Wadi Alshatti University Journal of
Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ
للعلوم البحتة والتطبيقية

Volume 4, No. 2, July-December 2026 Online ISSN: 3006-0877 المجلد 4، الاصدار 2، يوليو- ديسمبر 2026

REVIEW ARTICLE MECHANICAL POWER ENGINEERING

The Impact of Fuel Type on the Economic, Environmental, and Energy Performance of Power Generation Plants: A Case Study of the Ubari Gas Power Plant-Libya

Ibrahim K. Mangir[1,*], Mesbah M. Salem[2], Mohamed E. Abduljawad[3]. Ahmed Adel Rasheed Abdullah[4], Yasser F. Nassar[5]

[1]Higher Institute of Sciences and Technology – Tamezawa, Brack, Libya
[2]The Libyan Academic, Sebha, Libya
[3]Libyan Authority for Scientific Research, Tripoli, Libya
[4]Department of Mechanical Engineering, College of Technical Sciences, Derna, Libya
[5]Department of Mechanical and Renewable Energy Engineering, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

ARTICLE HISTORY
Received 25 June 2026
Revised 26 July 2026
Accepted 24 July 2026
Online 30 July 2026

KEYWORDS
Power plants, fossil fuels;
Energy performance;
Environmental impact;
Efficiency;
Ubari gas power plant.

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of fuel type on the thermal, environmental, and economic performance of power generation plants. The Brighton cycle model, with ideal gas and stable operation assumptions, was used to evaluate turbine performance using crude oil, natural gas, diesel, and heavy fuel oil. The results showed that natural gas achieved the highest thermal efficiency (up to 35.7%), the lowest CO2 emissions, and the lowest energy production cost compared to the other fuel types. Crude oil and heavy fuel oil, on the other hand, exhibited the lowest thermal performance, highest emissions, and highest energy production cost. The study also revealed that specific fuel consumption increases with decreasing thermal efficiency. These findings highlight the importance of fuel type selection in improving plant efficiency and reducing environmental impact, making natural gas the optimal choice for gas turbine operation.

تأثير نوع الوقود على الأداء الأقتصادي والبيئي والطاقي لمحطات توليد الطاقة الكهربائية / دراسة حالة محطة أوباري الغازية

ابراهيم خميس معنقر[1*]، مصباح سليم سالم[2]، محمد الأمين عبد الجواد[3]، احمد عادل رشيد عبدالله[4] ، ياسر فتحي نصار[5]

الكلمات المفتاحية
محطات توليد الطاقة الكهربائية
الوقود الاحفوري
الاداء الطاقوي
التأثير البيئي
الكفاءة
محطة اوباري الغازية

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير نوع الوقود على الأداء الحراري والبيئي والأقتصادي لمحطات توليد الطاقة الكهربائية . تم استخدام نموذج دورة برايتون مع افتراضات الغاز المثالي والتشغيل المستقر لتقييم أداء التوربين عند استخدام النفط الخام والغاز الطبيعي والديزل وزيت الوقود الثقيل. أظهرت النتائج أن الغاز الطبيعي يحقق أعلى كفاءة حرارية تصل إلى 35.7% وأقل انبعاثات من ثاني أكسيد الكربون وأقل تكلفة لأنتاج الطاقة مقارنة بباقي أنواع الوقود، في حين سجل النفط الخام والوقود الثقيل أدنى أداء حراري وأعلى انبعاثات وأعلى تكلفة لأنتاج الطاقة. كما تبين أن الاستهلاك النوعي للوقود يزداد مع انخفاض الكفاءة الحرارية. تشير هذه النتائج إلى أهمية اختيار نوع الوقود في تحسين كفاءة المحطات وتقليل الأثرالبيئي ، مما يجعل الغاز الطبيعي الخيار الأمثل لتشغيل التوربينات الغازية.

المقدمة

بلغ إنتاج الكهرباء العالمي في عام 2024 ما يقرب من 30850 تيراواط ساعة (30.85 بيتاواط ساعة)، صنفت حسب الوقود المستخدم الفحم الحجري (34-35%) والغاز الطبيعي (22-23%) والنفط (2-3%) والطاقات المتجددة (32-34%) والطاقة النووية حوالي (9-10%). بينما صنفت تقنيات توليد الطاقة الكهربائية حسب نوع التوليد: المحطات الغازية (6-8%) والمحطات البحارية (28-32%) ومحطات الدورة المركبة (23-27%)[1] . ويعتبر قطاع توليد الكهرباء أكبر مصدر لانبعاثات CO_2 حيث بلغت كمية CO_2 المنبعثة من قطاع توليد الكهرباء حوالي 13,926 مليون طن [2]. في ليبيا، بلغ انتاج الطاقة الكهربائية لعام 2024 حوالي 33980 جيجا وات ساعة، وتعتمد ليبيا بشكل شبه كلي في توليد الكهرباء على الوقود الأحفوري (الغاز الطبيعي والوقود السائل)، حيث تشير التقديرات إلى أن نسبة الاعتماد عليه تتجاوز 99% [3]. وبلغت مساهمة المحطات البخارية 13.7 % فيما بلغت 59.3 % مساهمة المحطات الغازية أما مساهمة محطات الدورة المركبة فكانت 26.1 %، بينما لا يزيد مساهمة الطاقات المتجددة في مزيج الطاقة عن 1%. وتنتج ليبيا الطاقة الكهربائية من الوقود الأحفوري على النحو التالي: الزيت الثقيل 19.4 % والزيت الخفيف 35.3 % والغاز الطبيعي 38.2% والنفط الخام 7.1% وتقدر كمية الانبعاثات المصاحبة لتوليد الكهرباء في ليبيا بحوالي 32.871 مليون طن CO2 في السنة [4]

تؤثر نوعية الوقود بشكل مباشر وجوهري على كفاءة وأداء محطات توليد

*Corresponding author
https://doi.org/10.63318/waujpasv4i2_17
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

الطاقة الكهربائية، حيث تحدد الخصائص الفيزيائية والكيميائية للوقود كمية الطاقة الحرارية المنتجة، وبالتالي كمية الكهرباء [5] .

تعد التوربينات الغازية من أهم التقنيات المستخدمة في محطات توليد الطاقة الكهربائية الحديثة وذلك لما تتميز به من كفاءة تشغيلية مرتفعة وإمكانية بدء التشغيل السريع ومرونة التشغيل مقارنة بالعديد من تقنيات التوليد الأخرى. وتعتمد كفاءة أداء التوربينات الغازية بدرجة كبيرة على كفاءة عملية الاحتراق داخل غرفة الاحتراق والتي تتأثر بعدد من العوامل التشغيلية والتصميمية من أهمها نوع الوقود المستخدم وخصائصه الفيزيائية والكيميائية إضافة إلى ظروف التشغيل المختلفة مثل درجة حرارة الهواء الداخل ونسبة الضغط ومعدل تدفق الوقود والهواء [6].

وقد حظي موضوع تأثير نوعية الوقود على أداء التوربينات الغازية باهتمام كبير في العديد من الدراسات العلمية حيث ركزت هذه الدراسات على تحليل تأثير خصائص الوقود مثل القيمة الحرارية وتركيب الوقود والكثافة النوعية على كفاءة الاحتراق والأداء الحراري للتوربينات الغازية. كما تناولت دراسات أخرى آلية الاحتراق داخل غرف الاحتراق في التوربينات الغازية ودور عملية الخلط بين الوقود والهواء في تحديد استقرار اللهب وكفاءة الاحتراق والانبعاثات الناتجة عن عملية الاحتراق [5].

وفي السنوات الأخيرة استخدمت العديد من الدراسات أدوات النمذجة العددية باستخدام ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD) لتحليل سلوك الاحتراق داخل غرف الاحتراق للتوربينات الغازية ودراسة تأثير المتغيرات التشغيلية المختلفة على كفاءة الاحتراق والأداء الكلي للتوربينات الغازية. كما ركزت بعض الدراسات على تحليل أداء محطات التوربينات الغازية من خلال استخدام النماذج الحرارية لدورة برايتون أو تحليل بيانات التشغيل الفعلية للمحطات [7].

وبالرغم من هذا الاهتمام البحثي الواسع إلا أن معظم الدراسات السابقة ركزت على تحليل أداء التوربينات الغازية في ظروف تشغيل قياسية أو باستخدام أنواع وقود محددة في حين أن الدراسات التي تتناول تأثير التغير في نوعية الوقود المستخدم فعلياً في محطات التوليد الحقيقية لا تزال محدودة نسبياً خاصة في محطات التوليد الغازية في المنطقة العربية وشمال أفريقيا. لذلك فإن دراسة تأثير نوعية الوقود على كفاءة عملية الاحتراق في الوحدات التوربينية الغازية في محطات التوليد الحقيقية تمثل موضوعاً بحثياً مهماً يسهم في تحسين كفاءة التشغيل وتعزيز أداء هذه المحطات وتقليل البصمة الكربونية.

وفي هذا السياق يستعرض هذا البحث أهم الدراسات السابقة التي تناولت تأثير نوع الوقود وخصائصه على أداء التوربينات الغازية وكفاءة الاحتراق والانبعاثات داخل غرف الاحتراق إضافة إلى الدراسات المتعلقة بخصائص الوقود والنمذجة العددية وتحليل أداء محطات التوربينات الغازية وذلك بهدف بناء إطار علمي واضح للدراسة الحالية وتحديد الفجوة البحثية التي يسعى إلى معالجتها من خلال دراسة حالة محطة أوباري الغازية.

تناولت دراسة [8] تأثير تركيب الوقود على أداء الاحتراق في التوربينات الغازية، حيث هدفت إلى تحليل العلاقة بين الخصائص الكيميائية والفيزيائية للوقود وأداء منظومة الاحتراق في هذه الوحدات. اعتمدت الدراسة على منهجية المراجعة العلمية للأدبيات السابقة لتحليل تأثير أنواع مختلفة من الوقود الغازي والسائل والصلب على أداء التوربينات الغازية، مع التركيز بشكل خاص على نسبة الهيدروجين إلى الكربون (H/C) باعتبارها أحد أهم المؤشرات المؤثرة في كفاءة الاحتراق والأداء الحراري للتوربين. وأظهرت نتائج الدراسة أن تركيب الوقود يلعب دوراً أساسياً في تحديد خصائص الاحتراق وكفاءة التوربين الغازي، حيث تبين أن الوقود الذي يمتلك نسبة الهيدروجين إلى الكربون الأعلى يحقق قدرة خرج أعلى وكفاءة حرارية أفضل بالإضافة إلى انخفاض أكثر في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. كما أوضحت الدراسة أن خصائص الوقود الفيزيائية والكيميائية مثل الكثافة واللزوجة والقيمة الحرارية تؤثر بشكل مباشر في عمليات الحقن والتبخر واستقرار اللهب داخل غرفة الاحتراق. وتبرز أهمية هذه الدراسة في تأكيدها أن اختيار نوع الوقود وتركيبه الكيميائي يعد عاملاً أساسياً في تحسين أداء التوربينات الغازية وتقليل الانبعاثات الأمر الذي يعزز أهمية دراسة تأثير نوعية الوقود على كفاءة عملية الاحتراق في الوحدات التوربينية الغازية.

أجرى [9] دراسة مقارنة لأداء محطة الخيرات للتوربينات الغازية في مدينة كربلاء بالعراق بهدف تحليل تأثير نوع الوقود المستخدم على كفاءة المحطة وأدائها التشغيلي. اعتمدت الدراسة على بناء نموذج محاكاة للتوربين الغازي باستخدام برنامج Aspen HYSYS بالاستناد إلى بيانات تشغيلية حقيقية لإحدى وحدات التوربين الغازي من نوع Frame 9E ، حيث تمت مقارنة أداء المحطة عند استخدام ثلاثة أنواع مختلفة من الوقود وهي النفط الخام والغاز الطبيعي والغاز التخليقي. وقد شملت الدراسة تحليل عدد من المتغيرات التشغيلية المؤثرة في أداء المحطة مثل القدرة المنتجة والكفاءة الحرارية ومعدل استهلاك الوقود والانبعاثات الغازية. وأظهرت نتائج الدراسة أن استخدام الغاز الطبيعي كوقود للتوربين الغازي يؤدي إلى تحسين أداء المحطة مقارنة باستخدام النفط الخام أو غاز النفط المسال، حيث ارتفعت الكفاءة الحرارية بنسبة 3.12 % وزادت القدرة الإنتاجية للمحطة بنسبة 10 %، إضافة إلى انخفاض معدل استهلاك الوقود بنسبة 6 % وانخفاض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وتبرز أهمية هذه الدراسة في تأكيدها أن نوع الوقود المستخدم في التوربينات الغازية يمثل عاملاً أساسياً في تحديد كفاءة التشغيل والأداء الحراري لمحطات القدرة، الأمر الذي يعزز أهمية دراسة تأثير نوعية الوقود على كفاءة عملية الاحتراق في الوحدات التوربينية الغازية.

أشارت دراسة [10] لتقييم الآثار البيئية لانبعاثات احتراق الوقود في محطات توليد الكهرباء إلى أهمية نوعية الوقود المستخدم في محطات التوليد وعلاقته بكفاءة عملية الاحتراق والانبعاثات الناتجة عنها حيث هدفت الدراسة إلى تحليل الغازات المنبعثة من محطة كهرباء الزاوية باستخدام منظومة إلكترونية لقياس تراكيز الغازات المختلفة مثل CO و CO_2و SO_2 و CH_4و H_2S وأظهرت النتائج أن نوع الوقود وخصائصه الكيميائية وظروف الاحتراق تؤثر بصورة مباشرة على كفاءة التشغيل ومستويات الانبعاثات إذ تبين أن استخدام الغاز الطبيعي ينتج عنه انبعاثات أقل وكفاءة احتراق أعلى مقارنة بالوقود السائل.

قدم [11] تحليلا لأداء الطاقة لمحطة توربين غازي من نوع SGT5-2000E الواقعة في مدينة بنين في نيجيريا، بهدف تقييم أداء المحطة تحت ظروف التشغيل الفعلية خارج شروط التصميم القياسية. اعتمدت الدراسة على تحليل بيانات تشغيل حقيقية تم جمعها من المحطة خلال الفترة الممتدة بين عامي 2017 -2020، حيث تم استخدام برنامج MATLAB لإجراء تحليل طاقة يعتمد على القانون الأول للديناميكا الحرارية لتقييم عدد من مؤشرات الأداء

الرئيسية، مثل الكفاءة الحرارية الصافية، والقدرة المنتجة، ومعدل استهلاك الوقود النوعي، ومعدل الحرارة. وقد أظهرت نتائج الدراسة أن متوسط الكفاءة الحرارية الصافية للمحطة بلغ حوالي 30.21% عند متوسط درجة حرارة للهواء المحيط بلغت 27.67 °م، مع قدرة خرج تقارب 149.24 ميغاواط. كما بينت النتائج أن ارتفاع درجة حرارة الهواء المحيط يؤدي إلى انخفاض القدرة المنتجة والكفاءة الحرارية للتوربين الغازي، مقابل زيادة في معدل استهلاك الوقود النوعي ومعدل الحرارة. كذلك أوضحت الدراسة أن جزءاً كبيراً من الطاقة الداخلة إلى المحطة يضيع على شكل حرارة في غازات العادم بنسبة تقارب 60% من إجمالي الطاقة الداخلة. وتبرز أهمية هذه الدراسة في تقديم تحليل عملي لأداء التوربينات الغازية في ظروف التشغيل الفعلية لمحطات توليد الكهرباء الغازية ، الأمر الذي يسهم في فهم العوامل المؤثرة في كفاءة تشغيل هذه الوحدات، ويدعم أهمية إجراء دراسات متخصصة لتحليل تأثير نوعية الوقود وخصائصه على كفاءة عملية الاحتراق وأداء التوربينات الغازية في محطات توليد الطاقة.

أجرى [12] دراسة لتحليل أداء محطة أوباري للتوربينات الغازية الواقعة في جنوب ليبيا باستخدام نموذج المحاكاة الحرارية. هدفت الدراسة إلى تقييم أداء التوربين الغازي من نوع SGT5-2000E من خلال تحليل مجموعة من مؤشرات الأداء الرئيسة مثل الكفاءة الحرارية والقدرة الصافية ومعدل استهلاك الوقود النوعي ونسبة الوقود إلى الهواء. اعتمد الباحثون على تطوير نموذج لمحطة أوباري باستخدام برنامج ASPEN HYSYS ، حيث تم التحقق من صحة النموذج بمقارنة نتائجه مع بيانات التصميم المقدمة من الشركة المصنعة للتوربين. كما تم تحليل تأثير بعض المتغيرات التشغيلية مثل درجة حرارة دخول الهواء إلى الضاغط (Compressor Inlet Temperature) ونسبة الأنضغط (Pressure Ratio) على أداء التوربين عند استخدام نوعين مختلفين من الوقود هما الغاز الطبيعي والنفط الخام. وقد أظهرت النتائج أن ارتفاع درجة حرارة دخول الهواء يؤدي إلى انخفاض القدرة الصافية والكفاءة الحرارية للتوربين مع زيادة معدل استهلاك الوقود النوعي. كما أوضحت النتائج أن استخدام الغاز الطبيعي كوقود للتوربين الغازي يحقق أداءً أفضل مقارنة باستخدام النفط الخام، حيث يساهم في تحسين الكفاءة الحرارية وتقليل معدل استهلاك الوقود. وتبرز أهمية هذه الدراسة في كونها تقدم تحليلاً عملياً لأداء محطة أوباري الغازية وتوضح تأثير نوع الوقود وظروف التشغيل على أداء التوربينات الغازية، مما يدعم أهمية دراسة تأثير نوعية الوقود على كفاءة عملية الاحتراق وتحسين أداء الوحدات التوربينية الغازية.

أجرى [13] دراسة بهدف تقييم تأثير المعاملات البيئية وتركيب الوقود على أداء التوربينات الغازية في محطات توليد الطاقة الكهربائية. وقد تم تطبيق الدراسة على محطة شمال بنغازي للدورة المركبة في ليبيا خلال عام 2023، حيث تعمل التوربينات الغازية في المحطة باستخدام الغاز الطبيعي. اعتمدت الدراسة على تحليل بيانات التشغيل الفعلية للوحدات التوربينية، بالإضافة إلى استخدام العلاقات الحرارية لدورة برايتون لحساب القدرة الصافية والكفاءة الحرارية للتوربين الغازي. كما تم تحليل تأثير عدد من المتغيرات التشغيلية والبيئية مثل درجة حرارة الهواء المحيط، والرطوبة النسبية، ونسبة الضغط في الضاغط، بالإضافة إلى خصائص الوقود المستخدم. وأظهرت نتائج الدراسة أن ارتفاع درجة حرارة الهواء المحيط يؤدي إلى انخفاض معدل تدفق الهواء الداخل إلى الضاغط نتيجة انخفاض كثافة الهواء الأمر الذي ينعكس سلباً على القدرة الناتجة والكفاءة الحرارية للتوربين الغازي. كما بينت النتائج أن تركيب الوقود الغازي وخصائصه الكيميائية خاصة نسبة الهيدروجين إلى الكربون والقيمة الحرارية للوقود تعد من العوامل المؤثرة في أداء التوربينات الغازية وكفاءة عملية الاحتراق. وتكمن أهمية هذه الدراسة في إبراز العلاقة بين خصائص الوقود والظروف التشغيلية وكفاءة أداء التوربينات الغازية، وهو ما يدعم أهمية دراسة تأثير نوعية الوقود على كفاءة عملية الاحتراق وتحسين أداء الوحدات التوربينية الغازية في محطات توليد الطاقة الكهربائية.

أجرى [14] دراسة هدفت إلى نمذجة وتقييم أداء توربين غازي من نوع SGT5-2000E في محطة أزورا للطاقة في نيجيريا باستخدام برنامج المحاكاة GasTurb 14. اعتمدت الدراسة على محاكاة أداء التوربين الغازي في نظام الدورة البسيطة، حيث تم تحليل تأثير مجموعة من المتغيرات التشغيلية والبيئية مثل درجة حرارة الهواء المحيط والرطوبة النسبية ودرجة حرارة دخول التوربين (Turbine Inlet Temperature) على مؤشرات الأداء الرئيسة للتوربين الغازي مثل القدرة الناتجة والكفاءة الحرارية ومعدل استهلاك الوقود النوعي. وأظهرت نتائج الدراسة أن ارتفاع درجة حرارة دخول التوربين يؤدي إلى زيادة القدرة الناتجة وتحسن الكفاءة الحرارية نتيجة زيادة الطاقة الحرارية المتاحة للتمدد داخل التوربين. كما بينت النتائج أن ارتفاع درجة الحرارة المحيطة يؤدي إلى انخفاض كثافة الهواء الداخل إلى الضاغط، مما يسبب انخفاضا في معدل تدفق الهواء وبالتالي انخفاض القدرة الناتجة والكفاءة الحرارية وزيادة استهلاك الوقود النوعي. وقد أظهرت النتائج أن القدرة الناتجة للتوربين بلغت حوالي 159.5 ميجاواط عند درجة حرارة دخول للتوربين بلغت نحو 1109.7 درجة مئوية، بينما انخفضت القدرة مع ارتفاع درجة الحرارة المحيطة. وتبرز أهمية هذه الدراسة في توضيح تأثير المتغيرات التشغيلية ودرجة حرارة الاحتراق على أداء التوربينات الغازية وكفاءتها الحرارية، الأمر الذي يدعم أهمية دراسة تأثير نوعية الوقود وكفاءة عملية الاحتراق على أداء الوحدات التوربينية الغازية في محطات توليد الطاقة.

من خلال استعراض الدراسات السابقة المتعلقة بأداء التوربينات الغازية وخصائص الوقود وعملية الاحتراق في غرف الاحتراق يتضح أن هناك اهتماماً علمياً واسعاً بدراسة العوامل المؤثرة على كفاءة التوربينات الغازية خاصة ما يتعلق بتأثير نوع الوقود وخصائصه الفيزيائية والكيميائية على الأداء الحراري والانبعاثات. وقد أظهرت العديد من الدراسات أن خصائص الوقود مثل القيمة الحرارية وتركيب الوقود تلعب دوراً مهماً في تحديد كفاءة الاحتراق واستقرار اللهب داخل غرفة الاحتراق كما تؤثر هذه الخصائص بشكل مباشر على القدرة الناتجة والكفاءة الحرارية للتوربينات الغازية.

كما بينت الدراسات التي تناولت عملية الاحتراق داخل التوربينات الغازية أن كفاءة الاحتراق تعتمد بدرجة كبيرة على عملية الخلط بين الوقود والهواء وعلى تصميم غرفة الاحتراق وظروف التشغيل المختلفة مثل درجة حرارة الهواء الداخل ونسبة الضغط. بالإضافة إلى ذلك أوضحت الدراسات التي اعتمدت على النمذجة العددية باستخدام ديناميكيات الموائع الحسابية أن هذه الأدوات تمثل وسيلة فعالة لتحليل سلوك الاحتراق وتقييم تأثير المتغيرات التشغيلية المختلفة على أداء التوربينات الغازية.

استنادًا إلى ما سبق ذكره من الدراسات السابقة تتمثل الإضافة العلمية لهذه

الدراسة في تناول عدد من الجوانب التي لم تحظَ بالتحليل الكافي وذلك من خلال إجراء تحليل حراري يعتمد على بيانات تشغيل فعلية لمحطة أوباري الغازية بدلًا من الاعتماد على النماذج النظرية أو ظروف التصميم القياسية كما تقدم الدراسة منهجية تحليل قابلة للتطبيق على مختلف أنواع محطات توليد الطاقة الكهربائية عند توفر البيانات التشغيلية اللازمة إضافةً إلى ذلك تدمج الدراسة بين الأبعاد الفنية والاقتصادية والبيئية في إطار تحليلي متكامل وهو ما لا يتوفر بشكل كافٍ في الأدبيات السابقة.

منهجية البحث

يبين الشكل (1) المنهجية المتبعة في الدراسة.

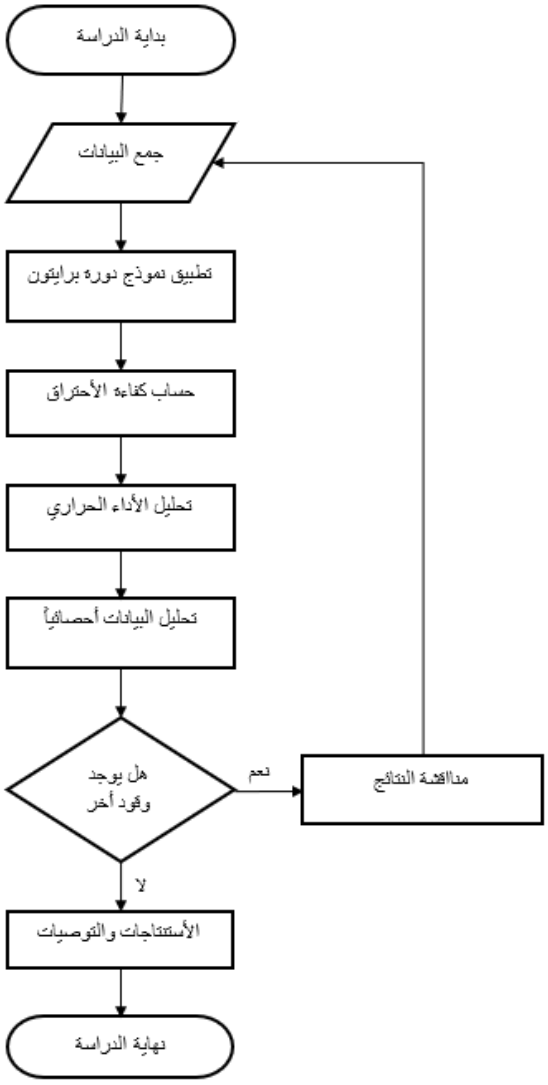
وصف النظام

لزيادة إنتاج الكهرباء في ليبيا، قامت الشركة العامة للكهرباء بالتعاقد على تنفيذ محطة أوباري لتوليد الطاقة الكهربائية في جنوب غرب ليبيا بقدرة إجمالية تبلغ 640 ميغاواط. تتكون المحطة من أربع وحدات توربينية غازية من طراز SGT5-E2000 وقد دخلت حيز التشغيل في ديسمبر 2017. [12, p. 5].

تقع المحطة بالقرب من مدينة أوباري في جنوب غرب ليبيا ضمن نطاق الصحراء الكبرى. تتميز منطقة الدراسة بظروف بيئية صحراوية قاسية وفقاً للبيانات المناخية المستخلصة من قواعد البيانات الجغرافية العالمية، حيث يسودها مناخ صحراوي شديد الجفاف يتميز بارتفاع درجات الحرارة وانخفاض الرطوبة النسبية على مدار العام. وتشير السجلات المناخية إلى أن درجات الحرارة في المنطقة قد تتجاوز 40 °م خلال فصل الصيف بينما تنخفض نسبياً خلال فصل الشتاء في حين تبقى الرطوبة النسبية منخفضة نتيجة لبعد المنطقة عن المسطحات المائية الكبرى.

كما تتسم المنطقة بارتفاع معدلات الإشعاع الشمسي وقلة الغطاء السحابي إضافة إلى تعرضها المتكرر للعواصف الرملية وانتشار الغبار في الهواء نتيجة لوجودها داخل نطاق الحقول الرملية الصحراوية وتشكل هذه الظروف البيئية عوامل مؤثرة بشكل مباشر على أداء التوربينات الغازية حيث تؤثر درجة حرارة الهواء المحيط وكثافته وتركيز الجسيمات الصلبة في الهواء على كفاءة الضاغط وكمية الهواء الداخل إلى غرفة الاحتراق وبالتالي على القدرة الناتجة والكفاءة الحرارية للتوربينات الغازية المستخدمة في المحطة [15].

يبين الشكل (2) رسماً تخطيطياً لوحدة توربينية غازية نوع SGT5-2000E المستخدمة في محطة أوباري ، والتي تتكون من ضاغط محوري من 16 مرحلة مزود بريش توجيه أولية متغيرة. تهدف هذه الريش إلى التحكم في نسبة الضغط وتحسين الأداء عند ذروة الحمل وتقليل الاهتزازات. وتوربين من 4 مراحل مدمجة بأحدث تصميم للشفرات. يمكن استبدال جميع الشفرات المتحركة والثابتة للتوربين والضاغط في مكانها مما يقلل من فترات توقف تشغيل المحرك. وتحتوي على غرفتي احتراق كبيرتين الحجم من نوع الصومعة متصلتين جانبياً ومزودتين ببلاطات سيراميكية قابلة للاستبدال بشكل فردي. جميع وحدات التوربين الغازي مغطاة بغلاف مقسم أفقيًا يحتوي على الشفرات الثابتة للضاغط والتوربين [12]. يوجد مولد كهربائي مبرد بالهواء متصل بالطرف البارد (طرف الضاغط). كما يُعدّ طراز SGT5-2000E نموذجًا فريدًا من نوعه لتوربينات الغاز، حيث يتم توصيل المولد الكهربائي بالعمود من جهة الضاغط. يتيح هذا التصميم سهولة التعديل لنموذج الدورة المركبة، على عكس النماذج الأخرى التي يتم توصيل مولدها الكهربائي من جهة التوربين . يتميز هذا الطراز أيضًا بقدرة عالية على العمل بمستويات موثوقية عالية، مع إمكانية تشغيله بوقود سائل وغازي [11].

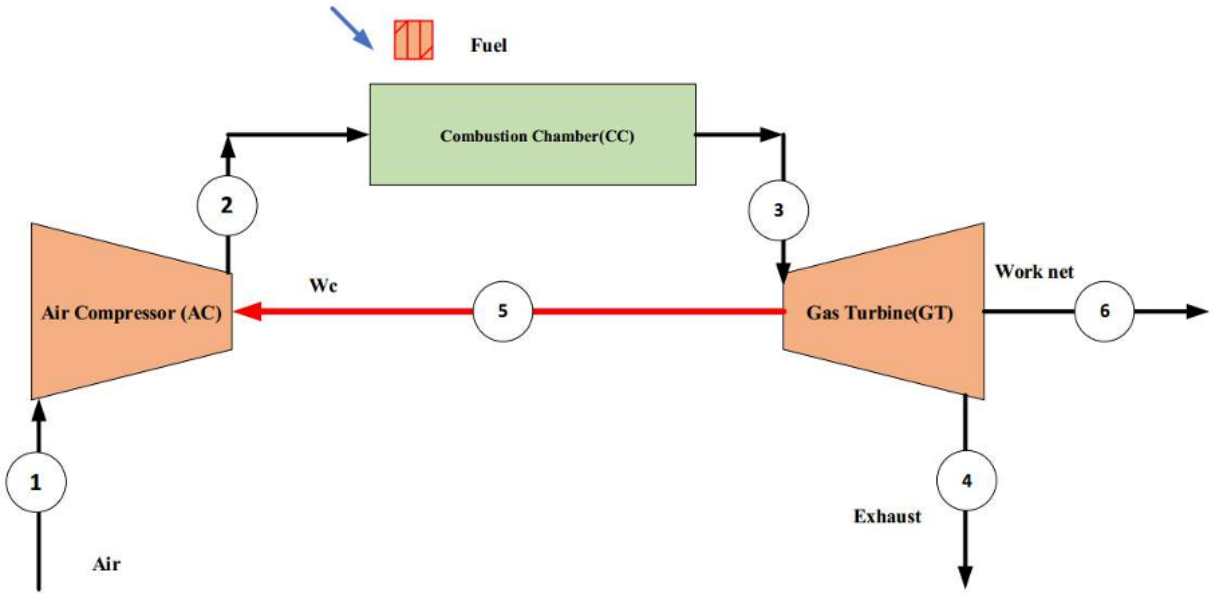


الشكل 1: المخطط الانسيابي للمنهجية المتبعة في الدراسة

تستخدم التوربينة جزءًا من الطاقة المولدة لتشغيل ضاغط الهواء، بينما يُستغل الجزء المتبقي في أدارة مولد كهربائي يعمل بسرعة 3000 دورة في الدقيقة عند جانب الضاغط. يقوم المولد بتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية، تُغذى بها الشبكة العامة.

تعمل محطة أوباري الغازية وفق دورة برايتون المفتوحة. ولتوفير وصف هندسي واضح للوحدة التوربينية محل الدراسة، يبين الجدول (1) أهم المواصفات التصميمية التي اعتمدت كأساس لوصف النظام وتحديد حدود الدراسة [16].

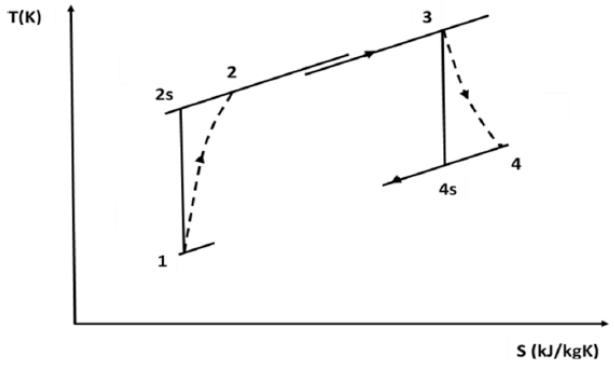
يبين الشكل (3) مخططاً لدرجة الحرارة والأنتالبي للتوربينة الغازية ، كذلك يبين المخطط نسبة الأنضغاط والتمدد والفواقد في كل من الضاغط والتوربين وغرفة الأحتراق.



الشكل 2: مخطط لوحدة توربينية بمحطة أوباري الغازية

الجدول 1: المواصفات التصميمية للوحدة التوربينية الغازية

Design Thermodynamic Parameters of (SGT5-2000E)		
Grid frequency	[HZ]	50
Power output	[MW]	166
Efficiency	[%]	34.7
Heat rate	[kJ/kWh]	10,375
Exhaust temperature	[°C]	541
Exhaust mass flow	[kg/s]	525
Pressure ratio	-	12
Ambient air temperature	[°C]	15
Ambient air pressure	(bar)	1.0
Relative humidity	[%]	60
Length x width x height	[m]	10×12×7.5
Weight	[t]	234



الشكل 3: مخطط (T-S) لدورة محطة أوباري الغازية

تُحدد البيانات التصميمية في الجدول (1) الخصائص التشغيلية الرئيسية وحدود النظام. وبالأعتماد على هذه البيانات، بالإضافة إلى بيانات التشغيل الفعلية المأخوذة من نظام التحكم الموزع بالمحطة (DCS)، يمكن بناء نموذج رياضي يمثل سلوك النظام تحت ظروف التشغيل المختلفة ويعتمد على العلاقات الأساسية للديناميك الحراري ومعادلات أتزان الكتلة والطاقة و يستخدم في حساب مؤشرات الأداء الرئيسية التي تشكل الأساس في تحليل الطاقة ومن ثم التحليل البيئي والأقتصادي للمحطة.

تم تطبيق نموذج دورة برايتون لتمثيل أداء التوربين الغازي ، وذلك لدراسة تأثير نوع الوقود على الكفاءة الحرارية والأداء العام للمحطة.

فرضيات وحدود الدراسة ومصادر اللايقين في النتائج

لتسهيل عملية التحليل تم تبني الفرضيات التالية:

1. تم اعتبار الهواء وغازات الاحتراق غازات مثالية، وتم افتراض أن خواصها الحرارية تعتمد فقط على درجة الحرارة.
2. النظام معزول حرارياً، بحيث لا يحدث أي انتقال للحرارة بين مكونات النظام والوسط المحيط.
3. النظام يعمل تحت ظروف تشغيل مستقرة (Steady State) ، بحيث تبقى جميع الخواص التشغيلية ثابتة مع الزمن، ولا يحدث أي تراكم للطاقة أو الكتلة داخل النظام.
4. التوربين يعمل في وضع توليد كهرباء مستمر، حيث يكون متصل بالمولد ويعمل عند ظروف تشغيل ثابتة دون انقطاعات أو تغيرات مفاجئة في الحمل، وذلك لتمثيل حالة التشغيل الفعلية المستقرة للمحطة.
5. أحتراق مثالي للوقود داخل غرفة الاحتراق، بحيث يتحول الكربون بالكامل إلى CO_2 والهيدروجين إلى H_2O ، دون تكون نواتج احتراق غير كاملة، وذلك لتبسيط الحسابات الحرارية والكيميائية.
6. أهمال الفواقد الميكانيكية في مكونات التوربين والضاغط، واعتبار انتقال القدرة ميكانيكياً بدون خسائر، وذلك للتبسيط والتركيز على تأثير نوع الوقود على الأداء.

وتتمثل حدود الدراسة في عدم دراسة تأثير التركيب الكيميائي للوقود وكذلك عدم دراسة تأثير تغير البيانات المناخية على أداء المحطة.

أما مصادر اللايقين في النتائج فتتمثل في البيانات التشغيلية للمحطة وكذلك الخصائص الفيزيائية للوقود والهواء.

معادلات نموذج الطاقة

أستند تحليل الطاقة للمحطة إلى الحالات الموضحة في الشكل (3) والمعادلات من (1) إلى (7):

تحسب نسبة الأنضغاط (r_p) و كفاءة الأحتراق على التوالي من المعادلتين :

$$r_p = \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

$$\eta_{comb} = \frac{\dot{m}_g \times c_{p,g} \times T_3 - \dot{m}_a \times c_{p,a} \times T_2}{\dot{m}_f \times LHV} \quad (2)$$

حيث :

p_2 ، p_1 هما ضغط الدخول للضاغط وضغط الخروج من الضاغط على التوالي بوحدات (bar).

η_{comb} - كفاءة الأحتراق .

$\dot{m}_g$ ، $\dot{m}_a$ - هما معدل تدفق الكتلي للهواء وغازات الأحتراق على التوالي بوحدات (kg/s).

$c_{p,g}$ ، $c_{p,a}$ - هما السعة الحرارية النوعية للهواء وغازات الأحتراق على التوالي بوحدات (kJ/kg.k).

T_2 - هي درجة حرارة الخروج من الضاغط بوحدات (K).

T_3 - هي درجة حرارة الدخول للتوربين بوحدات (K).

$\dot{m}_f$ – التدفق الكتلي للوقود بوحدات (kg/s).

LHV – القيمة الحرارية الدنيا للوقود بوحدات (kJ/kg).

تحسب القدرة المطلوبة للضاغط ($\dot{W}_c$) والقدرة المنتجة ($\dot{W}_t$) من التوربين على التوالي من المعادلات التالية :

$$\dot{W}_c = \dot{m}_a \times c_{p,a} \times (T_2 - T_1) \quad (3)$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}_g \times c_{p,g} \times (T_3 - T_4) \quad (4)$$

أما القدرة الصافية (P_{net}) فتحسب من المعادلة :

$$P_{net} = \dot{W}_t - \dot{W}_c \quad (5)$$

تحسب الكفاءة الحرارية الصافية ($\eta_{net,thermal}$) من العلاقة التالية :

$$\eta_{net,thermal} = \frac{P_{net}}{\dot{m}_f * LHV} \quad (6)$$

ويحسب أستهلاك الوقود النوعي (SFC) من المعادلة:

$$SFC = \frac{3600\,\dot{m}_f}{P_{net}} \quad (7)$$

تم جمع بيانات التشغيل الحقيقية من المحطة خلال فترة الدراسة. وشملت البيانات المتغيرات التشغيلية الأساسية اللازمة لتطوير النموذج الرياضي وإجراء التحليل الطاقوي والبيئي والاقتصادي. ويبين الجدول (2) أهم المتغيرات المستخدمة المأخوذة من المحطة ووحدات قياسها.

الجدول 2: البيانات التشغيلية الفعلية للوحدة التوربينية الغازية بالمحطة

Mass flow rate $\dot{m}$ [kg/s]	Pressure [kpa]	Temperature C°	Point
480	100	34	**1**
480	1100	382.68	**2**
492	1060	1168.91	**3**
492	100	568	**4**
12	-	44	**Fuel**

استُخدمت المتغيرات الواردة في الجدول (2) كمدخلات مباشرة للنموذج الرياضي، حيث استُخدمت درجات الحرارة والضغوط في حساب خواص الهواء وغازات الأحتراق، بينما استُخدم معدل تدفق الوقود والقيمة الحرارية الدنيا في حساب القدرة الحرارية الداخلة والكفاءة الحرارية ومعدل الحرارة النوعي.

تعتمد دقة تقييم أداء التوربين الغازي بصورة مباشرة على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للوقود المستخدم. تم استخدام وقود النفط الخام والديزل ووقود الزيت الثقيل والغاز الطبيعي بالمواصفات الواردة في الجدول (3).

الجدول 3: الخصائص الفيزيائية والمدلولات الاقتصادية والبيئية للوقود الليبي

Parameters	Unit	Crude Oil	Diesel	H.F.O	N.G
$\dot{m}_f$	[kg/s]	12	12	12	12
L.H.V	[kJ/kg]	42510	43650	41250	47500
EF$_{CO2}$	[kgCO2 /kgfuel]	3.16	3.2	3.11	2.75
Fuel price	[$/kg]	0.52	1.15	1.2	0.065
C$_{P,gas}$	[kJ/kg.K]		1.150		
k$_{gas}$			1.3		
k$_{air}$			1.4		

استُخدمت الخصائص الواردة في الجدول (3) لحساب نسبة الهواء المتكافئة، والطاقة الحرارية الداخلة، وكمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، بالإضافة إلى تقدير تكلفة الوقود في التحليل الاقتصادي.

في التحليل البيئي تحسب أنبعاثات ثاني أكسيد الكربون المنبعثة من الوحدة التوربينية الغازية (E_S) من المعادلة التالية [18-21] :

$$E_S = \frac{\dot{m}_f \times EF_{co_2}}{P_{net}} \quad (8)$$

حيث:

E_S – الأنبعاثات النوعية النوعية بوحدات (kg_{co2} / MWh).

EF_{co_2} – معامل الأنبعاثات بوحدات (kg_{co2}/kg_{fuel}).

وفي التحليل الأقتصادي تحسب تكلفة وحدة الطاقة الكهربائية المنتجة (CE) بوحدة $/MWh من العلاقة التالية:

$$CE = \frac{\dot{m}_f * C_f * 3600}{P_{net}} + \frac{\dot{m}_f * EF_{co2} * C_{co2} * 3600}{P_{net}} \quad (9)$$

حيث أن :

C_f – سعر الوقود بوحدات ($/kg $_{fuel}$).

C_{co2} - سعر ضريبة الكربون بوحدات ($/ton$_{co2}$)

النتائج

بعد تطبيق النموذج الرياضي على بيانات المحطة ، تم حساب مؤشرات الأداء الطاقوي والبيئي والاقتصادي باستخدام المعادلات من (1) إلى (9) الموضحة في منهجية الدراسة. وقد شملت هذه المؤشرات القدرة الكهربائية الصافية ، والكفاءة الحرارية ، والاستهلاك النوعي للوقود، وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون ، وتكلفة إنتاج الطاقة الكهربائية. ويبين الجدول (4) النتائج المحسوبة لمؤشرات الأداء، والتي تمثل الأساس في تقييم تأثير نوعية الوقود على أداء المحطة.

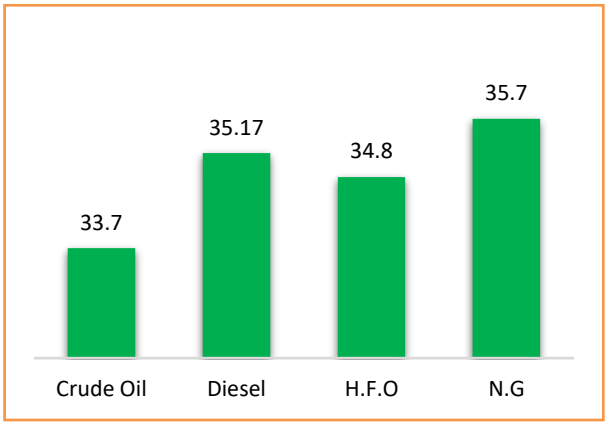
يوضح الجدول (4) أن التغير في نوعية الوقود لا يؤثر على مؤشر واحد من مؤشرات الأداء ، ولكن يمتد تأثيره إلى الأداء الطاقوي والبيئي والاقتصادي للمحطة. وهذا الترابط يظهر واضحاً، حيث أن تحسن الكفاءة الحرارية

وانخفاض الاستهلاك النوعي للوقود يؤدي إلى تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وخفض تكلفة إنتاج الطاقة الكهربائية.

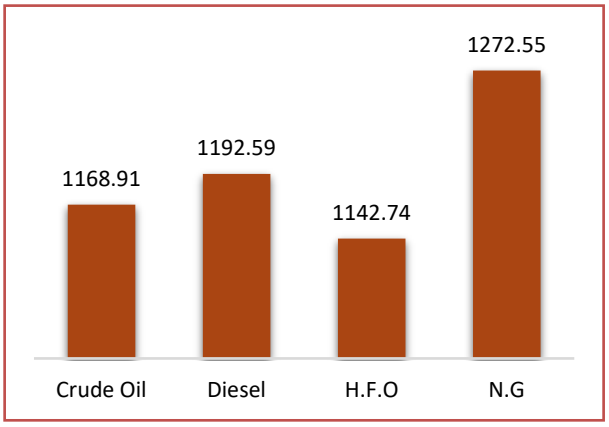
المخططات البيانية من الشكل (4) إلى الشكل (9) توضح تأثير نوع الوقود على الكفاءة الحرارية، ودرجة حرارة الدخول للتوربين ، والاستهلاك النوعي للوقود ، و القدرة الصافية ، وأنبعاثات CO_2، وتكلفة أنتاج وحدة الطاقة الكهربائية.

الجدول 4: تحليل مقارن لأنواع الوقود المستخدمة في محطة أوباري الغازية

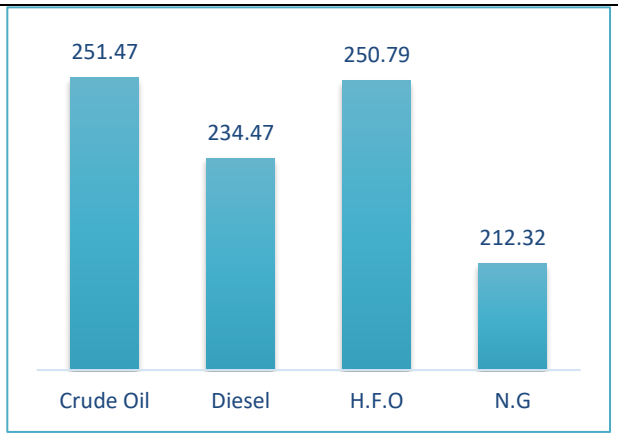
Performance Parameters	Crude Oil	Diesel	H.F.O	N.G
T_3; [°C]	1168.91	1192.59	1142.74	1272.55
Power output (P_{net}); [MW]	171.79	184.24	172.26	203.47
Net efficiency (η_{net}); [%]	33.70	35.17	34.80	35.70
S.F.C; [kg/MWh]	251.47	234.47	250.79	212.32
CO2 emissions (E_s); [kgCO_2/MWh]	794.64	750.31	780.95	583.87
Cost of MWh; [$/MWh]	186.39	322.17	355.61	54.67



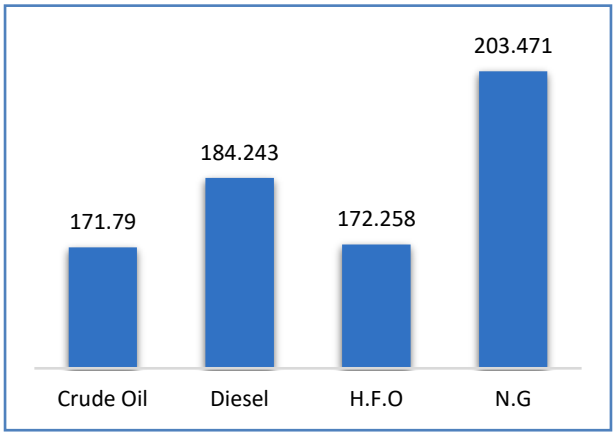
الشكل 4: تأثير نوع الوقود على الكفاءة الحرارية (%)



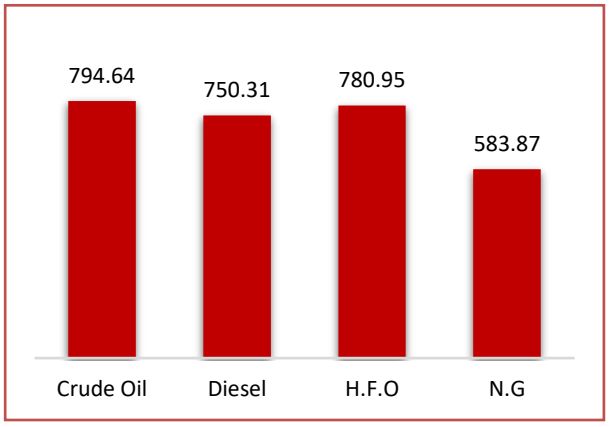
الشكل 5: تأثير نوع الوقود على درجة حرارة الدخول للتوربين (°C)



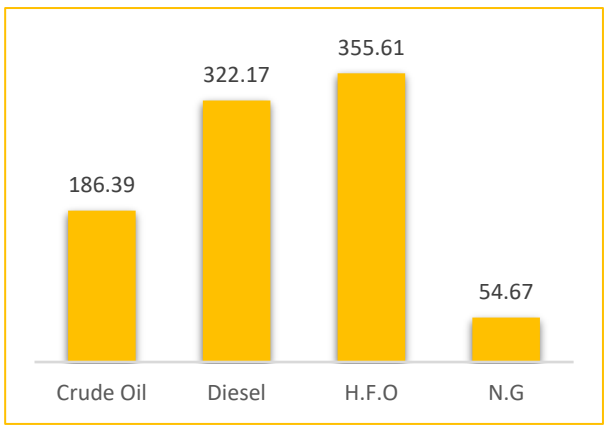
الشكل 6: تأثير نوع الوقود على أستهلاك الوقود النوعي (kg/MWh)



الشكل 7: تأثير نوع الوقود على القدرة الخارجة (MW)



الشكل 8: تأثير نوع الوقود على أنبعاثات CO_2 (kgCO2/MWh)



الشكل 9: تأثير نوع الوقود على تكلفة أنتاج الطاقة الكهربائية ($/MWh)

المناقشة

تُظهر نتائج النموذج الرياضي اختلافًا واضحًا في أداء التوربين الغازي تبعًا لنوع الوقود المستخدم، حيث كان للخصائص الفيزيائية والكيميائية لكل وقود تأثير مباشر على الكفاءة الحرارية، الاستهلاك النوعي، والانبعاثات الناتجة، وتكلفة أنتاج الطاقة الكهربائية.

يوضح شكل (4) تأثير نوع الوقود على الكفاءة الحرارية، أظهرت النتائج أن استخدام الغاز الطبيعي أدى إلى تحقيق أعلى كفاءة بلغت حوالي (35.7%) مقارنة بالنفط الخام (33.7%) والديزل (35.17%) وزيت الوقود الثقيل (34.8%). ويرجع ذلك إلى أرتفاع القيمة الحرارية النوعية للغاز الطبيعي وتميزه بنسبة هيدروجين أعلى ومحتوى كربوني أقل، مما يؤدي إلى تحسين جودة الخلط مع الهواء وتحقيق احتراق أكثر كفاءة وانتظامًا داخل غرفة الاحتراق. ولذلك، ترتفع درجة حرارة الدخول إلى التوربين (T_3) ، وهو ما ينعكس بشكل أيجابي على الكفاءة الحرارية وفقًا لعلاقة دورة برايتون، حيث تعتمد الكفاءة بشكل أساسي على درجات الحرارة القصوى والصغرى في الدورة.

من جهة أخرى، أظهرت النتائج أن الكفاءة تنخفض تدريجيًا عند استخدام الوقود السائل، خاصة النفط الخام. ويعود ذلك إلى عدة عوامل، من بينها ضعف عملية التذرية (Atomization) واحتياج النفط الخام إلى زمن أطول للاحتراق، مما يؤدي إلى زيادة الفواقد الحرارية وانخفاض كفاءة تحويل الطاقة. بالإضافة إلى ذلك، فإن عدم تجانس الخلط بين الوقود والهواء في هذه الحالة يؤدي إلى احتراق غير مثالي نسبيًا، رغم افتراض الاحتراق الكامل في النموذج.

يبين شكل (5) أن نوع الوقود يؤثر بصورة مباشرة في درجة حرارة الدخول إلى التوربين (T_3) حيث سجل الغاز الطبيعي أعلى قيمة بلغت (1272.55 °C)، يليه الديزل (1192.59 °C) ، ثم النفط الخام (1168.91 °C) ، في حين سجل زيت الوقود الثقيل (1142.74 °C) أدنى قيمة. ويرجع السبب في ذلك إلى اختلاف الخصائص الفيزيائية والكيميائية للوقود، مثل القيمة الحرارية، ونسبة الهيدروجين إلى الكربون، وسهولة التبخر والتذرية والاختلاط مع الهواء، مما يؤثر في كفاءة عملية الاحتراق وكمية الطاقة الحرارية المنطلقة داخل غرفة الاحتراق. فالوقود ذو الاحتراق الأكثر كفاءة ، كالغاز الطبيعي ثم الديزل، يولد غازات احتراق ذات درجة حرارة أعلى، بينما يؤدي انخفاض جودة الاحتراق في النفط الخام وزيت الوقود الثقيل إلى انخفاض درجة حرارة غازات الاحتراق، وبالتالي انخفاض درجة حرارة الدخول إلى التوربين. وتشير هذه النتائج إلى أن تحسين جودة الوقود يسهم في رفع قيمة (T_3) ، الأمر الذي ينعكس إيجابياً على الأداء الحراري والقدرة المنتجة للوحدة التوربينية الغازية، ضمن الحدود التشغيلية والتصميمية المسموح بها.

تجدر الإشارة إلى أن الاختلاف في قيم (T_3) الظاهرة في الشكل يعود أساساً إلى تأثير نوع الوقود نفسه، حيث تم تثبيت بقية المتغيرات التشغيلية. وهذا يؤكد أن الخصائص الكيميائية والفيزيائية للوقود تعد عاملاً حاسماً في تحديد درجة حرارة غازات الاحتراق، وبالتالي في تحسين الأداء الحراري للوحدة التوربينية الغازية.

أما بالنسبة للاستهلاك النوعي للوقود، فقد أظهرت النتائج وكما هو موضح في الشكل (6) أن الغاز الطبيعي يحقق أقل قيمة (212.32 kg/MWh) ، يليه الديزل (234.47 kg/MWh)، ثم الوقود الثقيل (250.79 kg/MWh)، ثم النفط الخام (251.47 kg /MWh) ويفسر ذلك بأن الوقود ذو الكفاءة الأعلى يتطلب كمية أقل لإنتاج نفس القدرة، وهو ما يتماشى مع العلاقة العكسية بين الكفاءة الحرارية والاستهلاك النوعي. كما أن القيمة الحرارية للوقود تلعب دورًا مهمًا في هذا السياق، حيث يسمح الاحتراق الفعال للغاز الطبيعي باستخلاص طاقة أكبر لكل وحدة كتلة.

من الشكل (7) توضح النتائج أن القدرة الصافية المنتجة تختلف بشكل ملحوظ باختلاف نوع الوقود، حيث سجل الغاز الطبيعي أعلى قدرة بلغت (203.47 MW) ، في حين انخفضت القدرة إلى ما يقارب (172 MW) عند استخدام الوقود الثقيل والنفط الخام. ويرجع السبب في ذلك إلى تحسن خصائص الاحتراق في الغاز الطبيعي، حيث يؤدي إلى رفع درجة حرارة الدخول إلى التوربين وزيادة شغل التمدد، مما ينعكس إيجابيًا على القدرة المنتجة. في المقابل، يعاني الوقود الثقيل من ضعف في التذرية والخلط مع الهواء، مما يؤدي إلى احتراق أقل كفاءة وفواقد حرارية أكبر، وبالتالي انخفاض القدرة. وتشير هذه النتائج إلى أن اختيار نوع الوقود يلعب دورًا أساسيًا في تحسين الأداء التشغيلي للتوربينات الغازية.

من الناحية البيئية، تُظهر نتائج انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الموضحة في الشكل (8) اختلافًا كبيرًا بين أنواع الوقود الأربعة المستخدمة، حيث سجل الغاز الطبيعي أدنى انبعاثات بلغت حوالي (584 kg/MWh)، مقارنة بالنفط الخام والوقود الثقيل حيث تجاوزت انبعاثاتهما (780MWh) ويعود ذلك إلى انخفاض محتوى الكربون في الغاز الطبيعي وارتفاع نسبة الهيدروجين، مما يؤدي إلى احتراق أنظف وإنتاج كمية أقل من CO_2 بالإضافة إلى ذلك، فإن الكفاءة الحرارية الأعلى للغاز الطبيعي تقلل من كمية الوقود المطلوبة لإنتاج نفس القدرة، مما يسهم في تقليل الانبعاثات. من جهة أخرى ، يؤدي ارتفاع محتوى الكربون في الوقود الثقيل والنفط الخام إلى زيادة ملحوظة في انبعاثات CO_2 ، خاصة مع انخفاض كفاءة الاحتراق. وتشير هذه النتائج إلى أن اختيار نوع الوقود يمثل عاملًا حاسمًا في تقليل الأثر البيئي لمحطات التوربينات الغازية.

تُظهر نتائج تكلفة إنتاج الطاقة الكهربائية والموضحة بيانياً في شكل (9) اختلافًا كبيرًا بين أنواع الوقود، حيث سجل الغاز الطبيعي أدنى تكلفة بلغت حوالي (54.57$/MWh) ، في حين سجل الوقود الثقيل أعلى تكلفة تجاوزت (355.61$/MWh) . ويعود ذلك إلى ارتفاع الكفاءة الحرارية للغاز الطبيعي وانخفاض استهلاكه النوعي، مما يقلل من كمية الوقود المطلوبة لإنتاج نفس القدرة. في المقابل يؤدي انخفاض الكفاءة الحرارية للوقود الثقيل وزيادة استهلاكه إلى ارتفاع ملحوظ في تكلفة التشغيل ، رغم انخفاض سعره النسبي في بعض الحالات. كما يلعب سعر الوقود دورًا أساسيًا، حيث يُعتبر الديزل من أكثر أنواع الوقود تكلفة ، مما ينعكس مباشرة على تكلفة إنتاج الطاقة. وتشير هذه النتائج إلى أن اختيار نوع الوقود يمثل عاملًا حاسمًا في تحديد الجدوى الاقتصادية لمحطات التوربينات الغازية.

تتوافق هذه النتائج مع المفاهيم الأساسية لاحتراق الوقود ومع ما هو معروف في الأدبيات العلمية حول أداء التوربينات الغازية، حيث يعتبر الغاز الطبيعي الوقود الأمثل من حيث الكفاءة وتقليل الانبعاثات. كما أن الفروقات المحسوبة في هذه الدراسة تقع ضمن النطاقات المقبولة عمليًا، مما يعزز موثوقية النموذج المستخدم رغم تبسيطاته مثل افتراض الغاز المثالي وإهمال الفواقد الميكانيكية.

علاوة على ذلك، فإن افتراض التشغيل تحت ظروف مستقرة (Steady State) ووضع الحمل الأساسي (Base Load) ساهم في عزل تأثير نوع الوقود بشكل واضح، مما أتاح تحليلًا أدق للعلاقة بين خصائص الوقود وأداء الدورة الحرارية. ومع ذلك، ينبغي الإشارة إلى أن إدخال تأثيرات التشغيل الجزئي أو الفواقد الحرارية الفعلية قد يؤدي إلى اختلافات طفيفة في القيم المطلقة، دون أن يغير الاتجاه العام للنتائج.

بناءً على ما سبق، يمكن الاستنتاج أن اختيار نوع الوقود له تأثير حاسم على أداء محطات التوربينات الغازية، سواء من الناحية التشغيلية أوالاقتصادية أو البيئية. ويظهر الغاز الطبيعي بأنه الوقود الأفضل نظرًا لما يحققه من توازن بين الكفاءة العالية والانبعاثات المنخفضة، في حين أن استخدام الوقود الثقيل يرتبط بتدهور الأداء وزيادة التأثير البيئي وتكلفة أنتاج الطاقة.

الاستنتاجات

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم تأثير نوع الوقود على الأداء الحراري والبيئي والأقتصادي لمحطات التوربينات الغازية باستخدام نموذج دورة برايتون. أظهرت النتائج أن الغاز الطبيعي يحقق أعلى كفاءة حرارية وأقل انبعاثات من ثاني أكسيد الكربون مقارنة بالنفط الخام والديزل وزيت الوقود الثقيل، في حين سجل النفط الخام والوقود الثقيل أعلى استهلاك نوعي وأدنى أداء حراري. ويعود ذلك إلى الاختلاف في الخصائص الكيميائية للوقود، خصوصا محتوى الكربون وجودة الاحتراق. تشير هذه النتائج إلى أن اختيار الوقود يلعب دورًا حاسمًا في تحسين كفاءة المحطات وتقليل الأثر البيئي وكلفة أنتاج الطاقة. وبناءا عليه، يوصى باستخدام الغاز الطبيعي كوقود مفضل لتشغيل التوربينات الغازية لتحقيق توازن أفضل بين الأداء الاقتصادي والاستدامة البيئية.

التوصيات

في نهاية هذا البحث واستنادا على نتائجه يمكن التوصية بالتالي:

1. الانتقال الى الغاز الطبيعي كوقود عوضا عن الوقود الاحفوري السائل لجميع محطات الطاقة العاملة في البلاد.
2. تبني تقنية المحطات المركبة في المناطق الساحلية القريبة عن البحر كمشروع تطوير المحطات الغازية [22].
3. التحول نحو الوقود النظيف والمتمثل في الطاقة الشمسية المركزة [23-30]

Author Contributions:
Mangir: Literature search, study design, data extraction, data analysis, manuscript drafting, and manuscript editing. **Salem:** Conceptualization, Methodology development, scientific supervision. **Abduljawad, Otman** and **Nassar:** Study design, data validation, manuscript review. All authors have read and approved the final version of the manuscript.
Funding: "This research received no external funding."
Data Availability Statement: "The data supporting the findings of this study are available within the article and its tables. No additional datasets were generated or analyzed during the current study."
Conflicts of Interest: "The authors declare that they have no conflict of interest."

References

[1] J. Golembiewski, and S. Tokumaru. "Pharmacological prophylaxis and management of adult postoperative/post discharge nausea and vomiting." *Journal of PeriAnesthesia Nursing*, vol. 21, no. 6, pp. 385–397, 2006, https://doi.org/10.1016/j.jopan.2006.09. 004.

[2] C. Apfel, et al., "Evidence-based analysis of risk factors for postoperative nausea and vomiting." *British Journal of Anaesthesia*, vol. 109, no. 5, pp. 742–753, 2012, https://doi.org/10.1093/bja/aes276.

[3] A. Bantie, M. Woldeyohannes, Z. Ferede, and B. Regasa. "Magnitude and associated factors of nausea and vomiting after cesarean section under spinal anesthesia in Gandhi Memorial Hospital, Addis Ababa, Ethiopia: A cross-sectional study." 2020.

[4] N. Kalani, et al. "The effect of ondansetron and dexamethasone on nausea and vomiting under spinal anesthesia." *World Journal of Plastic Surgery*, vol. 6, no. 1, pp. 88–93, 2017.

[5] S. Szarvas, R. Chellapuri, D. Harmon, J. Owens, D. Murphy, and G. Shorten. "A comparison of dexamethasone, ondansetron, and dexamethasone plus ondansetron as prophylactic antiemetic and antipruritic therapy in patients receiving intrathecal morphine for major orthopedic surgery." *Anesthesia & Analgesia*, vol. 97, no. 1, pp. 259–263, 2003, https://doi.org/10.1213/ 01.ANE.0000068827.72944.31.

[6] S. Ghosh, and S. Dey. "Comparing different antiemetic regimens for chemotherapy induced nausea and vomiting." *International Journal of Collaborative Research on Internal Medicine & Public Health*, vol. 2, no. 5, p. 142, 2010.

[7] S. Sane, M. Hasanlui, R. Abbasivash, A. Mahoori, S. Hashemi, and F. Rafiei. "Comparing the effect of intravenous dexamethasone, intravenous ondansetron, and their combinations on nausea and vomiting in cesarean section with spinal anesthesia." *Advanced Biomedical Research*, vol. 4, p. 230, 2015, https://doi.org/10.4103/2277-9175.168175.

[8] I. Šklebar, T. Bujas, and D. Habek. "Spinal anaesthesia-induced hypotension in obstetrics: Prevention and therapy." *Acta Clinica Croatica*, vol. 58, Suppl. 1, pp. 90–95, 2019, https://doi.org/10.20471/acc.2019.58.s1. 13.

[9] S. Nortcliffe, J. Shah, and D. Buggy. "Prevention of postoperative nausea after spinal morphine for Caesarean section: Comparison of cyclizine, dexamethasone, and placebo." *British Journal of Anaesthesia*, vol. 90, no. 5, pp. 665–670, 2003. https://doi.org/10.1093/bja/aeg105.

[10] S. Hailu, S. Mekonen, and A. Shiferaw. "Prevention and management of postoperative nausea and vomiting after cesarean section: A systematic literature review." *Annals of Medicine and Surgery*, vol. 75, p. 103405, 2022. https://doi.org/10.1016/j.amsu.2022.103405.

[11] J. R. Nejadi, M. Shamseh, N. Ronasi, M. Birjandi, and A. Karimi. "Comparison of the effects of dexamethasone and ondansetron on the reduction of postoperative nausea and vomiting following cesarean section under spinal anesthesia." *Current Reviews in Clinical and Experimental Pharmacology*, vol. 16, no. 1, 2021. https://doi.org/10.2174/2772432815666201209 101610.

[12] A. Mohamed, M. Mahran, and R. Ibrahim. "Dexamethasone versus ondansetron on postoperative nausea and vomiting in caesarean section." *Minia Journal of Medical Research*, vol.

31, no. 2, pp. 88–96, 2020.

[13] N. Shahid, S. Jamshed, F. Khan, A. Rasheed, A. Ali, and A. Anwar. "Comparing the effectiveness of ondansetron and dexamethasone on nausea/vomiting in cesarean section under spinal anesthesia." Pakistan *Journal of Medicine and Dentistry*, vol. 11, no. 2, pp. 9–14, 2022.

[14] C. Apfel, E. Läärä, M. Koivuranta, C. Greim, and N. Roewer. "A simplified risk score for predicting postoperative nausea and vomiting: Conclusions from cross-validations between two centers," *Anesthesiology*, vol. 91, no. 3, pp. 693–700, 1999. https://doi.org/10.1097/00000542-199909000-00022.

[15] B. Demilew, N. Zurbachew, N. Getachew, G. Mekete, and D. Teshome. "Prevalence and associated factors of intraoperative nausea and vomiting of mothers who gave birth with cesarean section under regional anesthesia: A systematic review and meta-analysis." *BMC Pregnancy and Childbirth*, vol. 25, no. 1, p. 244, 2025. https://doi.org/10.1186/s12884-025-07457-2.

[16] P. Sánchez-Rodríguez, C. Fuentes-Orozco, and A. González-Ojeda. "Effect of dexamethasone on postoperative symptoms in patients undergoing elective laparoscopic cholecystectomy: A randomized clinical trial." *World Journal of Surgery*, vol. 34, no. 5, pp. 895–900, 2010. https://doi.org/10.1007/s00268-010-0437-z.

[17] M. Tramer. "A rational approach to the control of postoperative nausea and vomiting: Evidence from systematic reviews. Part I. Efficacy and harm of antiemetic interventions, and methodological issues." *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, vol. 45, no. 1, pp. 4–13, 2001. https://doi.org/10.1034/j.1399-6576.2001. 450102.x

[18] M. Inweer, and Y. Fathi. "Carbon Emissions Life Cycle Assessment of Cement Industry in Libya." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 162-173, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_21

[19] M. Inweer, et al. "Carbon footprint life cycle assessment of cement industry in Libya." *Discov. Concr. Cem.*, vol. 1, p. 37, 2025. https://doi.org/10.1007/s44416-025-00037-1

[20] N. Fathi, et al. "Estimation of CO2 emission within Libya's electricity generation sector." *Next Research*, vol. 2, no. 3, p. 100567, 2025. https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100567

[21] F. Yasser, et al. "Technical and environmental cost-benefit analysis of strategies towards a green economy in the electricity sector in Libya." economics and policy of energy and the environment, 2/2025, pp 133-167, 2025. https:doi.org/10.3280/EFE2025-002007

[22] A. Otman, et al. "Optimization Study of Converting the Derna Steam Power Plant to a Combined Gas/Steam Cycle." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 47_58, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i2_07

[23] H. El-Khozondar, M. Andeef, Y. Nassar, R. El-Khozondar, and H. Awad. "Feasibility of Concentrating Solar Power as a Solar Fuel for Electrical Power Stations: A Case Study of Ubari Gas-Power Station in Libya." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 56-69, 2026.. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_06

[24] W. Salah, et al. "Grid Reliability Enhancement via PV-Diesel Hybrid System in Palestine: Load Flow Analysis and CO_2 Assessment." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 436-452, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_48

[25] I. Imbayah, et al. "Modeling A 600 MW Floating Photovoltaic System in Al-Khums city, Libya: Performance Analysis and Implementation Using PVSyst." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 223-237, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_24

[26] M. Mohammed, Y. Hamad, and M. Hamdan. "Energy and Exergy Analysis of an Al-Hussein Steam Power Plant in Jordan Using Engineering Equation Solver (EES)." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 199-209, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_21

[27] A. Abduallah, Y. Nassar, S. Mohammed, and M. Ghatus. "Integrating Electricity Sub-Grid with Pumped Hydropower Storage System for Grid Stability and Sustainability." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 322-332, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_40

[28] M. Mohammed, E. Mohammed, R. Elzer , and N. Fathi. "Techno-Economic Feasibility of Parabolic Trough Solar Steam for Thermal Enhanced Oil Recovery." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 184-190, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_19

[29] M. Mohamed, A. Yousef, and A. Hafez. "Concise Comparative Study of Economic Dispatch of Electrical Power Systems." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 404-413. 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_44

[30] M. Abduljawad. "A Hybrid Steady-State Mathematical Model for a Brine-Recycle Multistage Flash Desalination System." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 92-103, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i2_10