African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)
Online ISSN: 2957-644X
Volume 5, Issue 1, 2026
Page No: 69-81
Website: https://aaasjournals.com/index.php/ajapas/index
ISI 2025: 1.126 SJIFactor 2024: 6.752 معامل التأثير العربي: 1.62

Impact of Declining Operational Efficiency on the Production Capacity of Power Plants: A Case Study of the Zawiya Combined Power Station

Abdul-Azim Al-Khudraw [1*], Hassan Hussein Arabi [2], Muhammad Al-Basheer Al-Dakhili [3]
[1] Biomedical Engineering Department, Faculty of Medical Technology, University of Zawiya, Zawiya, Libya
[2,3] Student at Engineering Management Department, Higher Institute of Petroleum and Natural Gas Sciences, Zawiya, Libya

تأثير انخفاض الكفاءة التشغيلية على القدرة الإنتاجية لمحطات توليد الكهرباء: دراسة حالة محطة الزاوية المزدوجة لتوليد الكهرباء

عبد العظيم محمد الخضراوي [*1] ، حسان حسين عريبي [2] ، محمد البشير محمد الدخيلي [3]
[1] قسم الهندسة الطبية، كليه التقنية الطبية، جامعه الزاوية، الزاوية، ليبيا
[3،2] طالب بقسم الإدارة الهندسية، المعهد العالي لعلوم البترول والغاز الطبيعي، الزاوية، ليبيا

[*]Corresponding author: a.hadi@zu.edu.ly

Received: October 25, 2025	Accepted: January 04, 2026	Published: January 18, 2026

Abstract

This study aims to examine the decline in operational efficiency and its impact on the production capacity of the Zawia Combined Power Station by evaluating the actual performance of one gas turbine unit. The methodology was based on collecting operational data from the daily control room reports over a six-month period (from January 16 to June 16, 2023), followed by analysis using standard equations for estimating efficiency and production capacity.

The results indicated that the average efficiency during the study period was 27.5%, compared to the design efficiency of 35%, representing a decrease of 7.5%. This decline was reflected in the generated power, which dropped from 165 MW to approximately 127 MW, resulting in a deficit of 38 MW per hour per unit and a daily deficit of around 912 MWh over 24 hours of operation for each unit. When these findings are extrapolated to all six units of the station, the total loss in production capacity is estimated at approximately 5,472 MWh per 24-hour operational cycle, representing a significant loss at the power generation system level.

The main causes of this decline include non-compliance with the preventive maintenance schedule, unavailability of original spare parts, and issues within the national grid such as frequency fluctuations and synchronization problems. The results also revealed that the type of fuel used has a noticeable effect on performance; thermal efficiency was higher when operating the turbines with natural gas compared to liquid fuel, with a difference of 4.5%.

The study concludes with a recommendation to improve maintenance programs and ensure the availability of appropriate spare parts. It also emphasizes the need for future studies on the impact of operational factors and fuel types on efficiency, in order to enhance the station's reliability and reduce future deficits in production capacity.

Keywords: Zawia Combined, Cycle, Power Generation, Combined Cycle, Operational Efficiency, Natural Gas.

الملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة انخفاض الكفاءة التشغيلية وآثارها على القدرة الإنتاجية بمحطة الزاوية المزدوجة لتوليد الكهرباء، وذلك من خلال تقييم الأداء الفعلي لإحدى وحدات التوربين الغازي. اعتمدت المنهجية على جمع البيانات التشغيلية من التقارير اليومية لغرفة التحكم خلال فترة ستة أشهر (من 16 يناير إلى 16 يونيو 2023)، ثم تحليلها باستخدام المعادلات الحسابية الخاصة بتقدير الكفاءة والقدرة الإنتاجية .

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

أظهرت النتائج أن متوسط الكفاءة خلال فترة الدراسة بلغ (27.5%) مقارنة بالكفاءة التصميمية البالغة (35%) أي بانخفاض قدره (7.5%). وقد انعكس ذلك على القدرة المنتجة حيث تراجعت من (165 MW) إلى نحو (127 MW) مما أدى إلى عجز(38MW) لكل وحدة و عجز يومي يقارب (912 MWh)خلال 24 ساعة عمل لكل وحدة. وعند إسقاط هذه النتائج على جميع الوحدات الست بالمحطة يتبين أن إجمالي الفاقد في القدرة الإنتاجية يبلغ حوالي (5472 MWh) خلال 24 ساعة, تشغيلية وهو ما يمثل خسارة كبيرة على مستوى منظومة التوليد.
وتعود أبرز أسباب هذا التراجع إلى عدم الالتزام بجدول الصيانة الدورية و عدم توفر قطع الغيار الأصلية، إضافةً إلى مشاكل في الشبكة العامة مثل تذبذب التردد وعمليات المزامنة. كما أظهرت النتائج أن نوع الوقود المستعمل يؤثر بشكل واضح في الأداء، حيث كانت الكفاءة الحرارية أعلى عند تشغيل التوربينات بالغاز مقارنة بالوقود السائل بنسبة فرق بلغت 4.5%.
وتخلص الدراسة إلى ضرورة تحسين برامج الصيانة وتوفير قطع الغيار المناسبة، إضافة إلى إجراء دراسات مستقبلية حول تأثير العوامل التشغيلية ونوعية الوقود على الكفاءة بما يعزز موثوقية المحطة ويقلل من العجز المستقبلي في القدرة الإنتاجية.

الكلمات المفتاحية: توليد الكهرباء، محطة الزاوية المزدوجة، دورة مركبة، الغاز الطبيعي، كفاءة، التشغيل.

1.المقدمة

تُعَدّ الكهرباء أحد أهم مقومات الحياة العصرية وعنصراً أساسياً في دعم الأنشطة الاقتصادية والاجتماعية، إذ تعتمد مختلف القطاعات الصناعية والخدمية على توافرها بشكل مستمر وموثوق [1]. وفي ليبيا شهد قطاع الكهرباء خلال العقد الأخير تراجعاً ملحوظاً في قدرته على تلبية الطلب المتزايد على الطاقة نتيجة قدم البنية التحتية وتذبذب الكفاءة التشغيلية للمحطات القائمة، الأمر الذي أدى إلى اتساع الفجوة بين القدرة الإنتاجية الفعلية والطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية [3,9]. فعلى الرغم من وجود عدد كبير من محطات التوليد المنتشرة في مختلف المناطق بطاقة تصميمية كبيرة إلا أن معظمها لا يعمل بكامل طاقته بسبب مشكلات تقنية وتشغيلية مرتبطة بالصيانة وعدم توفر قطع الغيار المناسبة [4,3]. وتشير الإحصاءات إلى أن إنتاج الكهرباء في ليبيا خلال صيف 2020 لم يتجاوز 3,800 ميغاوات مقابل ذروة طلب بلغت نحو 7,500 ميغاوات، ما أدى إلى انقطاعات يومية طويلة في التيار الكهربائي تجاوزت 18 ساعة في بعض المناطق[7].
وتُعتبر المحطات المزدوجة للتوليد التي تجمع بين وحدات التوربين الغازي والبخاري في دورة مركبة من أبرز الحلول التقنية التي تسهم في رفع كفاءة استغلال الطاقة وتقليل الفاقد الحراري، حيث يُستفاد من حرارة غازات العادم الناتجة عن التوربينات الغازية في إنتاج البخار اللازم لتشغيل التوربينات البخارية، مما يزيد من إجمالي القدرة المنتجة ويعزز موثوقية الشبكة الكهربائية [8,2]. إن المحافظة على الكفاءة التصميمية لهذه المحطات تمثل عاملاً محورياً في ضمان أقصى إنتاج ممكن من وحدات التوليد، إذ أن أي انخفاض في الكفاءة التشغيلية يؤدي إلى فقدان كميات كبيرة من الطاقة وزيادة العجز اليومي في الشبكة، بينما المحافظة على الكفاءة التصميمية تسهم في تقليل الفاقد وخفض تكاليف التشغيل [8,6].
وقد تناولت دراسات عديدة هذا الجانب حيث ركزت البحوث المبكرة على إبراز أهمية الدورات المركبة في رفع الكفاءة الحرارية وتقليل استهلاك الوقود مقارنة بالدورات البسيطة [1,2]) كما بينت أن المحافظة على الكفاءة التصميمية شرط أساسي لضمان الاستفادة القصوى من القدرات المتاحة. وفي مرحلة لاحقة أظهرت دراسات أخرى أن تدهور أداء التوربينات الغازية نتيجة تراكم الملوثات وتآكل الشفرات والتأخير في الصيانة الدورية يؤدي إلى انخفاض ملموس في الكفاءة وتراجع القدرة المنتجة على مستوى المحطة بأكملها [6]. كما أكدت أبحاث حديثة على العلاقة المباشرة بين انتظام الصيانة وتوفر قطع الغيار وبين تقليل الفاقد وتحسين الاعتمادية [4,3]، وأوضحت أن غياب الصيانة المخططة يضاعف من الخسائر اليومية في القدرة المنتجة.
وفي سياق متصل، أظهرت نتائج معاصرة أن نوع الوقود المستخدم يمثل عاملاً مؤثراً في الأداء، حيث تحقق المحطات كفاءة حرارية أعلى عند التشغيل بالغاز الطبيعي مقارنة بالوقود السائل [9,8]) وهو ما يعزز أهمية استقرار نوعية الوقود لضمان بقاء الأداء قريباً من القيم التصميمية. كما اقترحت بعض الأبحاث اعتماد استراتيجيات صيانة تنبؤية تعتمد على تحليل البيانات الفورية لمؤشرات التشغيل، وهو ما يتيح التدخل المبكر ويقلل من التوقفات غير المخطط لها ويعزز موثوقية منظومة التوليد [6].
وفي هذا السياق تبرز محطة الزاوية المزدوجة لتوليد الكهرباء كإحدى أكبر المحطات العاملة في ليبيا وأكثرها أهمية في تغطية الطلب المحلي [3]. تتكون المحطة من عدة وحدات غازية وبخارية تعمل بنظام الدورة المركبة، حيث تصل كفاءة التوربينات عند التشغيل بالدورة البسيطة إلى نحو 33% وترتفع إلى حوالي 36% عند التشغيل بالدورة المركبة. وتبلغ القدرة المنتجة للوحدة الغازية الواحدة 165 ميغاوات عند تشغيلها بالغاز الطبيعي، مما يجعلها ركيزة أساسية في دعم استقرار الشبكة الكهربائية. وقد مرت المحطة بمراحل تطوير مهمة منذ إنشائها، حيث أُنشأت أربع وحدات غازية عام 2000 بقدرة إجمالية بلغت 600 ميغاوات بكفاءة تصميمية 35% ثم أضيفت وحدات أخرى عام 2005 بقدرة إضافية بلغت 330 ميغاوات [3].
ومع ذلك تواجه المحطة تحديات تشغيلية وصعوبات في المحافظة على كفاءتها التصميمية نتيجة عوامل متعددة تشمل التأخير في تنفيذ العمرات السنوية وعدم استكمال الصيانة الدورية بشكل صحيح، إضافة إلى تقادم بعض المعدات وعدم توفر قطع الغيار الأصلية [4,3]. كما أن هناك عوامل خارجية مرتبطة بالشبكة العامة مثل التذبذب في التردد وعمليات المزامنة تؤثر سلباً في الأداء العام. وقد لوحظ أن بعض التوربينات انخفضت كفاءتها التشغيلية بما يصل إلى 13% مما أدى إلى تراجع القدرة المنتجة من 165 ميغاوات إلى حوالي 123 ميغاوات.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ومن هنا تنبع أهمية هذه الدراسة التي تهدف إلى تحليل أسباب انخفاض الكفاءة التشغيلية في محطة الزاوية المزدوجة وتقدير حجم الفاقد في القدرة الإنتاجية إلى جانب دراسة أثر العوامل التشغيلية ونوعية الوقود على الأداء. وتسعى الدراسة إلى تقديم توصيات عملية من شأنها تحسين برامج الصيانة و توفير قطع الغيار المناسبة و ضمان استمرارية التشغيل بالكفاءة التصميمية بما يسهم في رفع القدرة الإنتاجية وتقليل الفاقد، وهو ما يشكل خطوة أساسية نحو تعزيز موثوقية المنظومة الكهربائية في ليبيا وتلبية الطلب المتزايد على الطاقة بأقل التكاليف.

2. الدارسات السابقة

تشير الدراسات المبكرة إلى الميزات الأساسية للمحطات المزدوجة (الدورة المركبة) من حيث الكفاءة العالية وإمكانية استرجاع حرارة العادم لرفع الإنتاجية مقارنة بالدورات المفردة، وهو ما يجعل التشغيل عند الكفاءة التصميمية عاملاً حاسماً لتحقيق أقصى قدرة منتجة وتقليل الفاقد الحراري [2,1] .

بيّنت دراسة لاحقة آليات تدهور أداء التوربينات الغازية وتأثيرها على إنتاجية المحطات، موضحة أن تراكم الملوثات على الضاغط وتآكل الشفرات وزيادة فجوات الأطراف يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في الكفاءة الحرارية ونقص في القدرة الكهربائية للمحطة قد يصل إلى عشرات النسب المئوية عند الإهمال الطويل الأمد، وأن تدهور أداء التوربين ينعكس سلباً على منظومة الدورة المركبة بأكملها [8,6] .

في دراسة أُجريت عام 2018 ركز الباحثون على العلاقة بين ممارسات الصيانة وتوفر قطع الغيار ومدى بقاء المحطات قريبة من كفاءتها التصميمية، فتبين أن عدم الالتزام بخطط الصيانة الصادرة عن المصنعين أو نقص قطع الغيار يؤدي إلى زيادة زمن التعطل وتفاقم خسائر الإنتاج، بينما تقترح نماذج تحسين جداول الصيانة وإدارة مخزون قطع الغيار تقليل الفاقد وتحسين الموثوقية التشغيلية [6] ، كما تناولت دراسة في 2019 أثر نوع الوقود على كفاءة التوربينات، و خلصت إلى أن خصائص الوقود والاحتراق تؤثر بشكل ملموس على الكفاءة الحرارية والانبعاثات، حيث أظهرت النتائج أن التشغيل بالغاز الطبيعي يحقق كفاءة حرارية أعلى من التشغيل بوقود سائل خفيف في الظروف نفسها [9,8].

حللت دراسة عام 2020 أثر تقنيات المراقبة الفورية للأداء (online monitoring) على استقرار الكفاءة، وأثبتت أن تطبيق أنظمة الاستشعار وتحليل البيانات المستمرة يقلل من التدهور غير المرصود ويحافظ على القيم التصميمية للكفاءة لفترات أطول [4]. أظهرت دراسة أخرى في 2021 أن استراتيجيات الصيانة التنبؤية (predictive maintenance) القائمة على التحليلات البيانية قادرة على تقليل التوقفات المفاجئة بما يعادل 15–20% مقارنة بالجدولة التقليدية، ما يرفع كفاءة التشغيل ويقلل الفاقد في القدرة الإنتاجية [4].

في عام 2022 ركزت دراسة على تأثير تقادم المعدات (aging) وعمليات الإحلال الجزئي للمكوّنات على بقاء الكفاءة قريبة من قيمتها التصميمية، وأوصت بوضع برامج إحلال تدريجي للمعدات الحساسة لتقليل الفاقد في القدرة الإنتاجية على المدى الطويل [4,6,3] .

وأخيراً، قدّمت دراسة حديثة في 2023 مراجعة شاملة لبرامج تحسين كفاءة المحطات المزدوجة في الدول النامية، وأكدت أن الجمع بين مراقبة الأداء المباشرة و توفر قطع الغيار و استراتيجيات الصيانة المبنية على البيانات هو السبيل الأمثل للحفاظ على الكفاءة التصميمية وتقليل الفاقد في محطات التوليد بالدورة المركبة [9,8,6,4].

3.المنهجية

اعتمدت هذه الدراسة على منهجية عملية وتحليلية من خلال جمع البيانات التشغيلية الخاصة بمحطة الزاوية المزدوجة لتوليد الكهرباء من التقارير اليومية الصادرة عن قسم التشغيل والتحكم خلال فترة ستة أشهر (من 16 يناير إلى 16 يونيو 2023). تم تحليل هذه البيانات باستخدام المعادلات الحسابية المعتمدة في حساب الكفاءة الحرارية والقدرة الإنتاجية للتوربينات الغازية، مع مقارنة النتائج بالقيم التصميمية للوحدات لتحديد حجم الانخفاض في الكفاءة وآثرها على القدرة المنتجة. وقد استُكملت المنهجية بمراجعة الدراسات العلمية ذات الصلة لربط النتائج العملية بالسياق النظري وتحقيق موثوقية أكبر للنتائج [10].

4. قطاع الكهرباء في ليبيا:

شهد قطاع الكهرباء في ليبيا تطوراً تدريجياً منذ بداياته الأولى عام 1923، حين أُنشأت أول محطة توليد كهرباء في مدينة طرابلس في موقع فندق كورنتيا الحالي. ومع مرور العقود توسّعت قدرات التوليد لمواكبة النمو السكاني والاقتصادي المتزايد. وتُعدّ محطة كهرباء غرب طرابلس واحدة من أقدم وأهم المحطات البخارية في البلاد، إذ بدأ تشغيل مرحلتها الأولى عام 1976 بقدرة خمس وحدات يبلغ إنتاج كل منها نحو 65 ميغاوات. وعلى الرغم من قدم تجهيزاتها ما زالت هذه المحطة تعمل ضمن الشبكة العامة وتساهم بفاعلية في تلبية جزء من الطلب الوطني على الطاقة. ويُبرز استمرار تشغيلها الحاجة إلى استثمارات جديدة لتحديث البنية التحتية ورفع الكفاءة التشغيلية لمواجهة الطلب المتزايد على الكهرباء في ليبيا[11].

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الشكل (1) محطات توليد الكهرباء في ليبيا والانخفاض في القدرة الانتاجية [12]

تُظهر الصورة في الشكل رقم (1) فرقاً كبيراً بين القدرة الكاملة للمحطات الكهربائية في ليبيا (باللون الأصفر) والإنتاج الفعلي (باللون الأزرق)، إذ لا يتجاوز إجمالي الإنتاج الحالي نحو 4351 ميغاوات من أصل قدرة تصميمية تقارب 10020 ميغاوات, هذا التراجع يعود أساساً إلى ضعف برامج الصيانة الدورية وغياب توفير قطع الغيار الأصلية اللازمة لاستمرارية التشغيل كما يسهم النقص في الكفاءات الفنية والإدارية لدى الشركة العامة للكهرباء في إطالة فترات الأعطال وتعطّل العديد من الوحدات إضافةً إلى ذلك يتسبب سوء التخطيط وغياب استراتيجيات الصيانة الاستباقية في تفاقم فقد القدرة المنتجة. ونتيجة لهذه العوامل مجتمعة تعاني الشبكة من عجز مزمن يحدّ من تلبية الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية في البلاد[12].

الجدول رقم (1) أهم محطات توليد الكهرباء في ليبيا[20]

Name	English Name	Operator	Output	Source
محطة توليد شمال بنغازي البخارية	Benghazi North CCGT Power Plant	General Electricity Company of Libya (GECOL)	1,735 MW	gas
محطة الخمس الغازية	Khoms Power Plant	-	1,658 MW	gas
Zawia CCGT Power Plant	-	General Electricity Company of Libya (GECOL)	1,490 MW	gas
محطة الرويسات الكهربائية	Western Mountain OCGT Power Plant	GEC	936 MW	gas
Sareer Gas Turbine Power Plant	-	-	855 MW	oil
محطة كهرباء الزويتينة الغازية	Zwitina Power Plant	Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT)	770 MW	gas
محطة كهرباء مصراته للدورة المزدوجة	Misurata Power Plant	General Electricity Company of Libya الشركة العامة للكهرباء	750 MW	gas
محطه توليد الكهرباء غرب طرابلس	Tripoli West Power Station	General Electricity Company of Libya الشركة العامة للكهرباء	677 MW	oil

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Name	English Name	Operator	Output	Source
محطة اوباري الغازية لتوليد الكهرباء	Awbari Power Plant	General Electricity Company of Libya الشركة العامة للكهرباء	640 MW	oil
محطة جنوب طرابلس الغازية لتوليد الكهرباء	Tripoli South OCGT Power Plant	General Electricity Company of Libya الشركة العامة للكهرباء	594 MW	gas
LISCO Power Plant	-	General Electricity Company of Libya الشركة العامة للكهرباء	507 MW	gas

يعرض الجدول رقم (1) أهم محطات توليد الكهرباء في ليبيا مع بيانات أساسية عن اسم المحطة بالعربية والإنجليزية، والجهة المشغّلة، ونوع الوقود المستخدم، وطريقة التوليد. يتبيّن من الأرقام أنّ محطتي شمال بنغازي والخمس تعدّان الأكبر من حيث القدرة التصميمية، إذ تتجاوز قدرتهما 1.6 جيجاوات لكل منهما، بينما تتراوح قدرات باقي المحطات بين بضع مئات من الميجاوات. كما يوضّح الجدول تنوّع مصادر الوقود بين الغاز الطبيعي، والنفط، والديزل، ما يعكس اعتماد المنظومة الكهربائية الليبية بشكل رئيس على الوقود الأحفوري. وتبرز الشركة العامة للكهرباء (GECOL) بوصفها المشغّل الرئيسي لمعظم هذه المحطات، ما يدل على مركزية إدارتها لقطاع التوليد. تكشف هذه البيانات في مجملها عن بنية توليد تقليدية تحتاج إلى تعزيز الصيانة وتوسيع مصادر الطاقة لمواكبة الطلب المتزايد على الكهرباء في البلاد.

5. محطة الزاوية المزدوجة لتوليد الكهرباء:

تُعد من أكبر محطات إنتاج الطاقة الكهربائية في ليبيا، وتقع في مدينة الزاوية غرب البلاد. تعمل المحطة بنظام الدورة المركبة حيث تُستخدم التوربينات الغازية لتشغيل توربينات بخارية بواسطة حرارة غازات العادم، ما يرفع كفاءة التوليد مقارنة بالدورة البسيطة. تم تنفيذ المحطة على مرحلتين بدءًا من أواخر التسعينات، وتستعمل في تشغيلها الغاز الطبيعي كوقود أساسي مع إمكانية استخدام الوقود السائل عند الحاجة. تسهم هذه المحطة في تغطية جزء كبير من الطلب على الكهرباء في المنطقة الغربية من ليبيا وتشكل عنصرًا حيويًا لاستقرار الشبكة العامة. [13]

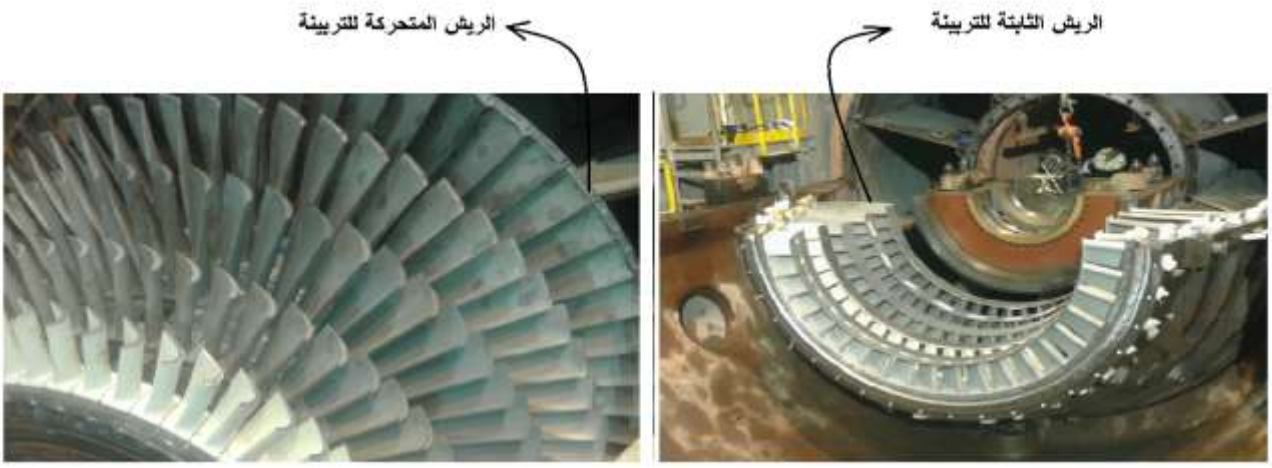
1.5 المكونات الرئيسية للتوربينة الغازية في محطة الزاوية

1. ضاغط التدفق المحوري:

يتكون الضغط من (21) مرحلة كل مرحلة تحتوي ريشة ثابتة ومتحركة حيث يعتبر ضاغط التدفق المحوري جزء أساسي من مكونات التوربينات الغازية ويسمي الضاغط التدفق المحوري بهذا الاسم لأن المائع يدخل إلى الضاغط ويغادره بشكل محوري وتوجد في بداية الضاغط ريش لتوجيه الهواء المتغير وذلك لتوجيه الهواء المسحوب والتحكم في كميته ووظيفة ضاغط التدفق المحوري توفير الهواء اللازم لعملية الحرق ولهواء التبريد لأجزاء التوربينة ويتكون الضاغط من عدة مراحل من الريش الثابتة والمتحركة والغطاء السفلي وريش توجيه الهواء [14] .

2. غرفة الاحتراق:

وتحتوي التوربينة الغازية على غرفة احتراق حلقية واحدة يتم فيها الاشتعال وحرق الوقود من خلال فتحة رئيسية وهي مجهزة بعدد (72) حارق من حوارق البيئة ذات مخروط مزدوج ومركبة في صفين متحدة المركز حول الجسم، في الاحتراق يتم تحويل الطاقة الكيميائية للوقود إلى طاقة حرارية في صورة غازات ساخنة ذات درجات حرارة عالية جدا حيث يتم إجراء الاحتراق في ثبوت الضغط. [15]



الشكل (2) يبين ريش التربينة في محطة الزاوية المزدوجة [3]

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

2.5 . البرامج والأنظمة المساعدة في التوربينة الغازية:

1- نظام دخول الهواء	2- نظام زيت التزييت
3- نظام التبريد بالماء	4- نظام التبريد بالهواء
5. نظام الوقود السائل	6 - نظام الوقود الغازي
7-نظام بادي الاشتعال	8- نظام زيت القدرة
9- نظام الدوراني للعمود	10- نظام العادم

6 . آلية عمل محطة كهرباء الزاوية المزدوجة

تعمل محطة كهرباء الزاوية المزدوجة وفق تقنية الدورة المركبة التي تجمع بين التوربينات الغازية والبخارية لتحقيق أعلى مستوى من كفاءة التحويل الحراري إلى كهرباء. تبدأ العملية بحرق الغاز الطبيعي في حجرات الاحتراق الخاصة بكل توربينة غازية، حيث ترتفع درجة حرارة الغازات الناتجة لتدير ريش التوربينات الغازية بسرعة عالية فينتج عن ذلك طاقة ميكانيكية تُحوَّل مباشرة إلى طاقة كهربائية بواسطة المولدات المقترنة. يتدفق العادم الخارج من هذه التوربينات بدرجة حرارة مرتفعة تتجاوز عادة 500 C° و هو ما يجعله مصدراً ممتازاً للطاقة الحرارية غير المستغلة. بدلاً من إطلاق هذا العادم إلى الجو، يُوجَّه إلى **مولدات البخار لاسترجاع الحرارة (HRSG) ، حيث يُستخدم لتسخين مياه التغذية وتحويلها إلى بخار مُحمَّص بضغط ودرجة حرارة مرتفعين. هذا البخار يتجه إلى التوربينات البخارية التي تحوّل طاقته الحرارية إلى طاقة ميكانيكية إضافية تُحوَّل بدورها إلى كهرباء عبر المولدات المتصلة بها. يضم المجمع ست توربينات غازية تغذي كل مجموعتين منها توربينة بخارية واحدة بحيث تنتج كل توربينة غازية قدرة كهربائية تتراوح بين 150 و160 ميغاوات. أما التوربينات البخارية فيمكنها توليد نحو 70 ميغاواط عند تشغيلها بواسطة مولد بخار واحد، وترتفع قدرتها إلى ما يقارب 130 ميغاوات عند تغذيتها ببخار قادم من مولدين. بهذه الطريقة يجري استغلال طاقة الوقود مرتين: أولاً عبر الدورة الغازية ثم عبر الدورة البخارية، ما يزيد من الكفاءة الحرارية الكلية ويقلل من انبعاثات الملوثات مقارنة بالمحطات التقليدية ذات الدورة المفردة. في بداية التشغيل يُدار المولد بواسطة بادئ الحركة (Starter)الذي يسحب الكهرباء من الشبكة لتدوير العمود حتى يصل إلى السرعة المطلوبة، ثم تعتمد التوربينة على طاقتها الذاتية لتغذية نفسها بالكهرباء. تعمل التوربينة الغازية بوقود غازي مثل الغاز الطبيعي القادم من شركة مليتة أو بوقود خفيف كالنافطة، بينما تستفيد التوربينة البخارية من الحرارة المتبقية من التوربينة الغازية، ولهذا تُسمى المحطة «مزدوجة الدورة»[3].

7. التوربينات البخارية محطة مزدوجة الدورة

في محطة الزاوية المزدوجة تتصل التوربينة البخارية بمولد كهربائي لكنها لا تحتوي على ضاغط لأن وسيط العمل فيها هو البخار الناتج من عادم التوربينات الغازية حيث يُستغل هذا العادم في غلايات استرجاع الحرارة لإنتاج بخار عالي الضغط ودرجة الحرارة يقوم بتدوير شفرات التوربينة لتوليد الطاقة الميكانيكية التي يحولها المولد إلى كهرباء. وتُستخدم في دورتها مياه معالجة بدقة ذات نقاء عالٍ وخالية من الأملاح والمواد الصلبة لتفادي التآكل والترسبات، وتدار هذه المياه في حلقة تكاثف مغلقة عبر المكثف ومضخات التغذية. وكلما ارتفع إنتاج التوربينات الغازية ازداد البخار المتولد في غلايات الاسترجاع مما يرفع قدرة التوربينة البخارية على توليد الكهرباء ضمن حدود التصميم الهندسي للمحطة[22].

8. المحولات الخاصة بالغازية step up

في محطة الزاوية المزدوجة تُرفع قدرة الجهد الكهربائي الصادر من المولدات عبر محولات رافعة (Step-up Transformers) إذ يخرج جهد المولد الخاص بالتوربينات الغازية عند نحو 15.7 كيلوفولت ليدخل إلى المحولات ويُرفع إلى حوالي 220 كيلوفولت، بينما يخرج جهد مولد التوربينة البخارية عند نحو 13.7 كيلوفولت ويُرفع إلى حوالي 400 كيلوفولت. تتميّز التوربينة البخارية في المحطة بأن جهدها بعد التحويل أعلى من جهد التوربينات الغازية. كما يتأثر إنتاج التوربينات الغازية والبخارية معًا بعوامل الطقس، فكلما انخفضت درجة حرارة الهواء الخارجي وبلغت الرطوبة النسبية نحو 70–75% يتحسّن الأداء ويزداد إنتاج الطاقة الكهربائية، وقد سجّلت التوربينات في أفضل الظروف إنتاجًا وصل إلى نحو 182 ميغاوات [23].

9 . إيجاد الكفاءة الحرارية للتوربينات

من خلال الدراسة الميدانية لمحطة كهرباء الزاوية تمكنا من معرفة الأسلوب والطريقة المتبعة لحساب الكفاءة الحرارية عندما تعمل الوحدة الغازية بالوقود الغازي وبالوقود السائل الخفيف، حيث أفادنا قسم الكفاءة بالمحطة أن المعادلة المستخدمة للكفاءة الحرارية عندما تعمل الوحدة بالوقود السائل الخفيف هي:

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

معادلة حساب الكفاءة الحرارية للتوربين الغازي في محطة الزاوية المزدوجة خلال فصل الشتاء.

معادلة رقم (1)----------→ $\eta_{th}=\frac{(W_{net}-W_{cons})*3600*1000}{M_{f*LHV*\rho_f}}$ [19]

الجدول رقم (2) البيانات المدخلة لمعادلة حساب الكفاء لتوربين الغازي في محطة الزاوية المزدوجة[9]

المتغير	القيمة	الوحدة
درجة الحرارة الهواء الجوي	17	°C
الطاقة المنتجة خلال 24 ساعة net.W	3130	MWh
صافي القدرة المستهلكة لهذه التوربين. W_cons	15	MWh
حجم الوقود السائل V .f	938	m³
كثافة الوقود السائل (نافتة وقود خفيف) f.ρ	850.5	kg/m³
القيمة الحرارية للوقود السائل الخفيفLHV	42710	kJ/kg

1.9 . خطوات حساب الكفاءة :

- صافي الطاقة المنتجة المستخدمة في الحساب:

W_usable = W_net - W_cons = 3130 - 15 = 3115 MWh

- تحويل MWh إلى:kJ

1 MWh = 3.6 × 10^6 kJ

E_out = 3115 × 3.6×10^6 = 1.1214 × 10^10 kJ

- تحويل حجم الوقود إلى كتلة:

m_f = V_f × ρ_f = 938 × 850.5 = 797,769 kg

- الطاقة الداخلة من الوقود:

E_in = m_f × LHV = 797,769 × 42,710 = 3.4073 × 10^10 kJ

- حساب الكفاءة الحرارية [19].

الكفاءة الحرارية $\eta_{th} = \frac{E.out}{E.in} \times 100 = \%.$ $\eta_{th} = \frac{1.1214 \times 10^{10}}{(3.4073 \times 10^{10})} \times 100 = 32.9\%$

وكانت النتيجة رقم 1: - الكفاءة% 32.9 لإحدى التوربينات الغازية *GT12*

10. إيجاد الكفاءة الحرارية لتوربين لفصل الصيف :

تم تجميع البيانات التالية من محطة كهرباء الزاوية في يوم عمل في إحدى أيام الصيف وتم اختيار إحدى التوربينات الغازية التي تشتغل بالوقود السائل الخفيف.

الجدول رقم (3) يوضح بيانات حساب الكفاء لتوربين الغازي في محطة الزاوية المزدوجة في فصل الصيف[9]

المتغير لتوربين(GT12)	القيمة	الوحدة
درجة الحرارة الهواء الجوي	37	°C
الطاقة المنتجة خلال 24 ساعة. net W	1334	MWh
صافي القدرة المستهلكة لهذه التوربين. W.cons	20	MWh
حجم الوقود السائل V .f	585	m³
كثافة الوقود السائل (نافتة وقود خفيف)ρ.f	850.5	kg/m³
القيمة الحرارية للوقود السائل الخفيفLHV	42710	kJ/kg

1.10. خطوات الحساب الكفياءة :

- صافي الطاقة المنتجة:

W_usable = W_net - W_cons = 1334 - 20 = 1314 MWh

- تحويل MWh إلى:kJ

1 MWh = 3.6 × 10^6 kJ

E_out = 1314 × 3.6×10^6 = 4.7304 × 10^9 kJ

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

- كتلة الوقود:

$$m_f = V_f \times \rho_f = 585 \times 850.5 = 497{,}542.5 \text{ kg}$$

- الطاقة الداخلة من الوقود:

$$E_in = m_f \times LHV = 497{,}542.5 \times 42{,}710 = 2.1250 \times 10\text{^}10 \text{ kJ}$$

الكفاءة الحرارية $\eta_{th} = \frac{E.out}{E.in} \times 100 = \%$. $\eta_{th} = \frac{2.1250 \times 10\text{^}10\ kJ}{(4.7304 \times 10\text{^}9 \text{ kJ})} \times 100 = \approx 22.26\%$

النتيجة 2: - الكفاءة 22.3% لتوربين الغازي (GT12) في فصل خلال فصل الصيف.

من النتيجة السابقة في (1) والتي كانت نتيجة الكفاءة % 32.9 وكدلك من النتيجة (2) والتي كانت فيه الكفاءة 22.3% نلاحظ مقدار التغير في الكفاءة للتربين وباستخدام المتوسط الحسابي للنتيجتين نجد أن قيمة متوسط الكفاءة لمحطة كهرباء الزاوية المزدوجة تساوي: -

النتيجة 3 :- % 27.6 =22.3+32.9)/2) متوسط الكفاءة لتوربين الغازي (GT12) خلال السنة .

ومن خلال النتيجة (3) يكون مقدار متوسط الانخفاض في الكفاءة بمحطة كهرباء الزاوية المزدوجة عن الكفاءة التصميمة للشركة المصنعة والتي تساوي (35%)

النتيجة 4: - 7.4% =35-27.6 مقدار الانخفاض في الكفاءة التشغيلية عن الكفاءة التصميمية لتوربين الغازي (GT12).

أي أن متوسط الكفاءة الإنتاجية للوحدة GT12 خلال السنة (27.6%) وهذا يؤدي إلى انخفاض في القدرة الإنتاجية للوحدة من(165 MW إلى 127 MW) وسوف يعمل هذا الانخفاض في الكفاءة حدوث عجز في القدرة المنتجة للوحدة بمقدار (912 MWh) لكل يوم عمل للوحدة GT12.

10. 2. ايجاد الكفاءة من خلال البيانات لغرفة التشغيل

وبعد معرفة مقدار الانخفاض في الكفاءة باستخدام الطرق النظرية والحسابية سوف نقوم بإيجاد الكفاءة للتربينات الغازية لمحطة الزاوية المزدوجة للكهرباء من خلال البيانات المسجلة لغرفة التحكم في المحطة بقسم التشغيل حيث تم الحصول على مجموعة من البيانات اليومية للمحطة ولقد تم اختيار مجموعة من البيانات اليومية لفترة 6 ايام من 6 أشهر بشكل عشوائي.

كما هو موضح في الجدول من (1 الي 6).

من جداول التقرير اليومية لعمل التوربين (GT12) في محطة كهرباء الزاوية المزدوجة، والتي سجلت بيانات الكفاءة الحرارية والتي كانت كما في الجدول رقم (4).

جدول رقم (4) الكفاءة المسجلة وإجمالي الطاقة المنتجة خلال ستة أشهر[9]

تاريخ عمل الوحدة (GT12)		الكفاء المسجلة للوحدة (GT12)	اجمالي الطاقة المنتجة (GT12)
الإثنين	- 2023/1/16	% 34	2868 MWh
الخميس	- 2023/2/16	% 27	2389 MWh
الخميس	- 2023/3/16	% 22	1427 MWh
الاحد	- 2023/4/16	% 26	1979 MWh
الثلاثاء	- 2023/5/16	% 28	2297 MWh
الجمعة	- 2023/6/16	% 28	2519 MWh

النتيجة (5)

- من البيانات في الجدول (4) وباستخدام المتوسط الحسابي نجد أن متوسط الكفاءة لتوربين (GT12) تساوي **(27.5%)**

النتيجة (6)

- بطرح قيمة الكفاءة التشغيلية (27.5 %) من الكفاءة التصميمة (35%) نجد أن:7.5%=35-27.5

وبمقارنة النتيجة (4) والتي كان فيه الانخفاض في الكفاءة المحسوبة باستخدام المعادلة (1) كانت نسبة الانخفاض في الكفاءة تساوي (7.6%) ومن النتيجة رقم (6) نجد أن الانخفاض في الكفاءة المحسوبة باستخدام التقارير اليومية المسجلة من غرفة التحكم لتوربين (GT12) والتي كانت (**7.5%**)من ذلك نجد أن النتيجتين متقاربتين جداً.

وبذلك ننتقل الي مناقشة النتائج والتعرف على أسباب الانخفاض في الكفاءة التشغيلية وآثار ذلك على القدرة الإنتاجية في المحطة وماهي التوصيات الواجب اتخاذه لمعالجة الانخفاض في الكفاءة.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

11. تحـليــل النــتائـــج

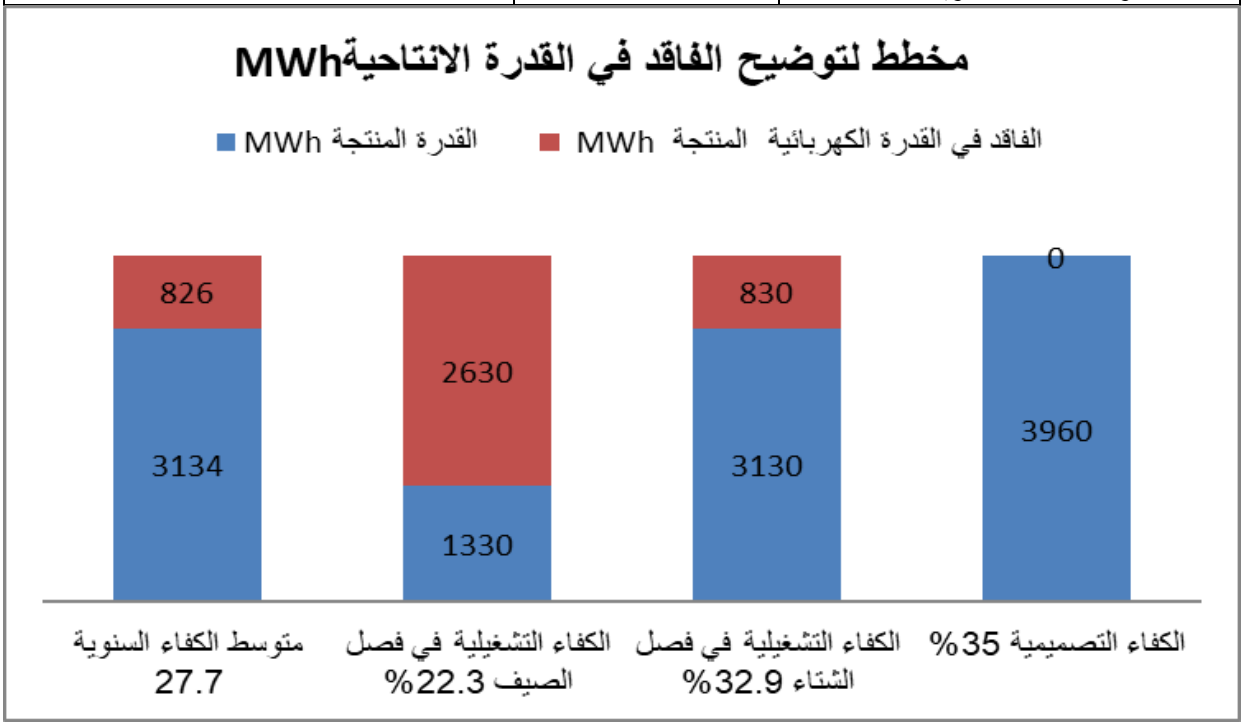
1.11. النتـــائج النظرية: -

بعد استكمال جميع الحسابات سواءً كانت النظرية أو العملية سوف نقوم بتمثيلها بيانياً لمناقشة النتائج المتحصل عليها، ويمكن تقسيم النتائج النهائية إلى قسمين: نتائج نظرية ونتائج عملية.

وقد كان إجمالي الحسابات النظرية للانخفاض في الكفاءة التي تم الوصول إليه باستخدام المعادلة رقم (1) في الجدول المبين ادناه .

جدول رقم (5) بيانات الكفاءة والفاقد في القدرة الكهربائية لمحطة الزاوية المزدوجة[9].

الكفاءة لتربين (GT12)	القدرة المنتجة MWh	الفاقد في القدرة الكهربائية المنتجة MWh
الكفاءة التصميمية 35%	3960	0
الكفاءة التشغيلية في فصل الشتاء 32.9%	3130	830
الكفاءة التشغيلية في فصل الصيف 22.3%	1330	2630
متوسط الكفاءة السنوية 27.7	3134	826



الشكل (3) لتوضيح الفقد في الكفاءة تشغليه لكل 24 ساعة لتوبين (GT12)

كل النتائج المتحصل عليها من الحسابات النظرية التي تم تجميعها في الجدول (5) تم تمثيلها في المخطط البياني الموضحة بالشكل (3)، وحيث يوضح الشكل مدى تأثير الانخفاض في الكفاءة حيث بلغ متوسط الانخفاض في القدرة الكهربائية المنتجة لكل يوم عمل لتوربين (GT12) بمقدار (826 MWh).

2.11. النتـــائج العملية: -

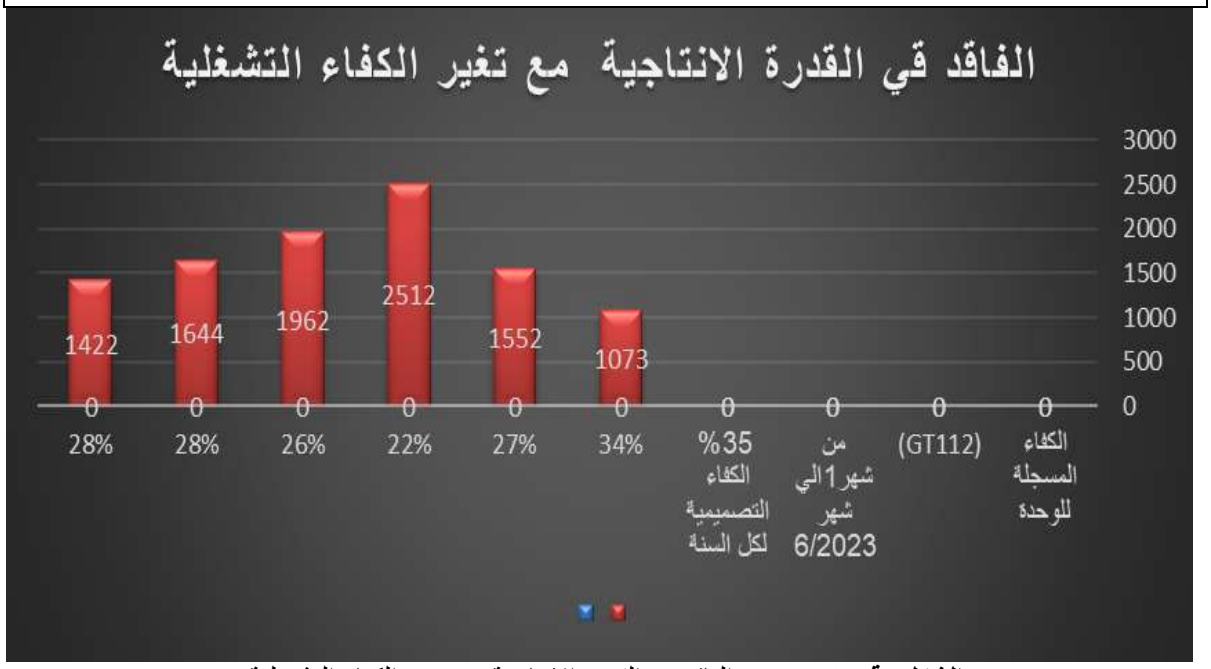
من خلال الحسابات العملية التي تم إجراؤها بمحطة كهرباء الزاوية المزدوجة ومن جداول التقارير اليومي لعمل التوربين الغازي (GT12)المدرجة في الجدول رقم (4) للكفاءة المسجلة وإجمالي الطاقة المنتجة خلال ستة أشهر لتوربين(GT12) كما تحصلنا على نتائج تم تجميعها في الجدول رقم (5) لبيانات الكفاءة والفاقد في القدرة الكهربائية لمحطة الزاوية المزدوجة, والتي تم توضيحها وتمثيلها في صورة مخططات بيانية حيث يوضح الشكل (3) العلاقة بين الكفاءة التشغيلية والقدرة المنتجة عملياً عند عمل التوربين. (GT12) بالكفاءة التصميمية (35%) والتي تنتج قدرة مقدارها (MWh 3941) مع الكفاءة التشغيلية لفترة ستة أشهر من يناير الى يونيو , حيث كان مقدار التغير في الكفاءة من 34% الي22 % .حيث كان اكبر فقد في القدرة الانتاجية عند انخفاض الكفاءة الي 22% في شهر مارس 2023 كم هوا في وضح في الشكل (3).

من خلال القرير اليومية لغرفة التحكم تم الحصول علي البيانات التي توضح الكفاءة التشغيلية وكدلك اجمالي الطاقة المنتجة وكدلك الفاقد في الطاقة الانتاجية خلال ستة اشهر كماء هوا مدرج في الجدول رقم (6) المبين ادناه.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الجدول رقم (6) يوضح كفاءة التوربين (GT12)، وإجمالي الطاقة المنتجة والفاقد في الطاقة خلال الفترة من شهر 1 إلى شهر 6 لسنة 2023

% الكفاءة المسجلة للوحدة	MW إجمالي الطاقة المنتجة كل يوم	MW الفاقد في الطاقة الإنتاجية
35% الكفاءة التصميمية	3941	0
% 34	2868	1073
% 27	2389	1552
% 22	1427	2512
% 26	1979	1962
% 28	2297	1644
% 28	2519	1422



الشكل رقم (4) يوضح الفاقد في القدرة الانتاجية مع تغير الكفاء التشغيلية

في الجدول (6) يوضح الفرق في الطاقة المنتجة مع تغير الكفاءة التشغيلية لتوبين وقد كان اكبر انخفاض في الكفاء 22% لتربين. **(GT12)** وكان الفرق بين اكبر واصغر كفاءة (34%:22%)بنسبة انخفاض 12% والذي إلى حدوث انخفاض في الطاقة المنتجة بمقدار (**2512**) MW لكل يوم عمل من القيمة الإنتاجية.
في الجدول التالي يوضح العلاقة بين التغير في الكفاءة للوحدة (GT12)والطاقة الكهربائية التي تستهلكها الوحدة خلال العمل وكذلك مقدار الوقود الخفيف المستهلك خلال عمل الوحدة (m³) خلال ستة أشهر من يناير الى يونيو.

الجدول رقم (7) يوضح مقدار الطاقة المستهلكة للوحدة والوقود المستهلك مع تغير الكفاءة للوحدة

الكفاءة المسجلة للوحدة (GT12)	إجمالي الطاقة المستهلكة للوحدة (GT12) MWh	استهلاك الوقود الخفيف بالمتر المكعب
34%	14 MWh	800 M³
27 %	13 MWh	820 M³
22 %	13 MWh	610 M³
26 %	14MWh	710 M³
28 %	13MWh	760 M³
28 %	14MWh	840 M³

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الشكل رقم (4) العلاقة بين الطاقة المستهلكة للوحدة والكفاءة للوحدة GT12

الشكل الموضح في (4) يشرح العلاقة بين استهلاك الطاقة الكهربائية للوحدة خلال العمل والكفاءة وكذلك مع كمية الوقود الخفيف المستهلك للوحدة (GT12)خلال العمل ومن قراءة الشكل (4) وكذلك الجدول (7) لا توجد أي علاقة واضحة لتغير الكفاءة% التشغيلية وكمية استهلك الوقود بالمتر المكعب المستهلك، والطاقة المستهلكة للوحدة MWh.

12. مناقشة النتائج

تكشف نتائج الدراسة عن انخفاض جوهري في الكفاءة التشغيلية للتوربينات الغازية بمحطة الزاوية المزدوجة لتوليد الكهرباء، إذ بلغ متوسط الكفاءة الفعلية خلال فترة الرصد ستة أشهر نحو 27.5% مقارنة بالكفاءة التصميمية البالغة 35%. هذا التراجع الذي يقدّر بحوالي 7.5% انعكس مباشرة على القدرة الإنتاجية للوحدة المدروسة(GT12) حيث هبط إنتاجها من نحو 165 ميغاوات إلى 127 ميغاوات، مسببًا عجزًا يقارب (38) ميغاوات/ ساعة لكل وحدة، ليكون اجمالي الفقد خلال24 ساعة عمل (912) ميغاوات. وعند إسقاط هذه الخسارة على الوحدات الست بالمحطة، يتبيّن فاقد إجمالي في حدود (5472) ميغاوات للوحدات (6) في 24 ساعة عمل للمحطة، وهو مقدار كبير يؤثر سلبًا في موثوقية الشبكة العامة ويزيد فجوة العجز الكهربائي في ليبيا.

وتشير المقارنة بين نتائج الحسابات النظرية والبيانات التشغيلية اليومية إلى درجة عالية من التطابق؛ إذ بلغ الفرق في نسب الانخفاض أقل من 0.1% ما يعزز مصداقية المنهجية الحسابية المتبعة ويؤكد دقة بيانات غرفة التحكم. يبرز كذلك أثر الظروف المناخية إذ سُجّلت أدنى كفاءة في أشهر الصيف (22.3%) مقارنة بالشتاء (32.9%) ما يدل على حساسية التوربينات لدرجة حرارة الهواء المحيط، وهي نتيجة متوافقة مع الدارسات السابقة حول تأثير الظروف البيئية في أداء التوربينات الغازية. أما من الناحية التشغيلية، فتعود أبرز أسباب الانخفاض إلى غياب الصيانة الدورية الفعالة ونقص قطع الغيار الأصلية، وهو ما يؤدي إلى تراكم الملوثات على شفرات التوربين وتآكلها، إضافةً إلى مشاكل في الشبكة العامة مثل تذبذب التردد وصعوبات المزامنة. ويُلاحظ أيضًا أن نوعية الوقود تلعب دورًا مهمًا، إذ تحقق التوربينات كفاءة حرارية أعلى عند التشغيل بالغاز الطبيعي مقارنة بالوقود السائل بنسبة فرق تصل إلى نحو 4.5% ما يؤكد ضرورة استقرار إمدادات الغاز كخيار وقود أساسي.

وتشير هذه النتائج إلى أن تحسين برامج الصيانة الوقائية والتنبؤية وضمان مخزون استراتيجي من قطع الغيار يمثلان شرطًا حاسمًا للحد من التدهور في الكفاءة واستعادة القدرة الإنتاجية المفقودة. كما أن تبني أنظمة مراقبة لحظية لأداء التوربينات سيمكن من الكشف المبكر عن الانحرافات ومعالجتها قبل تفاقمها. إن معالجة هذه التحديات مجتمعة إلى جانب تأمين إمداد وقود مستقر من شأنه أن يرفع موثوقية محطة الزاوية المزدوجة ويقلل من العجز الكهربائي الوطني بما ينعكس إيجابًا على استقرار المنظومة الكهربائية في ليبيا ودعم خطط التنمية الاقتصادية والاجتماعية.

13. الاستنتاجات

أظهرت الدراسة انخفاضاً ملحوظاً في الكفاءة التشغيلية لوحدات التوربينات الغازية بمحطة الزاوية المزدوجة، إذ بلغ متوسط الكفاءة 27.5% مقابل 35% تصميمية، ما أدى إلى تراجع القدرة الإنتاجية للوحدة من 165 إلى نحو 127 ميغاوات، بمقدار عجز (38) ميغاوات ساعة لكل وحدة وعجز، يومي يقارب (912) ميغاوات/ 24 ساعة لكل وحدة. وعند إسقاط النتائج على جميع وحدات المحطة الست يتضح فاقد إجمالي يناهز(5472) ميغاواطت خلال24 ساعة عمل لكل الواحدات وهو أثر اقتصادي وتشغيلي كبير على منظومة التوليد في ليبيا.

تعود أسباب هذا التراجع أساساً إلى ضعف الالتزام ببرامج الصيانة الدورية ونقص قطع الغيار الأصلية، إضافةً إلى مشاكل في الشبكة مثل تذبذب التردد وصعوبات المزامنة، مع ملاحظة تحسّن واضح عند تشغيل التوربينات بالغاز الطبيعي مقارنة بالوقود السائل. توصي الدراسة بضرورة تعزيز خطط الصيانة، وضمان توفير قطع الغيار، وتطوير استراتيجيات صيانة تنبؤية ومراقبة أداء لحظية، إلى جانب استقرار نوعية الوقود بما يرفع موثوقية المحطة ويحد من العجز المستقبلي في القدرة الإنتاجية.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

14. الخاتمة

تؤكد نتائج هذه الدراسة أنّ التراجع الواضح في كفاءة التشغيل بمحطة الزاوية المزدوجة يمثّل تحدياً حقيقياً لاستقرار منظومة الكهرباء في ليبيا، إذ يظهر الأثر السلبي لانخفاض الكفاءة على حجم الطاقة المنتجة بشكل يومي، وما يترتب على ذلك من خسائر اقتصادية وارتفاع في فجوة الطلب على الكهرباء. كما تكشف المعطيات أنّ أسباب القصور ليست فنية بحتة فحسب بل ترتبط أيضاً بضعف منظومة الصيانة وغياب التخطيط المسبق لتأمين قطع الغيار، فضلاً عن اضطرابات في الشبكة العامة. ومن شأن معالجة هذه الجوانب مجتمعة أن تسهم في رفع الاعتمادية وتحسين قدرة المحطة على تلبية احتياجات المستهلكين بكفاءة أعلى.

15. التوصيات

1. وضع وتنفيذ برنامج صيانة دورية صارم يشمل جميع وحدات التوربينات الغازية والبخارية.
2. توفير قطع الغيار الأصلية بشكل مستمر وبمخزون احتياطي كافٍ لتقليل زمن التوقف.
3. اعتماد أنظمة مراقبة وتشخيص لحظية للأداء لتحديد أي خلل مبكر والتعامل معه فوراً.
4. العمل على استقرار تزويد المحطة بالغاز الطبيعي باعتباره الوقود الأكثر كفاءة وأقل كلفة تشغيلية.
5. تحسين عمليات المزامنة وضبط تذبذب التردد في الشبكة العامة لتقليل الأعطال التشغيلية.
6. إجراء دراسات متابعة دورية لتقييم الكفاءة بعد تنفيذ خطط الصيانة والتحسين للتأكد من استدامة النتائج.

Compliance with ethical standards

Disclosure of conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

16. المرجع :

1 . جلغام، ش.، العلوص، ص. د. (2008). دراسة تأثير الجو المحيط على أداء التوربينات الغازية.

2 . يكيبيديا* .(n.d.). الدورة المركبة لتوليد الكهرباء. تم الاسترجاع من (https://ar.wikipedia.org/wiki/)[https://ar.wikipedia.org/wiki/الدورة_المركبة]

3. إدارة محطة كهرباء الزاوية المزدوجة .(n.d.). كتيبات الصيانة.

4 .الدغيلي، و. (2016). ورشة العمل التدريبية: كفاءة الطاقة في أنظمة إنتاج ونقل وتوزيع الكهرباء.

5 .سالمه، ف. ع.، أبوعبود، ح. ح.، إبراهيم، هـ. ج. (2022). محاكاة انبعاث وتشتت الملوثات الغازية المنبعثة من محطة توليد الطاقة والتأثيرات البيئية المحتملة: دراسة حالة. المجلة الليبية للعلوم البيئية والتقنية، 4(1)، 1-10. تم من الاسترجاع [https://journals.asmarya.edu.ly/jmset/index.php/JMSET/article/view/64] .

6 . تقرير التشغيل اليومي لغرفة التحكم لمحطة الزاوية المزدوجة لتوليد الكهرباء.

7 . بهجت، ع. ج. (2022). معدل الحرارة وكفاءة الأداء للمحطات الغازية لتوليد الكهرباء. تم الاسترجاع من [https://www.scribd.com/document/645310360/].

8 .الإسكوا. (2016). *تحسين كفاءة الإنتاج في محطات توليد الكهرباء. تم الاسترجاع من https://www.unescwa.org/sites/default/files/event/materials/improving_energy_efficiency_in_power_generation.pdf

9. تحسين كفاءة الإنتاج في محطات توليد الكهرباء ,منشورات الشركة العامة للكهرباء .

10.Boyce, M. P. (2002). Gas turbine engineering handbook (2nd ed.). Gulf Professional Publishing.

11.Padhi, B. N., & Pattanayak, L. (2023). Energy efficiency and exergetic analysis of combined cycle plant with inlet air cooling

12. https://web.archive.org/web.

13. Boyce, M. P. Gas Turbine Engineering Handbook. 4th ed., Butterworth-Heinemann, 2012.

14.Plant data Sheet for the Alstom Gas Turbines GT13E2 and GT13E2 MXL within the Simple Cycle Power Plant Zawia Extension.

15. Saeed, M. A., El-Kenawy, E. S. M., Ibrahim, A., et al. (2023). *Electrical power output prediction of combined cycle power plants using a recurrent neural network optimized by waterwheel plant algorithm*. *Frontiers in Energy Research*, 11, Article 1234624.

16. Yi, Q., Xiong, H., & Wang, D. (2023). *Predicting Power Generation from a Combined Cycle Power Plant Using Transformer Encoders with DNN*. *Electronics*, 12(11), 2431.

17. *Energy and exergy assessment of 750 MW combined cycle power plant: A case study* (2023). *Energy Nexus*, 12, 100251. ([ScienceDirect][4])

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

18.https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2023.1234624/full?utm_source=chatgpt.com "Frontiers | Electrical power output prediction of combined cycle power plants using a recurrent neural network optimized by waterwheel plant algorithm"
19. Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
20. https://documents1.worldbank.org/curated/en/193171527061676535/pdf/08-Task-C-Improving-GECOL-Technical-Performance.pdf?utm_source=chatgpt.com "08-Task-C-21.Improving-GECOL-Technical-Performance.pdf".
https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01430750.2023.2231461?utm_source=chatgpt.com "Energy efficiency and exergetic analysis of combined cycle plant with inlet air cooling: International Journal of Ambient Energy: Vol 44 , No 1 - Get Access"
22.Krohne. “Steam Turbine Generator (STG) in combined cycle power plants.” Krohne Industries. ([KROHNE Group
23.Hitachi Energy. “Generator Step-up (GSU) Transformers (GSU).”. ([hitachienergy.

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **AJAPAS** and/or the editor(s). **AJAPAS** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).