتشغيل مولدات توليد الكهرباء أو التوربينات الغازية، أو لتخزين الطاقة كما هو الحال في خزانات الطاقة الهيدروليكية (HydroPower Storage) وبالتكامل مع المصادر المذكورة في الخطة [40، 41]، كما تعتبر الطاقة الكهرومائية من أنظف الطاقات المتجددة، حيث يبلغ معامل انبعاث غاز CO_2 خلال دورة حياة المحطة حوالي $18.5 \text{ g } CO_2/kWh$ [42] مقارنة بالخلايا الشمسية ($60 \text{ g } CO_2/kWh$) أو طاقة الرياح ($47 \text{ g } CO_2/kWh$) [8]. تعتبر مياه الصرف الصحي مصدراً للطاقة المتجددة والمستدامة. حيث يمكن توليد الطاقة الكهربائية عن طريق تركيب توربينات داخل أنابيب الصرف الصحي للمدن والاستفادة من التدفق الطبيعي بسبب الجاذبية [43]. على سبيل المثال، أنشأت حكومة New South Wales في أستراليا أول محطة في عام 2010 بسعة 4.5 MW باستخدام مياه الصرف الصحي المعالجة المتساقطة من ارتفاع 60 m لتوليد 58% من طاقتها [34]. عرضت Rosa et al. قائمة تضمنت 49 مشروعاً للطاقة الكهرومائية لأنظمة مياه الصرف الصحي على مستوى العالم. تستفيد محطتان في سويسرا من الطاقة الكامنة في المرتفعات العالية.

حيث يتم توليد 851 MWh/year أي ما يكافئ مولد بقدرة 380 kW من الطاقة الكهرومائية في محطة Profray (بسعة $8,600 \text{ m}^3/\text{day}$) الواقعة في مدينة Bagnes، من تدفق مياه الصرف الصحي من على ارتفاع 449 m ، كما تولد محطة La Louve بمدينة Lausanne (بسعة $10,400 \text{ m}^3$) حوالي نصف الطاقة (460 MWh/year) أي ما يكافئ مولد بقدرة 170 kW) من مكب المياه للمحطة على ارتفاع 180 m [45]. كما تبلغ قدرة محطة معالجة المياه في مدينة Seefeld Zirl النمساوية $1,192 \text{ kW}$ من على ارتفاع 94 m [46]. في الأردن، تعالج محطة سمارا بعمان حوالي 70% من مياه الصرف الصحي في الأردن، بسعة $364,000 \text{ m}^3/\text{day}$. يتم تلبية ما يقارب من 80% من متطلبات الطاقة للمحطة باستخدام موارد الطاقة الداخلية. كما تستخدم المياه المعالجة في الزراعة والتي تمثل حوالي 10% من استهلاك المياه في الأردن، كما حالت المحطة دون إطلاق $300,000 \text{ ton } CO_2/\text{year}$ في الهواء الجوي بفضل إنتاج الكهرباء داخل المحطة [47].

في تركيا، حدد Baran سبع مناطق جغرافية محتملة يمكن أن تولد سنويًا 38.53 GWh/year من الكهرباء من محطة معالجة مياه الصرف الصحي الكهرومائية، وهو ما يكفي لإنارة الشوارع في هذه المناطق السبع [48]. وبناء على مراجعة الأبحاث السابقة، فإنه يمكن الاستفادة من محطات معالجة مياه الصرف الصحي بالإضافة إلى معالجتها للمياه قبل طردها في البيئة، في توليد الطاقة الكهربائية لتغطية جزء من متطلبات المحطة من الطاقة الكهربائية. وذلك بعدة طرق:

1. الاستفادة من طاقة الوضع لمحطة المعالجة في المدن الجبلية المرتفعة.
2. استخدام المخلفات الصلبة بعد عمليات الفصل والترشيح لمياه الصرف الصحي ككتلة حيوية لتوليد الغاز الحيوي.
3. الاستفادة من طاقة الحركة لمياه الصرف الصحي بسبب الجاذبية الأرضية في شبكة الصرف الصحي.

وبالرغم من أهمية الموضوع إلا أنه لم يلق اهتماماً على المستوى المحلي. فنجد العديد من الأبحاث تناولت موضوع الطاقة الكهرومائية من وجهة نظر تخزين الطاقة في خزانات مرتفعة أو طاقة الأنهار، ولم يعثر إلا على بحثاً واحداً تناول موضوع استغلال مياه الصرف الصحي في توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا [35].

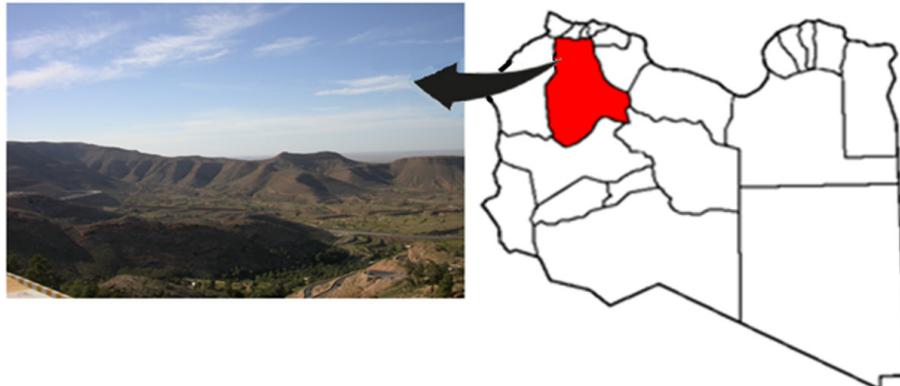
تبعاً تستعرض الدراسة الأجزاء التالية: الجزء الثاني (المواد وطرق العمل)، والذي يتضمن وصفاً للموقع الحالي لمحطة الصرف الصحي، وكذلك أشتمل على الحسابات النظرية للطاقة والاقتصاد والبيئة. بينما عرضت النتائج في الجزء الثالث (النتائج والمناقشة). وتضمن الجزء الرابع تحليلاً للوضع العام لمحطات معالجة مياه الصرف الصحي في ليبيا. ودرجت الاستنتاجات والتوصيات في الجزء الخامس، وختمت الدراسة بقائمة المراجع المستخدمة.

2. المواد وطرق العمل

1.2. البيانات العامة لموقع الدراسة

تقع مدينة غريان في الجزء الشمالي الغربي للبيبا، على قمة الجبل الغربي. ترتفع غريان حوالي 713 m عن سطح البحر (شكل 2). يبلغ عدد سكانها قرابة 187,854 نسمة وفقاً لإحصائيات سنة 2011، وتبلغ مساحة المدينة بدون الضواحي 4,660 كيلومتراً مربعاً [49]. أنشأت محطة تجميع ومعالجة مياه الصرف الصحي في عام 1971، وبسعة $2,220 \text{ m}^3$ ، وتعالج ما يقدر بحوالي $13,000 \text{ m}^3/\text{day}$. وتخدم منطقة (تغسات) فقط والتي يبلغ عدد سكانها حوالي 19,000 نسمة حسب إحصائيات سنة 2011، بمتوسط للفرد الواحد حوالي $0.684 \text{ m}^3/\text{day}$. الشكل 3 يبين صورة جوية للمحطة. ترتفع محطة الصرف الصحي حوالي 673 m عن سطح البحر. عند هذا الارتفاع توجد طاقة وضع تقدر بحوالي 6.6 MW/m^3 . قام بعض المؤلفين بزيارة ميدانية لمحطة الصرف الصحي في 7 يونيو 2019، وذلك لمعرفة مكونات المحطة والحصول على المعلومات التصميمية والتشغيلية للمحطة. وبالرغم من عدم توفر معلومات عن معدلات مياه الصرف الصحي في ليبيا بالنسبة للسكان، إلا أن بلدية غريان تقوم بدراسة على توصيل كافة المدينة بشبكة صرف صحي، بالإضافة إلى إنشاء محطة تجميع صرف صحي جديدة بدلاً من الحالية والتي انتهى عمرها الافتراضي. مما أعطى بعداً تصميمياً للدراسة الحالية بتسليط الضوء على إمكانية توليد طاقة كهربائية من المحطة الجديدة وأخذ هذه الميزة بالحسبان عند التعاقد على إنشاء المحطة الجديدة. تعمل محطة المعالجة في عدة مراحل، وهي كالتالي:

- 1- مدخل المحطة: يوجد بالمحطة مدخلين وبكل مدخل مفتت لتفتيت المواد الصلبة.
- 2- رافع الرمال: وهو عبارة عن حوض يوجد به محرك لتدوير المياه ومضخة لترجيع المياه إلى الحوض ويتم إخراج الرمال عن طريق كاشطة لإخراج الرمال المترسبة في قاع الحوض.
- 3- أحواض التهوية: ويوجد بالمحطة حوضين تهوية، حيث يتم تنشيط البكتيريا داخل الأحواض عن طريق مراوح هواء لتحليل المواد العضوية والقضاء على الجراثيم.
- 4- أحواض الترسيب: تعمل على ترسيب المواد العضوية (الحمأة) داخل الأحواض.
- 5- الفلاتر: تقوم الفلاتر بتصفية المياه من العوالق.
- 6- خزان الكلورة: حيث يتم حقن الكلور من اسطوانات الكلور عن طريق جهاز إلى خزان الكلورة.
- 7- مضخة الترجيع: وهي مضخات لولبية تعمل على ترجيع المياه من جميع مراحل المحطة وتقوم بنقل الحمأة من أحواض الترسيب إلى أحواض التجفيف أو إعادة المياه إلى أحواض التهوية.
- 8- أحواض التجفيف: تعمل على تجفيف المواد العضوية.



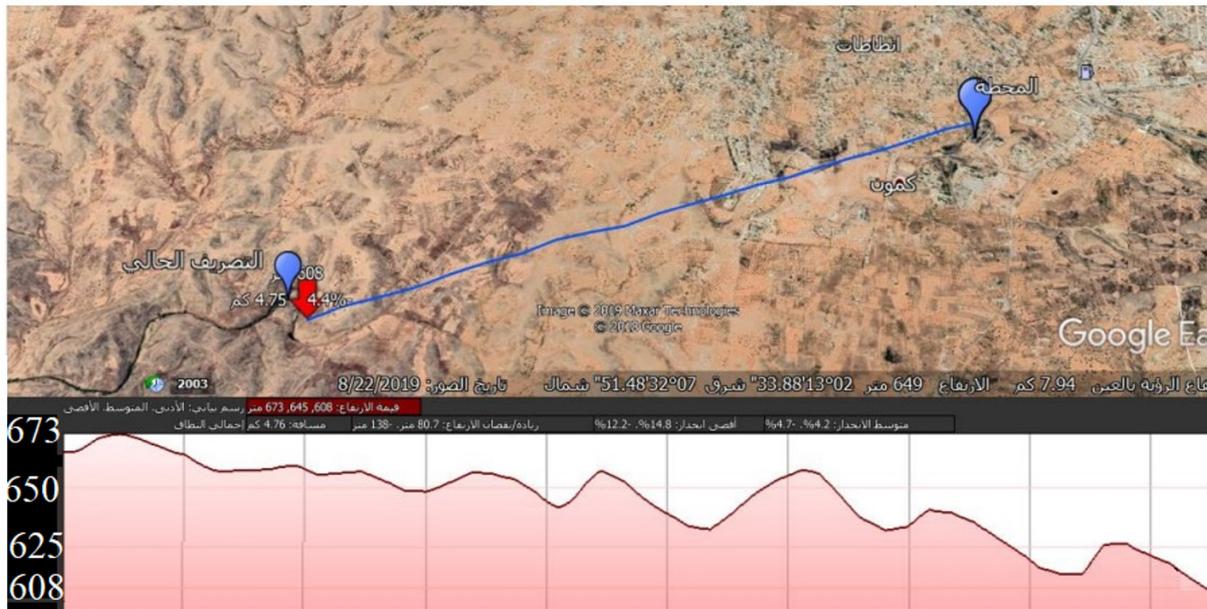
الشكل 2: خريطة ليبيا موضحة موقع مدينة غريان وصورة لتضاريس المنطقة



الشكل 3: صورة جوية لمحطة معالجة مياه الصرف الصحي بمدينة غريان
[Source: <https://earth.google.com/web/search/32.15153203,13.03476738,662.53720067a>]

2.2. البيانات التصميمية والتشغيلية لمحطة معالجة مياه الصرف الصحي بمدينة غريان

تستقبل المحطة مياه الصرف الصحي القادمة من شبكة الصرف الصحي للمدينة عن طريق أنبوبين بقطر (0.9 m)، وتبلغ كمية المياه المعالجة سنويا حوالي (13,100 m³/day).
تقدر كمية المواد الصلبة المستخرجة من المحطة حوالي (360 m³/month). يبلغ طول أنبوب التصريف لمحطة معالجة مياه الصرف الصحي حوالي (4,700m)، وبقطر (0.5 m)، وانحداره عن نقطة الخروج من المحطة حوالي (65 m)، ومعدل التدفق الحجمي للمياه المعالجة حوالي (10.15 m³/s). ويبلغ متوسط استهلاك الطاقة الكهربائية في المحطة حوالي 9,923 kWh/day.
يستعرض الشكل 4 صورة من Google earth مبينا عليها تضاريس المنطقة الواقعة بها محطة معالجة مياه الصرف الصحي وطول ومنسوب الانحدار لانبوب التصريف.



الشكل 4: صورة من Google earth لتضاريس المنطقة الواقعة بها محطة معالجة مياه الصرف الصحي وطول ومنسوب ارتفاعات انبوب التصريف

3.2. التحليل الرياضي للطاقة الكهرومائية

يمكن توليد الطاقة الكهربائية من محطات معالجة المياه بطريقتين:

1.3.2. طاقة الوضع

لتحديد امكانيات قدرة مياه الصرف الصحي المعالجة على توليد الطاقة (P_p (kW)، من الضروري تحديد معدل تدفق الماء والارتفاع الذي ينحدر منه الماء. ويمكن حساب الطاقة المنتجة على النحو التالي [36]:

$$P_p = [\rho g Q (H - h_f) \eta_t]_{inlet} + [\rho g Q (H - h_f) \eta_t]_{outlet} \quad \dots\dots(1)$$

حيث η_t تمثل الكفاءة الهيدروليكية للتوربين 90%، $\rho =$ كثافة الماء (kg/m^3)، $g =$ عجلة الجاذبية الأرضية (9.81 m/s^2)، Q يمثل معدل التدفق الحجمي للماء (m^3/s)، H يمثل ارتفاع الذي ينحدر منه الماء (m)، h_f يمثل الفقد في الضغط نتيجة الاحتكاك في أنبوب التصريف (m)، الرموز السفلية inlet ، outlet تشير الى منطقة الدخول والخروج من وإلى المحطة.

2.3.2. طاقة الكتلة الحيوية

يمكن تقدير كمية الطاقة الكامنة (P_s (kW) في الحمأة من المعادلة التالية [50]:

$$P_s = W_{SW} \quad SR \quad G_{SW} \quad H_{CH_4} \quad \eta_{ele} \quad \dots\dots\dots(2)$$

حيث يشير W_{SW} الى متوسط كمية مياه الصرف الصحي المعالجة (G_{SW} (m^3/hr) يمثل معدل إنتاج البيوغاز من الحمأة ويقدر بحوالي $243 \text{ m}^3/\text{ton}$ [51]، SR يمثل كمية الحمأة في مياه الصرف الصحي وتقدر بحوالي 1.3 kg/m^3 [35]، H_{CH_4} يمثل القيمة الحرارية للغاز الحيوي (5.56 kWh/m^3) [52]، η_{ele} يمثل كفاءة منظومة توليد الكهرباء المستخدمة [3] (%83).

3.3.2. الطاقة الكلية المنتجة من المحطة

وبالتالي فان اجمالي الطاقة (P_{sw} (kW) التي يمكن توليدها ذاتيا من محطة معالجة مياه الصرف الصحي:

$$P_{sw} = P_p + P_s \quad \dots\dots\dots(3)$$

4.2. الحسابات الهيدروليكية

تهدف الحسابات الهيدروليكية الى ايجاد قيم المدلولات الموجودة في معادلات حسابات الطاقة المتاحة. تحسب الفواقد الناتجة من الاحتكاك h_f من معادلة دارسي [53]:

$$h_f = \frac{8L \quad f \quad Q^2}{\pi^2 \quad g \quad D^5} \quad \dots\dots\dots(4)$$

حيث D يمثل قطر أنبوب التصريف (m)، L يمثل طول أنبوب التصريف (m)، و f يمثل معامل الاحتكاك، ويحسب من المعادلة (5) [53]:

$$f = \left\{ 1.8 \quad \log \left[\frac{6.9}{R_e} + \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} \right)^{1.11} \right] \right\}^{-2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

حيث ε يمثل خشونة السطح الداخلي لانبوب التصريف (m)، R_e يمثل عدد رينولد ويحسب من المعادلة (7) [53]:

$$R_e = \frac{4Q}{\pi \quad D \quad v} \quad \dots\dots\dots(6)$$

حيث v تمثل اللزوجة الكينماتيكية للماء (m^2/s).

5.2. الحسابات الاقتصادية والبيئية

يعتبر تكلفة سعر وحدة الطاقة المنتجة (LCOE) مؤشراً اقتصادياً لتحديد الربح من المشروع ودليل للمقارنة مع بدائل أخرى للتوليد. يمكن حساب LCOE باعتبار تكلفة الضرر البيئي الناتج من غاز ثاني أكسيد الكربون (C_{CO_2}) من المعادلة التالية [54]:

$$LCOE = \frac{\left(\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}\right) \times (C_{C,P} + C_{C,S}) + (C_{O\&M,P} + C_{O\&M,S}) - C_{CO_2}}{8760 \times P_{SW}} \quad \dots(7)$$

حيث $C_{O\&M}$ يمثل تكلفة التشغيل والصيانة دولار في سنة، C_C يمثل قيمة رأس المال المكافئة السنوية دولار في السنة، P يمثل قدرة منظومات التوليد بالكيلوواط، n يمثل عمر المحطة (30 سنة)، r يمثل معدل التضخم السنوي (8%)، أما الرموز السفلية S, P فتشير الى منظومات توليد الطاقة الثلاث: توربينات بيلتون، توربينات فرانسيس، ومولد البيوغاز على التوالي. يمكن حساب تكلفة الضرر البيئي الناتج من غاز CO_2 عن طريق المعادلة التالية [55]:

$$C_{CO_2} = EF_{CO_2} \times 8.760 \times P_{SW} \times \phi_{CO_2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

حيث EF_{CO_2} يمثل معامل انبعاث CO_2 لمنظومة توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا $0.983 \text{ kg } CO_2/\text{kWh}$ ، ϕ_{CO_2} يمثل تكلفة الضرر البيئي بوحدة ($\$/\text{ton } CO_2$). وتحسب فترة استرداد رأس المال (PT) من العلاقة التالية [9]:

$$PT = \frac{\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} (C_{C,P} + C_{C,S})}{\left[ES + C_{CO_2} - (C_{O\&M,P} + C_{O\&M,S})\right]} \quad \dots\dots(9)$$

يمثل البسط التكلفة السنوية للاستثمار أما المقام فيمثل صافي العائد السنوي من الاستثمار حيث ES العائد السنوي من بيع الكهرباء $\$/\text{year}$. جميع التكاليف الموجودة في المعادلة (8) مدرجة في الجدول (1).

الجدول 1: بيان تكاليف منظومة توليد الطاقة الهجينة المقترحة

البند	القيمة
1. منظومة الطاقة الكهرومائية [35]	
1.1	تكلفة رأس المال 7,500 $\$/\text{kW}$
2.1	تكلفة التشغيل والصيانة 3.88 $\$/\text{kW}$ في السنة
2. منظومة طاقة الكتلة الحيوية [56]	
1.2	تكلفة رأس المال منظومة توليد الطاقة الكهربائية 1410 $\$/\text{kW}$
2.2	تكلفة التشغيل والصيانة للمنظومة 3.5% من تكلفة رأس المال الكلية في السنة
3.	تكلفة الضرر البيئي [57] 15 $\$/\text{ton } CO_2$

6.2. فرضيات وحدود الدراسات ومصادر المايقين

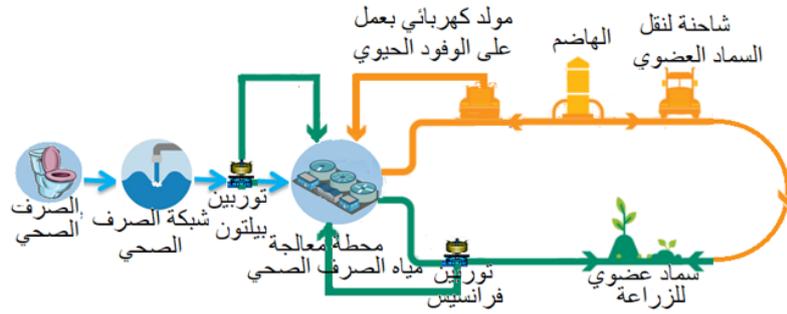
يلجأ الباحثون الى فرض بعض الفرضيات لتسهيل العمليات الحسابية، والتي في أغلب الاحيان لا يكون لها تأثيراً كبيراً على النتائج. فُرضت الفرضيات التالية في هذا البحث:

1. تدفق مياه الصرف الصحي من وإلى محطة المعالجة ثابتاً.
2. عدم وجود فواقد في نقل واستهلاك الكهرباء داخل المحطة.
3. يحتوي الغاز الحيوي على 50% غاز الميثان و 50% غاز CO_2 .
4. لعدم وجود دراسات في مجال طاقة الكتلة الحيوية فقد اعتمد معدل إنتاج البيوغاز من الحمأة حوالي $243 \text{ m}^3/\text{ton sludge}$.
5. اهمال كتلة الحمأة في الحسابات الهيدروليكية وطاقة الوضع، حيث انها تشكل نسبة ضئيلة جداً (0.1%).
6. اعتبار الفواقد الهيدروليكية متساوية في انبواب التصريف وانابيب الدخول.

7. اهمال التلوث الناتج عن نقل السماد العضوي من المحطة الى مواقع الاستهلاك لعدم معرفة المسافة مسبقا. أما محدودية الدراسة فتتمثل في عدم وجود دراسة لحساسية مدلولات التصميم والتشغيل للنتائج، والتي سيفرد لها الباحثون دراسة خاصة. أما عن مصادر اللايقين، فتعتبر البيانات مصدرا من مصادر اللايقين، فهناك اختلاف كبير في بيانات التشغيل والاسعار والقيم التي تعتمد عليها الدراسة لاجاد المؤشرات الاقتصادية والبيئية [58-61].

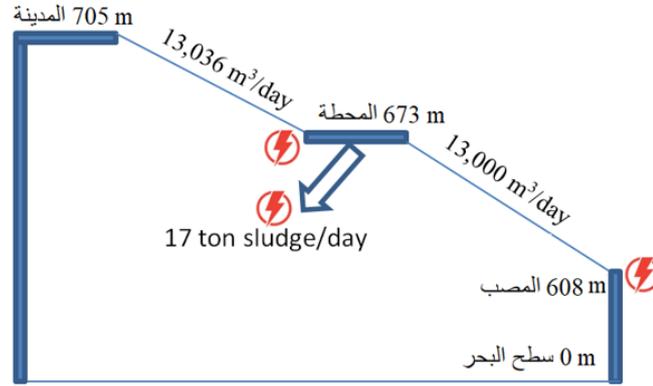
3. النتائج والمناقشة

تتكون المنظومة الهجينة المقترحة من توربينة بيلتون عند مدخل المحطة وتوربينة فرانسيس عند نهاية انبوب التصريف للمحطة، وكذلك منظومة طاقة الكتلة الحيوية، والتي تشمل هاضم لاهوائي لتخمير الحمأة، ومولد كهربائي يعمل على البيوغاز. وتنتقل مخلفات التخمير عبر الشاحنات لتستخدم كسماد عضوي لزراعة الأشجار وتحسين نوعية التربة. يمثل الشكل 5 مكونات المنظومة الهجينة المقترحة ومخطط لتدفق الطاقة والكتلة في النظام المقترح.



الشكل 5: مخطط تدفق الطاقة والكتلة في النظام المقترح

من خلال البيانات الواردة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي بمدينة غريان والمرجحة في الفقرة 2.2 فإنه يمكن حساب الطاقة المتاحة، وذلك بالاستعانة بمخطط اتزان الطاقة والكتلة المبين في الشكل 6.



الشكل 6: اتزان الطاقة والكتلة لمحطة معالجة مياه الصرف الصحي بمدينة غريان

1.3. طاقة الوضع

يمكن تقدير كمية طاقة الوضع (E_S) بالكيلوواط في المياه المعالجة في المحطة عند انبوب التصريف من المعادلة (2):

$$E_S = (1000) \times (9.81) \times (0.151) \times (0.9) \times [((673 - 608) - 5) + ((710 - 673) - 5)] \approx 129 kW$$

2.3. طاقة الكتلة الحيوية

يمكن تقدير كمية الطاقة الكامنة (E_S) بالكيلوواط في الحمأة من المعادلة (3):

$$E_s = (542.92)(1.3)(0.243)(5.56)(0.38) \cong 362kW$$

وبالتالي فإن مجموع الطاقة المتاحة من محطة معالجة المياه تقدر بحوالي 490 kW. وهو ما يكفي لتغطية 87.5% من استهلاك المحطة للطاقة الكهربائية.

3.3. المواصفات الفنية التصميمية للمنظومة الهجينة المقترحة

استنادا على النتائج المتحصل عليها من هذه الدراسة فإنه يمكن تقدير المواصفات التصميمية للمنظومة الهجينة المقترحة كما هو مجدرول في الجدول 2.

الجدول 2: المواصفات الفنية والتصميمية لمكونات المنظومة المقترحة	
السعة	المنظومة
أولاً: منظومة الطاقة الكهرومائية	
50 kW	توربينة بيلتون
80 kW	توربينة فرانسيس
ثانياً: منظومة الكتلة الحيوية	
1375 m ³	الهاضم
370 kW	المولد الكهربائي

4.3. التحليل الاقتصادي-البيئي

يبين الجدول 3 معامل انبعاث CO₂ لعدة أنواع من الوقود وعلى أساس عدة مؤشرات [34].

الجدول 3: معامل انبعاث غاز CO₂ بوحدة kg على أساس عدة مؤشرات الحجم والطاقة الحرارية والطاقة الكهربائية

نوع الوقود	وحدة الحجم kg CO ₂ /m ³	وحدة طاقة حرارية kg CO ₂ /GJ	وحدة طاقة كهربائية kg CO ₂ /MWh
الوقود الحيوي	1.06	84.2	441.4
الغاز الطبيعي	1.77	55.8	433.0
الوقود الخفيف	2,752	71.0	849.2
الوقود الثقيل	3,156	81.3	909.7
النفط الخام	3,266	92.5	966.2

وبالتالي فإنه يمكن تقدير كمية غاز CO₂ (m_{CO2}) المنبعثة سنويا من النظام المقترح كالتالي:

$$m_{CO_2} = 0.4414 \times 362 \times 8760 = 1,400 \text{ ton } CO_2 / \text{year}$$

معامل انبعاث غاز CO₂ لمنظومة توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا يقدر بحوالي 1.037 kg CO₂/kWh [3]. وعليه فإن كمية غاز CO₂ التي حبست من الانبعاث في الهواء الجوي يمكن تقديرها على النحو التالي:

$$0.875 \times 9,923 \times 365 \times 1.037 \times 10^{-3} - 1,400 = 1,886 \text{ ton } CO_2 / \text{year}$$

وأن كمية غاز CO₂ المنبعثة سنويا من المحطة تساوي:

$$(1 - 0.875) \times 9,923 \times 365 \times 1.037 \times 10^{-3} + 1,400 = 1,870 \text{ ton } CO_2 / \text{year}$$

وبالتالي فإن تكلفة غاز CO₂ يمكن حسابه باستخدام المعادلة (9) وتقدر بحوالي \$/year 140,250. وعليه يمكن حساب LCOE للطاقة الكهربائية المنتجة من المحطة من المعادلة (8) على النحو التالي:

$$LCOE = \frac{\left(\frac{0.08(1.08)^{30}}{(1.08)^{30} - 1} \right) \times (7500 \times 130 + 1410 \times 370) + (3.8 \times 130 + 0.035 \times 1410 \times 370) - 1,886 \times 15}{8760 \times 490}$$

$$LCOE = 0.0288 \text{ \$ per kWh}$$

وبمعلومية أن الشركة العامة للكهرباء تشتري الطاقة الكهربائية المنتجة من الطاقات المتجددة بسعر 0.1 \$/kWh [8]، فإن صافي الربح السنوي من هذه المنظومة يقدر بحوالي 307,765 \$/year. وأن فترة استرداد رأس المال يقدر بحوالي 3.44 years. أما التلوث الناجم عن نقل السماد العضوي من محطة معالجة المياه الى المشاريع الزراعية فيمكن تقديره اذا عُرفت المسافة المقطوعة وحمولة العربة الناقلة. عموماً وبصفة عامة، يمكن اعتبار معامل انبعاث غاز CO₂ في قطاع النقل البري الثقيل يقدر بحوالي 5.667 kgCO₂/km [8].

4. تحليل الوضع العام لمحطات معالجة مياه الصرف الصحي في ليبيا

هناك ما يقارب من 200 محطة معالجة مياه صرف صحي تم بناؤها في الفترة 1966 – 1990 في جميع أنحاء البلاد، إلا أن معظمها خارج الخدمة بسبب انتهاء عمرها الافتراضي. تقع أكبر محطات معالجة مياه الصرف الصحي في المدن: طرابلس (بسعة 101,000 m³/day) ومصراتة (بسعة 24,000 m³/day) وسرت (بسعة 21,000 m³/day)، أما باقي المحطات فهي عبارة عن محطات صغيرة ومتوسطة الحجم بسعات تصميمية تبلغ حوالي (370-6,700 m³/day). وتقدر كمية مياه الصرف الصحي المنتجة بحوالي 1,324,054 m³/day، من هذه الكمية يتم معالجة ما قيمته 145,800 m³/day وهو ما يعادل 11% فقط من كمية مياه الصرف الصحي المنتجة، ويتم اطلاق ما تبقى من مياه الصرف الصحي في البحر والوديان والبحيرات الاصطناعية دون معالجة مسببة بذلك ضرراً بالغاً للنظام البيئي المحلي. مع عدم وجود معلومات في الوقت الحالي عن الموقع الجغرافي لهذه المحطات، فإنه سيتم حساب الطاقة المتاحة من الحمأة فقط. استناداً على المعادلة 3، فإنه يمكن حساب الطاقة المتاحة على النحو التالي:

$$E_s = (55,169)(1.3)(0.243)(5.56)(0.38) \cong 36,820 \text{ kW}$$

ولعل الخسارة الأكبر جراء اهمال الدور المهم لهذا القطاع وترك محطات معالجة مياه الصرف الصحي بدون صيانة تطوير، بالإضافة الى الضرر البيئي وخسارة 37 ميجاوات من الطاقة المستدامة؛ هو ضياع ما يقارب من 4 مليون مترمكعب يومياً في بلد صحراوي يفتقر إلى المياه، كان يمكن لها ان تشكل فارقا في مساحة الغطاء النباتي للدولة، وحماية المدن من العواصف الرملية، وزحف الصحراء، وانشاء الغابات والمحميات الطبيعية.

5. الاستنتاجات والدراسات المستقبلية

أجرت الدراسة تحليلاً للطاقة التي يمكن الحصول عليها من محطة مياه الصرف الصحي لمدينة غريان. علاوة على ذلك، قدمت المقالة مقترحاً لمنظومة توليد هجينة تتكون من محطتين كهرومائية ومحطة توليد كهرباء باستخدام الغاز الحيوي المستخلص من تخمير الحمأة في مفاعل الكتلة الحيوية. كما أجريت الحسابات الاقتصادية والبيئية لاثبات جدوى النظام المقترح. سيؤمن النظام المقترح طاقة كهربائية قدرها 490 kW، وهو ما يكفي لتغطية 87.5% من استهلاك المحطة للطاقة الكهربائية. وقدرت قيمة الاستثمار بحوالي \$ 1,478,000، وتكلفة الصيانة السنوية حوالي \$ 18,355، وقدرت تكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية بحوالي 2.88 ¢/kWh. ستحول المنظومة الهجينة المقترحة دون اطلاق كمية من غاز CO₂ سنوية تدر بحوالي 1,886 ton الامر الذي سيوفر على المحطة ما قيمته \$ 28,290 سنوياً. يعتزم الباحثون تعميم الدراسة على كل محطات الصرف الصحي في ليبيا وذلك باجراء مسح طبوغرافي لمعرفة المحطات التي تقع على مرتفعات لحساب طاقة الوضع الكامنة في تلك المحطات.

Author Contributions: “Conceptualization, Miskeen, Nassar and Imbayah; methodology, Miskeen, Elzer, Mangir and El-Khozondar; writing—original draft preparation, review and editing, Khaleel, Ahmed, Alsharif and El-Khozondar. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

Funding: “This research received no external funding.”

Data Availability Statement: “The data are available at request.”

Acknowledgments: The authors would like to express their appreciation to the center for research and studies of renewable energy and sustainable development, Wadi Elshatti University, Brack-Libya.

Conflicts of Interest: “The authors declare no conflict of interest.”

REFERENCES

- [1] World Bioenergy association, Annual report, 2021. [Online]. Available: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/210331%20WBA%20Annual%20Report%202020%20Public%20Version.pdf>.
- [2] [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
- [3] A. Makhzom, A Eshdok, Y. Nassar, S. Alsadi, T. Foqha, M. Salem, I. AlShareef and H. El-Khozondar, "Estimation of CO₂ emission factor for Power Industry Sector in Libya," in the 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023), May 8-9, 2023, Gaza Strip, Palestine
- [4] Y. Nassar, K. Aissa and S. Alsadi, "Air Pollution Sources in Libya," *Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 63-79, 2018.
- [5] A. Almabrouk, S. Abulifa, "The Technology of Renewable Energy and Its Role in Achieving Sustainable Development," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 1-9. 2023
- [6] M. Andeef, K. Bakouri, B. Ahmed , A. Gait , F. El-Batta, T. Foqha, H. Qarqad, " The Role of Renewable Energies in Achieving a More Secure and Stable Future," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 11-20, 2023.
- [7] M. Eteriki, W. El-Osta, Y. Nassar, H. El- Khozondar, "Effect of Implementation of Energy Efficiency in Residential Sector in Libya," *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023)*, May 8-9, 2023, Gaza Strip, Palestine.
- [8] S. Mohammed, Y. Nassar, W. El-Osta, H. El-Khozondar, A. Miskeen and A. Basha, "Carbon and Energy Life Cycle Analysis of Wind Energy Industry in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 50-68, 2023.
- [9] A. Elmariami, W. El-Osta, Y. Nassar, Y. Khalifa and M. Elfleet, "Life Cycle Assessment of 20 MW Wind Farm in Libya," *Applied Solar Energy*, vol.59, no. 1, 64-78, 2023.
- [10] H. Shreif, W. El-Osta and A. Yagub, "Wind Resource Assessment for southern part of Libya: Case Study of Hun," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 12-33, Jun. 2019.
- [11] A. Jary, M. Elmnifi, Z. Said, L. Habeeb, H. Moria, " Potential wind energy in the cities of the Libyan coast, a feasibility study," *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, vol. 44, no. 7, pp. 236-252, 2021.
- [12] A. Teyabeen, F. Akkari, A. Jwaid, A. Zaghwan and R. Abodelah, "Assessment of Wind Energy Potential In Zwara, Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 334-49, 2019.
- [13] F. Ahwide and A. Ismail, "Wind Energy Resources Estimation and Assessment For AL-Maqrun Town - Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 22-41, 2016.
- [14] A. Abdalla, W. El-Osta, Y. Nassar, W. Husien, E. Dekam and G. Miskeen, "Estimation of Dynamic Wind Shear Coefficient to Characterize Best Fit of Wind Speed Profiles under Different Conditions of Atmospheric Stability and Terrains for the Assessment of Height-Dependent Wind Energy in Libya," *Applied Solar Energy.*, vol. 59, no. 3, 2023.
- [15] S. Al-Behadili and W. El-Osta, "Life cycle assessment of Derna (Libya) wind farm," *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 1227-1233, 2015.

- [16] W. El-Osta and Y. Kalifa, "Prospects of wind power plants in Libya: a case study," *Renewable energy*, vol. 28, no. 3, pp. 363-371, 2003.
- [17] I. Belal, "Reverse Engineering and Design of a Windmill Pumping System suitable for Wind Conditions: A Case Study in a Suburb of Tajoura, Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 21-40, Dec. 2021.
- [18] W. Abuzend, W. El-Osta, M. Ekhlal, and E. Borass, "Projected Avoided Costs of Conventional Power Plants in Libya Using Wind Energy," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 32-41, Jun. 2012.
- [19] Y. Nassar, H. El-Khozondar, G. Ghaboun, M. Khaleel, Z. Yusupov, A. Ahmed and A. Alsharif "Solar and wind atlas for Libya," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 3, pp. 27-34, 2023.
- [20] A. Ghayth, Z. Yusupov, M. Khaleel, "Performance Enhancement of PV Array Utilizing Perturb & Observe Algorithm," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1. No. 2, pp. 29-37, 2023.
- [21] M. Abdunnabi, I. Rohuma, E. Endya, and E. Belal, "Review on solar water heating in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 7, no. SI, pp. 1-27, 2018.
- [22] B. Belgasim and Y. Aldali, "Review on Solar Thermal Electricity in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 7, no. SI, pp. 48-60, Sep. 2018.
- [23] S. Abdulwahab, N. Nasser, H. El-Khozondar, M. Khaleel, A. Ahmed and A. Alsharif, "Meeting Solar Energy Demands: Significance of Transposition Models for Solar Irradiance," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 3, pp. 90-105, 2023.
- [24] I. Tawil, M. Abeid, E. Abraheem, S. Alghoul and E. Dekam, "Review on Solar Space Heating - Cooling in Libyan Residential Buildings," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 7, no. SI, pp. 78-112, 2018.
- [25] M. Abdunnabi, B. Belgasim and A. Ramadan, "Review on Solar Thermal Desalination in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 7, no. SI, pp. 28-47, 2018.
- [26] K. Bakouri, T. Foqha, O. Ahwidi, A. Abubaker, Y. Nassar and H. El-Khozondar, "Learning lessons from Murzuq-Libya meteorological station: Evaluation criteria and improvement recommendations," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 30-48, 2023.
- [27] Y. Nassar, "Thermodynamics analysis and optimization procedure for domestic solar water heating system," *AASCIT, American Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 2, no. 6, pp. 92-99, 2015.
- [28] Y. Nassar, R. Elzer, A. Alkhazmi, H. El-Khozondar, M. Essid and A. & M'Baye, "Thermal Analysis of Air-Heating Flat-Plate Thermal Solar Collectors," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 3, p. 129-144, 2023.
- [29] M. Khaleel, Z. Yusupov, N. Nassar, H. El-Khozondar and A. Ahmed, "An Integrated PV Farm to the Unified Power Flow Controller for Electrical Power System Stability," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 1, pp. 18-30, 2023.
- [30] Y. Nassar, H. ElKhozondar, M. Abouqeelah, A. Abubaker, A. Miskeen, M. Khaleel, A. Ahmed, A. Alsharif, M. Elmnifi, "Simulating the Energy, Economic and Environmental Performance of Concentrating Solar Power Technologies Using SAM: Libya as a Case Study," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 1-23, 2023.

- [31] M. Elmnifi, M. Alshilmany, M. Abdraba, "Potential Of Municipal Solid Waste In Libya For Energy Utilization," *Open Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 01-05, 2018.
- [32] M. Elmnifi, M. Amhamed, "Future of waste to energy: Case study of Libya," *Advances In Industrial Engineering And Management (AIEM)*, vol. 8, no. 1, pp. 1-3, 2019.
- [33] M. Mohammed, S. Boghandora, R. Hassan, A. Jirhiman and A. Ahmeedah, "Influence of pH and the Insulation of Reactor on The Biogas Production of Livestock Waste by Batch Anaerobic Reactor," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 1-12, 2022.
- [34] M. Ashur and I. Bengharbia, "Effect of Temperature and pH on Biogas Production From Organic Fraction-MSW," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 22-28, 2015.
- [35] Y. Nassar, I. Mangir, A. Hafez, H. El-Khozondar, M. Salem and H. Awad, "Feasibility of innovative topography-based hybrid renewable electrical power system: A case study," *Cleaner Engineering and Technology*, vol.14, no. 5, p. 14100650, 2023.
- [36] Y. Nassar, M. Abdunnabi, M. Sbeta, A. Hafez, K. Amer, A. Ahmed and B. Belgasim, "Dynamic analysis and sizing optimization of a pumped hydroelectric storage-integrated hybrid PV/Wind system: A case study," *Energy Conversion and Management*, vol. 229, 2021.
- [37] N. Fadhil, M. Elmnifi, O. Abdulrazig, L. Habeeb, "Design and modeling of hybrid photovoltaic micro-hydro power for Al-Bakur road lighting: A case study," *Materials Today: Proceedings*, vol. 49, pp. 2851-2857, 2022.
- [38] <https://www.hydropower.org/facts>.
- [39] Y. Nassar, H. El- Khozondar, N. Abohamoud, A. Abubaker, A. Ahmed, A. Alsharif, M. Khaleel, "Regression Model for Optimum Solar Collectors' Tilt Angles in Libya," *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023)*, May 8-9, 2023, Gaza Strip, Palestine, pp. 1-6.
- [40] M. Khaleel, Z. Yusupov, Y. Nassar, H. El-Khozondar, "Enhancing Microgrid Performance through Hybrid Energy Storage System Integration: ANFIS and GA Approaches," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 38-48, 2023.
- [41] A. Ahmed, O. Abd Al Aziz, Y. Nassar, "Power Management Strategy and Sizing Optimization Techniques for Hybrid Energy Systems Considering Feature Selection: Mini Review," *North African Journal of Scientific Publishing (NAJSP)*, vol. 1, no. 3, pp. 1-6, 2023.
- [42] H. Moria, A. Elbreki, A. Ahmed, M. Elmnifi, "Optimization and performance evaluation of hybrid renewable system for minimizing CO2 emissions in Libya: Case study," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 10, no. 4, pp. 1725-1734, 2020.
- [43] T. Uchiyama, S. Honda, T. Okayama and T. Degawa, "A Feasibility Study of Power Generation from Sewage Using a Hollowed Pico-Hydraulic Turbine," *Engineering*, vol. 4, no. 2, 2016.
- [44] J. Radcliffe, "The water energy nexus in Australia—the outcome of two crises," *Water-Energy Nexus*, vol. 1, no. 7, pp. 66-85, 2018.
- [45] M. Rosa, P. Amparo and P. Modesto, "Hydropower Technology for Sustainable Energy Generation in Wastewater Systems: Learning from the Experience," *Water*, vol. 13, no. 22, p. 3259, 2021.

- [46] C. Power, A. McNabola and P. Coughlan, "Development of a system for evaluating hydroelectric energy recovery in wastewater treatment plants: Case studies in Ireland and the United Kingdom," *Sustain. Energy Technol. Assess* 2014, 7, 166–177.
- [47] <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://inwrdam.net/wp-content/uploads/2018/10/As-Samra-wastewater-treatment-plant-Jordan-EN.pdf>.
- [48] B. Baran, "Usage of Waste Water Treatment Plants Hydroelectric Energy for Urban Lighting Energy: The Case of Turkey," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 13, no. 2, pp. 750-762, 2021.
- [49] <https://en.wikipedia.org/wiki/Gharyan>.
- [50] H. Al-Najjar, C. Pfeifer, R. Al-Afif and H. El-Khozondar, "Estimated view of renewable resources as a sustainable electrical energy source, case study," *Designs*, vol. 4, no. 32, pp. 1-18, 2020.
- [51] S. Martinat, P. Dvorak and B. Frantal, "What can the location of biogas plants tell us about agricultural changes? A case study from the Czech Republic," *The central European journal of regional development and tourism*, vol. 10, no. 1, pp. 33-52, 2019.
- [52] A. Pertiwinigrum, M. Wuri, A. Harto, R. Budiarto and M. Gozan, "Heating value enhancement by biogas purification using natural zeolite and rice straw based biocar," *International journal of GEOMATE*, vol. 16, no. 55, pp. 80-85, 2019.
- [53] E. Dekam and S. Alghoul, "Fluid mechanics-fundamentals and applications," Germany: Noor publishing Company, 2018.
- [54] Y. Nassar, S. Alsadi, H. El-Khozondar, M. Ismail, M. Al-Maghalseh, T. Khatib, J. Sa'ed, M. Mushtaha and T. Djerafi, "Design of an Isolated Renewable Hybrid Energy System: A Case Study," *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, vol.11, no. 3: 225-240, 2022.
- [55] M. Abdunnabi, N. Etiab, Y. Nassar, H. El-Khozondar and R. Khargotra, "Energy savings strategy for the residential sector in Libya and its impacts on the global environment and the nation economy," *Advances in Building Energy Research*, vol.17, no. 4, pp. 379-411, 2023.
- [56] L. Jarrar, O. Ayadi and J. Al Asfar, "Techno-economic Aspects of Electricity Generation from a Farm Based Biogas Plant," *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, vol. 8, no. 3, pp 476-492, 2019.
- [57] H. El-Khozondar, F. El-batta, R. El-Khozondar, Y. Nassar, M. Alramlawi and S. Alsadi, "Standalone hybrid PV/Wind/Diesel electric generator system for a COVID-19 Quarantine Center," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2022.
- [58] عبد المجيد ختريش، ناجي شكشم، "تصميم نظم معالجة بتقنيات مبسطة لمياه الصرف الصحي (دراسة حالة)"، مجلة العلوم التطبيقية- جامعة مصراتة، العدد 4، ص. 143-158، 2020.
- [59] Y. Nassar and S. Alsadi, "Assessment of solar energy potential in Gaza Strip-Palestine," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 31, pp. 318-328, 2019.
- [60] Y. Nassar, M. Salem, K. Iessa, I. AlShareef, K. Amer and M. Fakher, "Estimation of CO2 Emission Factor for the Energy Industry Sector in Libya: A Case Study," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 23, pp. 13998-14026, 2021.
- [61] S. Alsadey and O. Mansour, "Wastewater treatment plants in Libya: Challenges and future prospects," *International Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 6, no. 3, pp. 76-80, 2020.