

مقارنة بين تقنية حقن البخار والدورة المركبة على أداء المحطات الغازية

رياض قدورة¹، نوري الشول² ، مصباح الطالب²

¹ شعبة التدريب، قاعدة طرابلس البحرية، رئاسة أركان القوات البحرية

² قسم الهندسة البحرية والمنصات العائمة، كلية الهندسة، جامعة طرابلس

Riaad.er89@Icloud.com¹ and n.eshoul@uot.edu.ly²

الملخص:

تستعرض هذه الورقة مقارنة بين استخدام تقنيتي حقن البخار والدورة المركبة على أداء وحدتين غازيتين نوع Siemens GT5-2000E المشغلة غرب طرابلس، ليبيا. باستخدام برنامج Aspen Plus لتحليل البيانات التشغيلية للوحدتين من حيث الكفاءة الحرارية والطاقة الكهربائية المتولدة، واستهلاك الوقود، والانبعثات. أظهرت نتائج التحليل أن تقنية حقن البخار قد حققت تحسينات كبيرة مقارنة بالدورة المركبة. في الكفاءة الحرارية، حققت تقنية حقن البخار زيادة بنسبة 52.3%، بينما كانت الزيادة في الدورة المركبة 42.9%. في الطاقة الكهربائية، ارتفعت الطاقة الكهربائية في حقن البخار بنسبة 50.3% مقارنة بـ 41.4% في الدورة المركبة. فيما يخص الاستهلاك النوعي للوقود، تحسن بنسبة 33.5% في حقن البخار مقابل 29.3% في الدورة المركبة. كما انخفضت انبعاثات CO₂ بنسبة 33.4% في تقنية حقن البخار مقارنة بـ 29.3% في الدورة المركبة. بناءً على هذه النتائج، تبين أن تقنية حقن البخار تعتبر الخيار الأكثر فعالية لتحسين الأداء العام للمحطات الغازية من حيث الكفاءة التشغيلية، الطاقة الكهربائية المتولدة، التوفير في الوقود، وتقليل الانبعاثات.

الكلمات المفتاحية: حقن البخار، الدورة المركبة، محطة الطاقة الغازية، Aspen Plus.

Abstract:

This paper presents a comparison between the application of steam injection and combined cycle technologies on the performance of two Siemens GT5-2000E gas turbine units operating in West Tripoli, Libya. Using Aspen Plus software, the operational data of the two units were analyzed in terms of thermal efficiency, generated electric power, fuel consumption, and emissions. The analysis results showed that the steam injection technology achieved significant improvements compared to the combined cycle. In terms of thermal efficiency, the steam injection technology achieved

a 52.3% increase, while the combined cycle achieved a 42.9% increase. For electric power generation, steam injection led to a 50.3% increase compared to a 41.4% increase in the combined cycle. Regarding specific fuel consumption, an improvement of 33.5% was observed with steam injection compared to 29.3% with the combined cycle. Additionally, CO₂ emissions decreased by 33.4% with steam injection compared to 29.3% with the combined cycle. Based on these results, steam injection technology proves to be the most effective option for improving the overall performance of gas turbine plants in terms of operational efficiency, electric power generation, fuel savings, and emissions reduction.

Keywords: Steam injection, combined cycle, gas turbine station, Aspen Plus.

1. المقدمة:

تعتبر محطات الطاقة الغازية واحدة من أكثر مصادر توليد الكهرباء فعالية على مستوى العالم، حيث تتميز بكفاءتها العالية وقدرتها على الاستجابة السريعة لاحتياجات الطاقة المتزايدة [1]. وفي ليبيا، تعد هذه المحطات جزءاً لا يتجزأ من منظومة توليد الكهرباء الوطنية، حيث تم تركيب عدد من المحطات الغازية منها محطة غرب طرابلس الغازية ومحطة جنوب طرابلس وغيرها. ومع ذلك، تتأثر كفاءة هذه المحطات بشكل كبير بالعوامل البيئية المحلية مثل درجة الحرارة والرطوبة النسبية، وهي عوامل تشهد تغييرات ملحوظة بين فصول السنة [2,3]. تؤدي هذه العوامل إلى ضرورة تحسين كفاءة المحطات الغازية بهدف تقليل استهلاك الوقود والانبعاثات الضارة مع الحفاظ على مستوى عالٍ من الأداء [4]. في هذا السياق، يُعد التحليل الحراري للطاقة أداة أساسية لدراسة كفاءة المحطات الغازية وحساب الفاقد الحراري، حيث يقدم نظرة شاملة على أداء المكونات المختلفة. [5]. ومن بين التقنيات المتقدمة التي تساهم في تحقيق هذه الأهداف، تبرز تقنيتا الدورة المركبة وحقن البخار كحلول ذات فعالية [6]. تعتمد تقنيتا الدورة المركبة على الاستفادة من حرارة غازات العادم الناتجة عن التوربين الغازي لتوليد بخار لغرض تشغيل توربين بخاري إضافي، مما يؤدي إلى زيادة في كفاءة استغلال الطاقة وتقليل الفاقد الحراري. ومع أن هذه التقنية فعالة من حيث تحسين الأداء، إلا أنها تتطلب استثمارات كبيرة في البنية التحتية [7,8]. أظهرت التطورات في تصميم التوربينات الغازية تحسناً كبيراً في كفاءة محطات الدورة المركبة، حيث تصل كفاءة

محطات الدورة المركبة باستخدام التوربينات المطورة مثل Mitsubishi M501F إلى 57.1%، مقارنة بـ 37% عند تشغيلها في الدورة البسيطة. يعتمد هذا التحسين على زيادة الاستفادة من الحرارة الناتجة عن العادم في الدورة التكميلية، والتي تتضمن مولدات استعادة الحرارة (HRSG) و التوربينات البخارية ذات الضغط المتعدد [9]. قام أسامة خان وآخرون بدراسة الديناميكا الحرارية لمحطات الطاقة الدورة المركبة (CCPP) Combined Cycle Power Plant، حيث استكشفوا تأثير الاستراتيجيات الاقتصادية والعوامل التصميمية على تحسين أداء المحطة. أظهرت النتائج أن التغيرات في الاستراتيجيات الاقتصادية تؤثر على التوازن بين التدفقات النقدية والتكاليف الثابتة عند النقطة المثلى، مع تقليل انبعاثات الكربون واستهلاك الوقود. كما أظهرت الحسابات الحرارية للتوربين الغازي والتوربين البخاري تحسناً في كفاءة الطاقة ومرونة التشغيل [11]. بالمقابل، تعمل تقنية حقن البخار على إدخال كمية محددة من البخار إلى غرفة الاحتراق في التوربين الغازي، مما يزيد من حجم وكثافة الغاز المتدفق عبر التوربين، وبالتالي يساهم في تحسين القدرة الناتجة والكفاءة الحرارية [1، 8، 11]. أثبتت هذه التقنية نجاحها في تحسين الأداء وتقليل الانبعاثات الضارة [1]. يعمل حقن البخار على تبريد غازات الاحتراق، مما يقلل من خطر تلف ريش التوربين بسبب ارتفاع درجات الحرارة، ويساهم في تقليل إنتاج أكاسيد النيتروجين (NOx) كما يسمح للتوربينات الغازية بالعمل عند درجات حرارة أعلى، مما يحسن الكفاءة، ويظهر أداءً أفضل عند التحميل الجزئي مقارنة بالدورة البسيطة [5، 11، 12]. تشير الدراسات إلى أن الكفاءة الحرارية لدورة التوربينات الغازية المحقونة بالبخار (STIG) تزداد مع زيادة نسبة الضغط ودرجة حرارة مدخل التوربين. أظهرت النتائج أن كفاءة دورة (STIG) تكون دائماً أعلى من الدورة البسيطة لنفس الظروف التشغيلية، كما يزيد صافي إنتاج العمل ويقل استهلاك الوقود النوعي [13]. يُظهر التحليل أن حقن البخار لا يؤثر على أداء الضاغط [14، 15]. باستخدام برنامج Aspen Hysis، تبين أنه عند تطبيق نسبة 10% من البخار إلى الهواء، تزيد القدرة وفاعلية إنتاج التوربينات الغازية بنسبة 134% و 112% من قيم الحمل الأساسي، على التوالي. كما أن حقن البخار الناتج عن المياه المعالجة بشكل صحيح لا يؤثر على عمر الأجزاء الساخنة للتوربين [8، 16]. في هذه الورقة، سيتم تقييم ومقارنة أداء تقنيتي الدورة المركبة وحقن البخار على التوربينات الغازية نوع (SGT5)

2000E) المشغلة في ليبيا. تشمل الدراسة تحليل الأداء تحت ظروف تشغيلية متطابقة لكلتا التقنيتين، مع التركيز على تحسين الكفاءة الحرارية، زيادة القدرة الإنتاجية، تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

برنامج: Aspen Plus

يعد برنامج Aspen Plus أداة محاكاة شاملة تُستخدم على نطاق واسع في التطبيقات الهندسية لنمذجة وتحليل العمليات الديناميكية الحرارية المختلفة، لا سيما في تطبيقات الطاقة والصناعات. يتيح البرنامج للمستخدمين محاكاة مجموعة واسعة من الأنظمة، من محطات الطاقة. يتميز البرنامج بقدرته على محاكاة العمليات المعقدة، وتقييم الأداء، وتحسين التصميم، مما يجعله أداة قوية في دراسة أنظمة الطاقة وتأثيراتها البيئية [17]. يقدم Aspen Plus منهجًا تفصيليًا ومنهجيًا لمحاكاة المكونات والعمليات المختلفة في محطات الطاقة. يتضمن البرنامج مجموعة من نماذج الديناميكا الحرارية والخصائص الفيزيائية التي تتيح إجراء حسابات دقيقة للكتلة والطاقة. وتعد هذه الإمكانيات أساسية في تصميم وتحسين محطات الطاقة، خاصة تلك التي تتضمن تقنيات متقدمة مثل الحقن بالبخر، والدورات المركب [18]. يدعم Aspen Plus مجموعة واسعة من المكتبات التي تمكن المستخدمين من محاكاة مكونات محددة في الأنظمة المعقدة. تعد هذه المكتبات أساسية لتمثيل العمليات الفيزيائية والتطبيقات الهندسية، مما يضمن أن تعكس المحاكاة الظروف الواقعية بأكبر قدر ممكن. يستخدم البرنامج نماذج رياضية دقيقة لمحاكاة ديناميكيات السوائل، وانتقال الحرارة، والتفاعلات الكيميائية، والعمليات الميكانيكية، مما يوفر توقعات دقيقة ورؤى حول أداء النظام [19]. في محاكاة محطات الطاقة، يُستخدم Aspen Plus بشكل متكرر لمحاكاة كل من الدورات البسيطة والدورات المركبة، وكذلك حقن البخار في التوربينات الغازية، وغيرها من التقنيات المتقدمة التي تعزز الكفاءة وتقلل الانبعاثات. مما يضمن أن يتمكن المهندسون من تقييم استراتيجيات تشغيلية وتكوينات مختلفة لتحقيق أفضل النتائج الاقتصادية والبيئية [20]. يستخدم Aspen Plus تقنيات رياضية متقدمة، لحل المعادلات التي تحكم سلوك النظام. وهذا يضمن أن المحاكاة التي يقوم بها البرنامج تتقارب إلى حلول دقيقة، حتى للأنظمة المعقدة ذات المكونات المتداخلة. كما تسمح مجموعة الخصائص في البرنامج بإجراء حسابات دقيقة للخصائص

الديناميكية الحرارية، مما يضمن أن النماذج تعكس سلوك الواقع وتقدم توقعات دقيقة حول أداء النظام [21]. بالإضافة إلى الحسابات الديناميكية الحرارية، يوفر Aspen Plus أيضًا أدوات للتحليل الاقتصادي، مما يسمح للمستخدمين بتقييم تغيرات التكلفة لاختيارات التصميم واستراتيجيات التشغيل المختلفة. تجعل هذه المرونة الاقتصادية Aspen Plus أداة أساسية لتقييم جدوى دمج تقنيات متقدمة مثل حقن البخار والدورة المركبة [20]. في هذه الدراسة، تم استخدام Aspen Plus لمحاكاة محطة طاقة توربينية مدعومة بدورة مركبة. مكنت مكتبات البرنامج القوية من محاكاة حقن البخار، مما قدم فهمًا شاملاً لأداء النظام تحت ظروف تشغيلية مختلفة [19]. بشكل عام، يُعد Aspen Plus أداة موثوقة وقوية لمحاكاة أنظمة الطاقة، وتحسين الأداء، وتقييم التأثيرات البيئية والاقتصادية للتقنيات المختلفة.

برنامج Excel

يعد Excel أداة شائعة وفعالة في تحليل البيانات وتنفيذ العمليات الحسابية المعقدة في العديد من التطبيقات الهندسية. في هذه الدراسة، تم استخدام Excel بشكل أساسي لتحليل البيانات المتعلقة بالكفاءة، والطاقات المتولدة، والانبعاثات، وحساب معدل الاستهلاك النوعي للمحطات الغازية باستخدام تقنية حقن البخار والدورة المركبة. بالإضافة إلى ذلك، يُستخدم Excel في هذه العمليات بفضل قدراته الكبيرة في إجراء الحسابات المتقدمة وتحليل البيانات بسرعة ومرونة، مما يسهل التعامل مع مجموعات البيانات الكبيرة والمعقدة [22]. في عمليات تحليل الطاقة، تم استخدام Excel لحساب كفاءة المحطات الغازية بكفاءة حقن البخار والدورة المركبة، بالإضافة إلى حساب الطاقة المتولدة في النظام. يستخدم Excel أيضًا لحساب الانبعاثات الناجمة عن العمليات المختلفة في المحطات، حيث يسمح بإجراء حسابات دقيقة لتحديد مستويات الانبعاثات وفقًا للمعايير البيئية المختلفة. باستخدام الصيغ الرياضية المتقدمة والرسوم البيانية، تمكن Excel من تقديم توقعات دقيقة حول الأداء البيئي والطاقي للمحطات [23]. تم أيضًا استخدام Excel في حساب معدل الاستهلاك النوعي للمحطات الغازية، وهي عملية حاسوبية أساسية لفهم كفاءة الوقود وأداء النظام بشكل عام [24].

معادلات النموذج الحراري لمحطات توليد الطاقة

باستخدام برنامج Excel اجري تحليل الطاقة، الكفاءة الحرارية، صافي القدرة الكهربائية المتولدة، معدل الاستهلاك النوعي للوقود وكذلك الانبعاثات. لتقييم أداء محطات الطاقة الغازية والدورة المركبة والمحطة الغازية بتقنية حقن البخار. الجدول (1) يوضح معادلات الطاقة لمحطات الطاقة الغازية وكذلك تأثير تقنيتي حقن البخار والدورة المركبة على محطات الطاقة الغازية، [26, 27].

[2, 3, 25]

الجدول (1) معادلات النموذج الحراري لمحطات توليد الطاقة [2, 3, 25, 26, 27].

محطة الطاقة الغازية	
$P_{net(GT)} = P_{thermal(GT)} - P_{loss}$	صافي الطاقة الكهربائية المتولدة
$\eta_{net(GT)} = \frac{P_{net(GT)}}{\dot{m}_f \cdot LHV}$	صافي الكفاءة الحرارية
$HR = \frac{3600}{\eta_{net(GT)}}$	الاستهلاك النوعي للوقود
$CO2_{EMISSION} = \frac{\dot{m}_{EMISSION}}{\eta_{net(GT)}}$	انبعاثات غاز ثاني اكسيد الكربون
تأثير تقنية حقن البخار على خصائص المحطة الغازية	
$P_{net(SIGT)} = P_{thermal(SIGT)} - P_{loss(SIGT)}$	صافي الطاقة الكهربائية المتولدة
$\eta_{net(SIGT)} = \frac{P_{net(SIGT)}}{\dot{m}_f \cdot LHV}$	صافي الكفاءة الحرارية
$HR = \frac{3600}{\eta_{net(SIGT)}}$	الاستهلاك النوعي للوقود
$CO2_{EMISSION(SIGT)} = \frac{\dot{m}_{EMISSION}}{P_{net(SIGT)}}$	انبعاثات غاز ثاني اكسيد الكربون
تأثير تقنية الدورة على خصائص المحطة الغازية	
$P_{net(CCPP)} = P_{thermal(CCPP)} - P_{loss(CCPP)}$	صافي الطاقة الكهربائية المتولدة
$\eta_{net(CCPP)} = \frac{P_{net(SIGT)CCPP}}{\dot{m}_f \cdot LHV}$	صافي الكفاءة الحرارية
$HR = \frac{3600}{\eta_{net(CCPP)}}$	الاستهلاك النوعي للوقود
$CO2_{EMISSION(CCPP)} = \frac{\dot{m}_{EMISSION}}{P_{net(CCPP)}}$	انبعاثات غاز ثاني اكسيد الكربون
$Model_{Error} = \frac{(Actual\ data - Model\ data) * 100}{Actual\ data}$	حساب نسبة الخطأ في النموذج

محاكاة التشغيل الديناميكي الحراري لمحطة توليد الطاقة الغازية

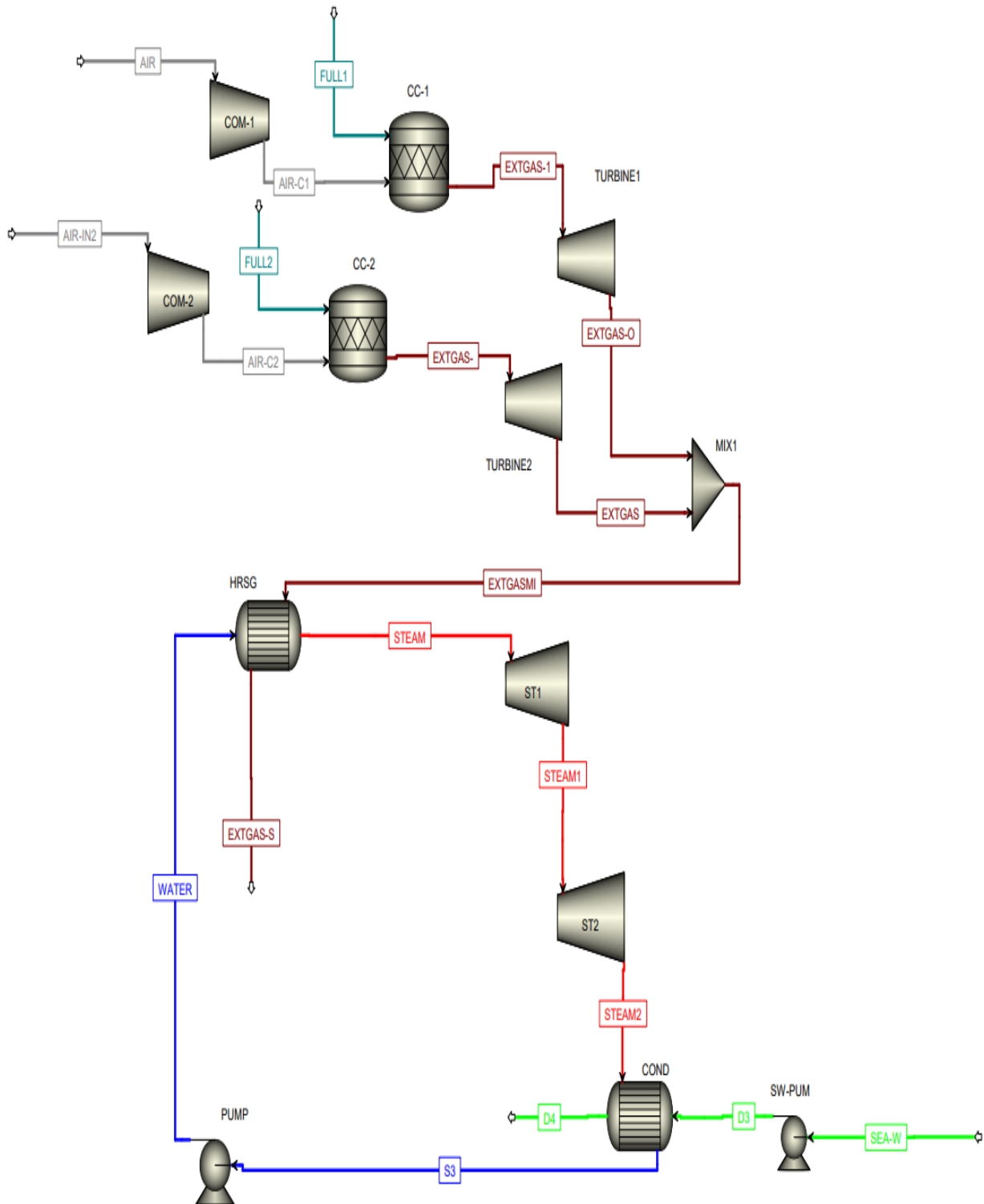
يتميز التوربين الغازي نوع (SiemensGT5-2000E) بعمود واحد، وغرفة احتراق بنمطين صومعيين لاحتراق الوقود بكفاءة عالية، لتقليل انبعاث أكاسيد النيتروجين وثاني أكسيد الكربون بالإضافة الي ضاغط، و توربينة مكونة من أربع مراحل. يعتبر التوربين الغازي (SiemensGT5-2000E) نموذج فريدا من نوعه بين التوربينات الغازية حيث يتم ربط المولد بالعمود الذي يقع بجانب الضاغط. يتميز النموذج أيضاً بقدرة فعالة على العمل مع مستويات عالية من الموثوقية فضلا عن قدرته على حرق الوقود السائل والغازي. تعمل محطة توليد الطاقة الغازية (SiemensGT5-2000E) على دورة برايتون. يتم عرض البيانات التشغيلية للشركة المصنعة لشروط (ISO) International Organization for Standardization في الجدول (2) الجدول (2) البيانات التشغيلية لمحطة توليد الطاقة الغازية نوع SGT5-2000E لشركة سيمنز لشروط [28].

(ISO)

<i>-2000E Series 5Siemens Performance SGT</i>	<i>ISO Conditions</i>
<i>Grid Frequency (Hz)</i>	50
<i>Power (MW)</i>	166
<i>Thermal Efficiency (%)</i>	34.7
<i>Heat Rate(kJ/kWh)</i>	10,375
<i>Heat Rate(Btu/kwh)</i>	9,834
<i>Turbine Exhaust Temperature (°C/°F)</i>	541/1,005
<i>Exhaust mass flow rate (kg/s)</i>	525
<i>Pressure ratio</i>	12

التحقق من نموذج محطة الطاقة الغازية

عند تشغيل التوربين الغازي في حالة التصميم، يُشار إليها ب حالة (ISO) . عندما تعمل محطة توليد الكهرباء في أي حالة تختلف عن مواصفات (ISO) يُعرف ذلك بأداء حالة خارج التصميم. للتحقق من صحة النموذج تم تصميم نموذج لإنتاج الطاقة والكفاءة الحرارية باستخدام برنامج (Aspen Plus) الاحترافي لمحطة الطاقة. أجريت محاكاة توربين (SiemensGT5-2000E) باستخدام درجة حرارة الهواء المحيط والضغط ونسبة الضغط ومعدل تدفق كتلة العادم ودرجة حرارة غاز العادم من الجدول (2) ، في حين تم ضبط نسبة الضغط في توربينات الغاز. تبلغ الكفاءة المتساوية الانتروبيا للضاغط والتوربين المستخدم 85% و 90% على التوالي. الكفاءة الميكانيكية



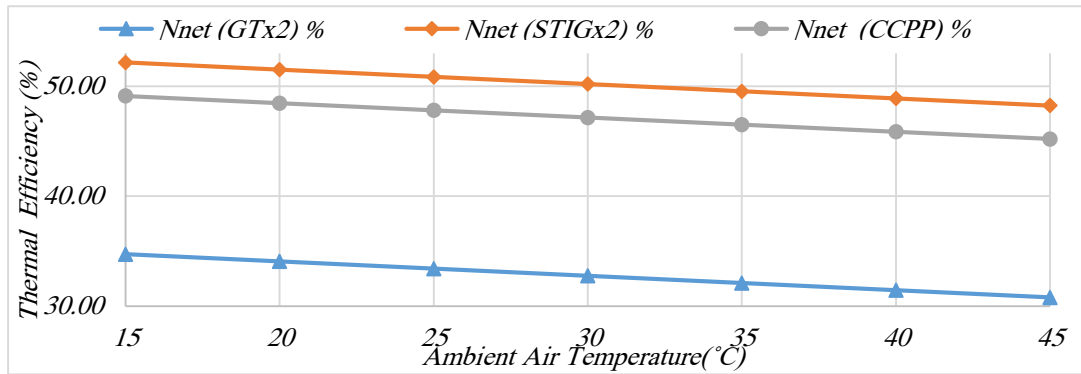
الشكل 2: نموذج محاكاة تصميم المحطة (SGT5-2000E) المستهدفة بتقنية الدورة المركبة (CCPP)

2. النتائج والمناقشة:

1- الكفاءة الحرارية

أن تطبيق تقنية حقن البخار أدى إلى زيادة كفاءة الودحتين الغازيتين من 33.39% إلى 50.84% عند درجة حرارة 25 مئوية، مما يعكس زيادة بنسبة 52.3%. يعمل حقن البخار في غرفة الاحتراق على تحسين ظروف الاحتراق من خلال زيادة ضغط وكثافة خليط الهواء والوقود، مما يعزز من فعالية عملية الاحتراق ويحقق احتراقاً أكثر كفاءة. كما يساهم حقن البخار في خفض درجات حرارة الاحتراق، ما يقلل من التآكل ويزيد استقرار اللهب، مما يحقق كفاءة أفضل في استهلاك الوقود ويعزز من القدرة الناتجة، حتى في حالات التحميل الجزئي. أما عند تطبيق الدورة المركبة، فقد شهدنا تحسناً في الكفاءة أيضاً مقارنةً بالدورة البسيطة. عند درجة حرارة 25 مئوية، ارتفعت الكفاءة من 33.39% في الودحتين الغازيتين إلى 47.79% في الدورة المركبة، مما يعكس زيادة بنسبة 42.9%. تعمل الدورة المركبة على تحسين الكفاءة من خلال استخدام الطاقة المفقودة في غاز العادم لتوليد الكهرباء عبر التوربين البخاري، مما يؤدي إلى زيادة القدرة المنتجة دون الحاجة إلى زيادة كبيرة في استهلاك الوقود. إضافة إلى ذلك، يتم تقليل فقد الطاقة الحرارية، حيث يستفيد التوربين البخاري من الطاقة الحرارية للغازات العادمة بعد مرورها عبر التوربين الغازي. أظهر تحليل تأثير درجة حرارة الهواء من 15 إلى 45 مئوية الداخل إلى الضاغط على كفاءة المحطات، في المحطة بدون حقن البخار أن ارتفاع درجة حرارة الهواء تؤدي إلى انخفاض الكفاءة من 34.70% إلى 30.78%، بانخفاض إجمالي يقارب 11.31%، أي بمعدل متوسط قدره 1.3% لكل زيادة بمقدار 5 درجات مئوية. أما مع تقنية حقن البخار، فإن الكفاءة تتخفف من 52.15% إلى 48.23% لنفس الزيادة في درجة الحرارة، بانخفاض إجمالي قدره حوالي 7.47%، ما يعادل معدل انخفاض 0.9% لكل 5 درجات مئوية. تُظهر هذه النتائج أن تقنية حقن البخار لا تقتصر فقط على تحسين الكفاءة، بل تساهم أيضاً في تقليل تأثير انخفاض الكفاءة عند ارتفاع درجات الحرارة، مما يجعلها حلاً فعالاً لمواجهة تأثيرات الحرارة العالية. بالنسبة للدورة المركبة، نلاحظ أن الكفاءة تتخفف من 49.10% إلى 45.18% عند زيادة درجة الحرارة من 15 إلى 45 مئوية، بانخفاض إجمالي قدره 3.92%، ما يعادل معدل انخفاض قدره 0.9% لكل 5 درجات

مئوية. وهو أقل بكثير مقارنةً بالوحدتين الغازيتين التي شهدت انخفاضًا أكبر في الكفاءة. التحليل يظهر أن الدورة المركبة توفر كفاءة أعلى بشكل ملحوظ مقارنةً بالدورة البسيطة، حيث يقل تأثير ارتفاع درجات الحرارة على الكفاءة بشكل أكبر الشكل (3) يوضح تأثير درجة حرارة الهواء الداخل إلى الضاغط على المحطة الغازية والعوامل المدروسة.



الشكل 3: تأثير درجة الحرارة على الكفاءة الحرارية

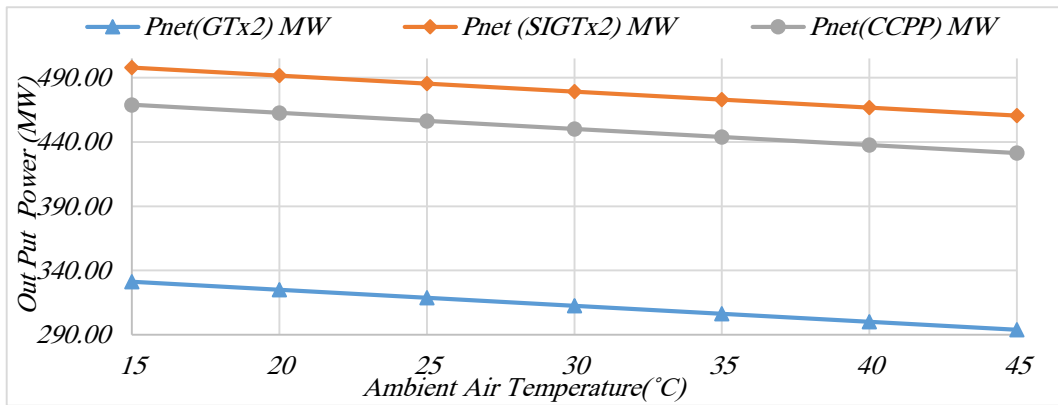
بعد تحليل النتائج ومقارنة تقنيتي حقن البخار والدورة المركبة، نجد أن تقنية حقن البخار أظهرت تحسناً أكبر في الكفاءة مقارنةً بالدورة المركبة عند درجة حرارة 25 مئوية، حيث ارتفعت الكفاءة من 33.39% إلى 50.84%، مما يعكس زيادة بنسبة 52.3%. بالمقابل، في الدورة المركبة، ارتفعت الكفاءة من 33.39% إلى 47.79%، مما يعكس زيادة بنسبة 42.9%. هذا التحسن في الكفاءة في حالة حقن البخار أعلى بنسبة 9.4% مقارنةً بالدورة المركبة، مما يجعلها التقنية الأكثر فاعلية لتحسين الكفاءة في درجات الحرارة الثابتة. نتيجة التغير في درجة حرارة الهواء الداخل إلى الضاغط، نجد أن كفاءة تقنية حقن البخار أكثر تأثراً بارتفاع درجات الحرارة مقارنةً بالدورة المركبة. فعند زيادة درجة الحرارة من 15 إلى 45 مئوية، انخفضت كفاءة تقنية حقن البخار من 52.15% إلى 48.23%، بانخفاض إجمالي قدره 7.47%، بينما في الدورة المركبة، انخفضت الكفاءة من 49.10% إلى 45.18%، بانخفاض قدره 3.92%. هذه النتائج تشير إلى أن الدورة المركبة تحافظ على كفاءتها بشكل أفضل عند زيادة درجات الحرارة، وهو ما يُعزى إلى أن الدورة المركبة تعتمد على الاستفادة من الطاقة الحرارية المتبقية من غازات العادم عبر التوربين البخاري، وبالتالي لا يتأثر التوربين البخاري بشكل كبير بزيادة درجات الحرارة أو دخول الهواء الجوي. بينما في تقنية حقن البخار، يحقن البخار في محطة الطاقة الغازية الذي بدوره يكون أكثر تأثراً بزيادة درجات الحرارة نتيجة تأثر الضاغط بدرجة حرارة الهواء الداخل.

2- الطاقة الكهربائية المتولدة

اما بالنسبة للطاقة الكهربائية المتولدة أدى تطبيق تقنية حقن البخار إلى زيادة الطاقة الكهربائية المتولدة في الوحدتين الغازيتين من 331.37 ميغاوات إلى 497.92 ميغاوات عند درجة حرارة 25 مئوية، مما يعكس زيادة بنسبة 50.3%. حقن البخار في غرفة الاحتراق يعمل على تحسين أداء الدورة البسيطة من خلال زيادة كثافة الهواء والوقود داخل الغرفة، مما يسهم في زيادة القدرة الناتجة. كما أن إضافة البخار يساعد في تحسين عملية الاحتراق، مما يؤدي إلى تحقيق طاقة كهربائية أكبر من المحطة. كذلك أدى تطبيق الدورة المركبة، تحسناً أيضاً في الطاقة الكهربائية مقارنةً بالدورة الغازية البسيطة. عند درجة حرارة 25 مئوية، ارتفعت الطاقة الكهربائية من 331.37 ميغاوات إلى 468.87 ميغاوات، مما يعكس زيادة بنسبة 41.4%. يعتمد التوربين البخاري في الدورة المركبة على استغلال الطاقة الحرارية المفقودة من غازات العادم، مما يزيد من القدرة المنتجة دون الحاجة إلى زيادة كبيرة في استهلاك الوقود. عند ارتفاع درجة حرارة دخول الهواء الي الضاغط من 15 إلى 45 درجة مئوية إلى انخفاض الطاقة الكهربائية المتولدة للوحدتين الغازيتين من 331.37 ميغاوات إلى 293.95 ميغاوات، بانخفاض إجمالي قدره 11.3%. هذا الانخفاض الكبير في الطاقة يعكس تأثير ارتفاع درجات الحرارة على التوربينات، حيث أن زيادة الحرارة تؤدي إلى زيادة شغل الضاغط وزيادة السحب على القدرة من التوربين وبالتالي تقليل القدرة المنتجة. أما مع تقنية حقن البخار، فإن الطاقة الكهربائية تنخفض من 497.92 ميغاوات إلى 460.50 ميغاوات لنفس الزيادة في درجة الحرارة، بانخفاض إجمالي قدره حوالي 7.5%. هذا الانخفاض الأقل مقارنةً بالوحدتين الغازيتين يشير إلى أن حقن البخار يساهم في تقليل تأثير درجات الحرارة المرتفعة على قدرة المحطة، مما يجعلها أكثر قدرة على الحفاظ على الطاقة المنتجة في ظروف التشغيل المختلفة. اما في الدورة المركبة، نلاحظ أن الطاقة الكهربائية تنخفض من 468.87 ميغاوات إلى 440.34 ميغاوات عند زيادة درجة الحرارة من 15 إلى 45 مئوية، بانخفاض إجمالي قدره 6.1%. هذا الانخفاض في الطاقة الكهربائية يعتبر أقل مقارنةً بالدورة الغازية البسيطة، مما يشير إلى أن الدورة المركبة أكثر قدرة على الحفاظ على القدرة المنتجة عند درجات حرارة مرتفعة، وذلك لأن ليس لدرجة حرارة الهواء

الداخل الي الضاغط أي تأثير على التوربين البخاري. الشكل(4) يوضح تأثير درجة حرارة دخول الهواء الي الضاغط على الطاقة الكهربائية المنتجة.

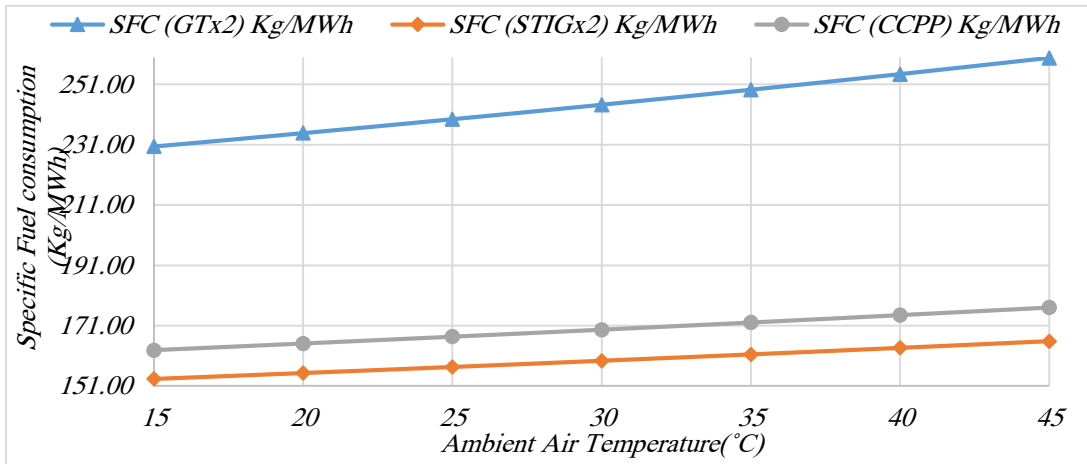
الشكل4: تأثير درجة الحرارة على انتاج الطاقة



اما بعد مقارنة تقنيتي حقن البخار والدورة المركبة، نلاحظ أن تقنية حقن البخار أظهرت تحسناً أكبر في الطاقة الكهربائية مقارنة بالدورة المركبة عند درجة حرارة 25 مئوية، حيث ارتفعت الطاقة من 331.37 ميغاوات إلى 497.92 ميغاوات، مما يعكس زيادة بنسبة 50.3%. بينما في الدورة المركبة، ارتفعت الطاقة من 331.37 ميغاوات إلى 468.87 ميغاوات، مما يعكس زيادة بنسبة 41.4%. هذا التحسن في الطاقة الكهربائية في حالة حقن البخار أعلى بنسبة 8.9% مقارنة بالدورة المركبة، مما يجعلها التقنية الأكثر فاعلية لتحسين الطاقة الكهربائية المتولدة في درجات الحرارة. أظهرت دراسة التغير في درجات حرارة دخول الهواء الي الضاغط على الطاقة الكهربائية، أن تقنية حقن البخار تظل أكثر تأثيراً بارتفاع درجات الحرارة مقارنة بالدورة المركبة. فعند زيادة درجة الحرارة من 15 إلى 45 درجة مئوية، انخفضت الطاقة الكهربائية في حالة حقن البخار من 497.92 ميغاوات إلى 460.50 ميغاوات، بانخفاض قدره 7.5%، بينما في الدورة المركبة، انخفضت الطاقة من 468.87 ميغاوات إلى 440.34 ميغاوات، بانخفاض قدره 6.1%. هذه النتائج تشير إلى أن الدورة المركبة تحافظ على قدرتها الكهربائية بشكل أفضل عند زيادة درجات الحرارة الهواء، حيث يتم الاستفادة من الطاقة الحرارية المتبقية في غازات العادم لتشغيل الدورة البخارية، التي بدورها لا تتأثر بدرجة حرارة دخول الهواء العالية بعكس تقنية حقن البخار التي تتأثر نتيجة تأثير التوربين الغازي.

3- الاستهلاك النوعي للوقود

من الشكل (5) نلاحظ أن عند درجة حرارة 15 درجة مئوية، بلغ الاستهلاك النوعي للوقود في الودحتين الغازيتين 230.44 كجم/ميجاوات ساعة، بينما انخفض إلى 153.36 كجم/ميجاوات ساعة عند استخدام تقنية حقن البخار، مما يعكس تحسناً بنسبة 33.5%. يعمل حقن البخار على تحسين عملية الاحتراق من خلال زيادة كثافة خليط الوقود والهواء داخل غرفة الاحتراق، مما يعزز من كفاءة استهلاك الوقود ويقلل الطاقة المفقودة. أيضاً تحسن الاستهلاك النوعي في الدورة المركبة مقارنةً بالدورة الغازية البسيطة. فعند درجة حرارة 15 درجة مئوية، بلغ الاستهلاك النوعي للوقود في الدورة المركبة 162.86 كجم/ميجاوات ساعة، مما يعكس تحسناً بنسبة 29.3% مقارنةً بالمحطة الغازية البسيطة. يعود هذا التحسن إلى استخدام الطاقة الحرارية المهدورة في غازات العادم لتشغيل التوربين البخاري، ما يزيد من الطاقة المنتجة عند نفس كمية الوقود للودحتين الغازيتين. كما أن ارتفاع درجة حرارة دخول هواء المحيط إلى الضاغط من 15 إلى 45 درجة مئوية للودحتين الغازيتين أدى إلى زيادة الاستهلاك النوعي من 230.44 كجم/ميجاوات ساعة إلى 259.77 كجم/ميجاوات ساعة، أي بزيادة إجمالية قدرها 12.74%، ما يعادل معدل زيادة 2.12% لكل 5 درجات مئوية. أما مع تقنية حقن البخار، فإن الاستهلاك النوعي يزيد من 153.36 كجم/ميجاوات ساعة عند 15 درجة مئوية إلى 165.82 كجم/ميجاوات ساعة عند 45 مئوية، بزيادة إجمالية قدرها 8.1%، أي بمعدل زيادة قدره 1.35% لكل 5 درجات مئوية. تُظهر هذه النتائج أن تقنية حقن البخار فعالة في تقليل تأثير ارتفاع درجات الحرارة للهواء الداخل إلى الضاغط على الاستهلاك النوعي للوقود، مما يجعلها أكثر كفاءة في الظروف الحارة مقارنةً بالدورة البسيطة. في الدورة المركبة، نلاحظ أن الاستهلاك النوعي يزيد من 162.86 كجم/ميجاوات ساعة عند 15 درجة مئوية إلى 176.99 كجم/ميجاوات ساعة عند 45 درجة مئوية، بزيادة إجمالية قدرها 8.6%، أي بمعدل زيادة 1.43% لكل 5 درجات مئوية. تُظهر النتائج أن الدورة المركبة أقل تأثراً بارتفاع درجات الحرارة مقارنةً بالدورة الغازية البسيطة، مما يجعلها تقنية فعالة للحفاظ على أداء مستقر نسبياً في الظروف ذات درجات حرارة الهواء المرتفعة.

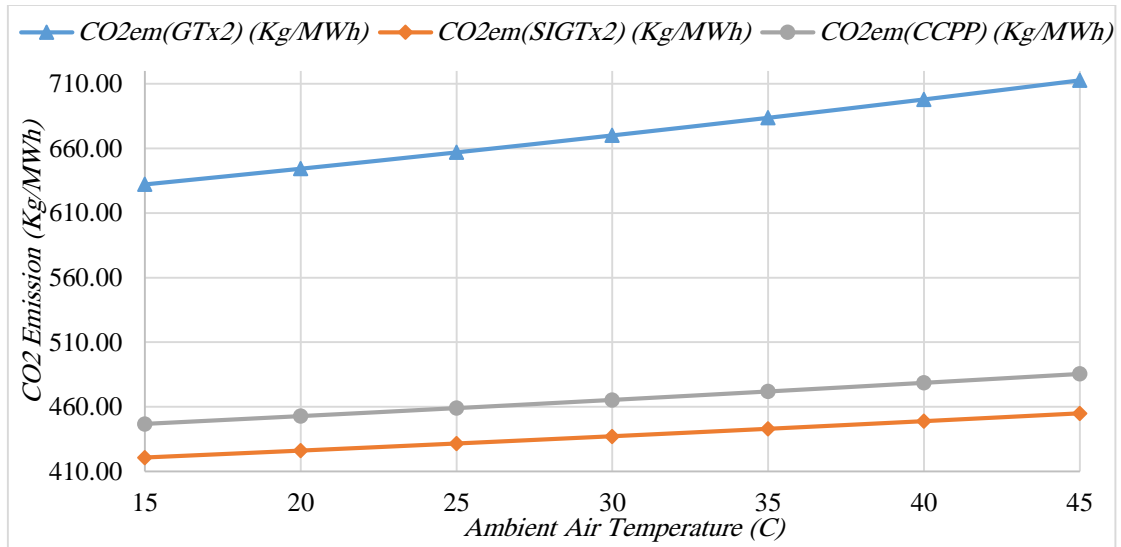


الشكل 5: تأثير درجة الحرارة على معدل استهلاك الوقود

أظهر تحليل النتائج، أن تقنية حقن البخار أظهرت تحسناً أكبر في الاستهلاك النوعي للوقود مقارنة بالدورة المركبة مثلاً عند درجة حرارة دخول الهواء الي الضاغط 15 درجة مئوية في المحطة الغازية البسيطة، كان الاستهلاك النوعي للوقود 230.44 كجم/ميجاوات ساعة، بينما انخفض إلى 153.36 كجم/ميجاوات ساعة باستخدام تقنية حقن البخار، محققاً تحسناً بنسبة 33.5%. بالمقابل، انخفض الاستهلاك في الدورة المركبة إلى 162.86 كجم/ميجاوات ساعة، مما يعكس تحسناً بنسبة 29.3%. هذا الفرق بين التقنيتين يبلغ 4.2% لصالح تقنية حقن البخار، مما يجعلها التقنية الأكثر فعالية في تحسين الاستهلاك النوعي. أما عند ارتفاع درجات حرارة الدخول الي الضاغط، نجد أن تقنية حقن البخار كانت أكثر تأثيراً بارتفاع درجات الحرارة مقارنة بالدورة المركبة. فعند زيادة درجة الحرارة من 15 إلى 45 درجة مئوية، زاد الاستهلاك النوعي في تقنية حقن البخار من 153.36 كجم/ميجاوات ساعة إلى 165.82 كجم/ميجاوات ساعة، بزيادة إجمالية قدرها 8.1%. أما في الدورة المركبة، فقد زاد الاستهلاك النوعي من 162.86 كجم/ميجاوات ساعة إلى 176.99 كجم/ميجاوات ساعة، بزيادة إجمالية قدرها 8.6%. تشير النتائج الي ان تقنية حقن البخار تُحقق استهلاكاً نوعياً أقل للوقود مقارنة بالدورة المركبة عند جميع درجات الحرارة، مما يجعلها التقنية الأكثر كفاءة من حيث استهلاك الوقود يرجع سبب ذلك لحقن البخار داخل حجرة الاحتراق مما يحسن عملية الاحتراق.

4- تحليل الانبعاثات

يعمل حقن البخار على تقليل انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون بشكل رئيسي من خلال تحسين كفاءة الاحتراق، حيث أدت إلى تقليل انبعاثات من 632.16 كجم/ميجاوات في الساعة إلى 420.71 كجم/ميجاوات في الساعة عند درجة حرارة 15 مئوية، مما يعكس انخفاضاً بنسبة 33.4%. ، حيث يساهم بخار الماء في تحسين عملية الاحتراق وتقليل الكميات الزائدة من الوقود الغير محترق. كما يعمل على خفض درجة حرارة غرفة الاحتراق، مما يؤدي إلى تقليل انبعاثات الغازات الضارة. شهدنا أيضاً تحسناً في الانبعاثات في الدورة المركبة مقارنةً بالوحدتين الغازيتين. عند درجة حرارة 15 مئوية، كانت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الدورة المركبة 446.78 كجم/ميجاوات، وهي أقل من تلك الموجودة في المحطة الغازية البسيطة، التي كانت 632.16 كجم/ميجاوات، مما يعكس انخفاضاً بنسبة 29.3%. تعمل الدورة المركبة على تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من خلال استخدام الطاقة الحرارية المفقودة في غاز العادم لتشغيل التوربين البخاري، مما يؤدي إلى توليد المزيد من الكهرباء باستخدام نفس كمية الوقود للوحدتين الغازيتين. الشكل (6) يبين أن ارتفاع درجة حرارة الهواء الداخل الي الضاغط، حيث أدى ارتفاع درجة حرارة الهواء من 15 إلى 45 درجة مئوية أدت إلى زيادة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من 632.16 كجم/ميجاوات إلى 712.64 كجم/ميجاوات في الوحدتين الغازيتين بدون حقن البخار، بزيادة إجمالية تقدر بحوالي 12.7%، أي بمعدل زيادة قدره 2.5% لكل زيادة بمقدار 5 درجات مئوية. أما مع تقنية حقن البخار، فإن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون تنخفض من 420.71 كجم/ميجاوات إلى 454.90 كجم/ميجاوات لنفس الزيادة في درجة الحرارة، بزيادة إجمالية قدرها 8.1%، ما يعادل معدل زيادة قدره 1.6% لكل 5 درجات مئوية. تُظهر هذه النتائج أن حقن البخار يسهم بشكل كبير في تقليل الانبعاثات حتى مع ارتفاع درجات الحرارة الهواء، مما يجعله خياراً فعالاً للحد من تأثيرات التغيرات الحرارية على البيئة. في الدورة المركبة، نلاحظ أن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ترتفع من 446.78 كجم/ميجاوات إلى 485.53 كجم/ميجاوات عند زيادة درجة الحرارة من 15 إلى 45 مئوية، بزيادة إجمالية قدرها 8.7%، ما يعادل معدل زيادة قدره 1.7% لكل 5 درجات مئوية. هذا يظهر أن الدورة المركبة، بالرغم من أنها أكثر كفاءة من الدورة الغازية البسيطة، إلا أن انبعاثاتها تتأثر أيضاً بزيادة درجات الحرارة الهواء، ولكن بشكل أقل من الوحدتين الغازيتين.



الشكل 6: تأثير درجة الحرارة على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون

نلاحظ من مقارنة تقنيتي حقن البخار والدورة المركبة، أن تقنية حقن البخار تساهم في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بشكل أكبر مقارنة بالدورة المركبة عند درجة حرارة 15 مئوية، حيث انخفضت الانبعاثات من 632.16 كجم/ميغاوات إلى 420.71 كجم/ميغاوات في المحطة الغازية مع حقن البخار، بينما في الدورة المركبة انخفضت من 632.16 كجم/ميغاوات إلى 446.78 كجم/ميغاوات، مما يعكس انخفاضاً بنسبة 33.4% مقارنة بـ 29.3% في الدورة المركبة. أيضاً نجد أن تقنية حقن البخار تظل أكثر فاعلية في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون مقارنة بالدورة المركبة. فعند زيادة درجة الحرارة من 15 إلى 45 مئوية، زادت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من 420.71 كجم/ميغاوات إلى 454.90 كجم/ميغاوات في المحطة الغازية مع حقن البخار، بينما في الدورة المركبة، زادت من 446.78 كجم/ميغاوات إلى 485.53 كجم/ميغاوات. تُظهر النتائج أن تقنية حقن البخار أكثر فاعلية في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، ما يجعلها الخيار الأفضل للحد من التلوث البيئي عند تشغيل المحطات الغازية.

3. الاستنتاج:

من خلال تحليل تقنيتي حقن البخار والدورة المركبة في تحسين أداء المحطات الغازية، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

1. تقنية حقن البخار أظهرت تحسناً أكبر في الكفاءة مقارنة بالدورة المركبة على الرغم من أن الدورة المركبة أظهرت قدرة أفضل في الحفاظ على الكفاءة مع زيادة درجة الحرارة.

2. تقنية حقن البخار تفوقت في زيادة الطاقة الكهربائية المتولدة مقارنة بالدورة المركبة.
3. حقن البخار أظهرت تحسناً أكبر في تقليل الاستهلاك النوعي للوقود مقارنة بالدورة المركبة، مما يساهم في تقليل التكاليف البيئية والاقتصادية.
4. تقنية حقن البخار ساهمت في تقليل انبعاثات CO₂ بشكل أكبر مقارنة بالدورة المركبة، مما يعكس تأثيراً بيئياً إيجابياً أكبر.
- بناءً على ذلك، يمكن استنتاج أن تقنية حقن البخار تعتبر الخيار الأكثر فعالية لتحسين الأداء العام للمحطات الغازية في مجالات الكفاءة الحرارية، توليد الطاقة، تقليل استهلاك الوقود، تقليل الانبعاثات.
4. الاختصارات:

الوصف	الرمز
وحدة استعادة الحرارة لتوليد البخار	<i>HRSG</i>
أكاسيد النيتروجين	<i>Nox</i>
المنظمة العالمية القياسية	<i>ISO</i>
محطة الطاقة الغازية	<i>GT</i>
المحطة الغازية بحقن البخار	<i>STIG</i>
الدورة المركبة	<i>CCPP</i>
انبعاثات ثاني أكسيد الكربون	<i>CO₂</i>
كتلة غازات العادم	\dot{m}_g (Kg/s)
صافي الطاقة الحرارية	<i>P_{thermal}</i> (MW)
امدادات الحرارة	<i>HS</i> (MW)
كتلة الوقود	\dot{m}_f (Kg/s)
صافي الطاقة الكهربائية المتولدة	<i>P_{net}</i> (MW)
الفقد في الطاقة	<i>P_{loss}</i> (MW)
صافي الكفاءة الحرارية	η_{net} (%)
معدل الاستهلاك النوعي للوقود	<i>SFC</i> (Kg/MWh)
انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون	<i>CO₂EMISSION</i> (Kg/MWh)
كتلة غاز ثاني أكسيد الكربون	$\dot{m}_{EMISSION}$ (Kg/s)
نسبة الخطأ	<i>Model_{Error}</i> (%)
الفرق (-)	<i>Diff</i>
درجة الحرارة	<i>EMP</i> (C°)

5. المراجع

- [1] Livshits, M., & Kribus, A. Solar hybrid steam injection gas turbine (STIG) cycle. Solar Energy, 2012.
- [2] Egware, H. O., & Obanor, A. I. The Investigation of an SGT5-2000E Gas Turbine Power Plant Performance in Benin City Based on Energy Analysis. Energy Reports, 2022.
- [3] Egware, H. O., Obanor, A. I., Aniekwu, A. N., Omoifo, O. I., & Ighodaro, A. Modeling and Simulation of the SGT5-2000E Gas Turbine Model for Power Generation. Energy Reports, 2021.
- [4] Nishida, K., Takagi, T., & Kinoshita, S. Regenerative steam-injection gas-turbine systems. Applied Energy, 2005.
- [5] Khademi, M., & Khosravi, A. Optimizing of gas turbine model SGT5-2000E (KWU V94.2) operating parameters using Genetic and PSO algorithms. ResearchGate, 2013.
- [6] Mitsubishi Power. Smart-AHAT (Advanced Humid Air Turbine). Mitsubishi Power Website, n.d.
- [7] Fathy, A. How a Steam-Injected Gas Turbine Works. LinkedIn Pulse, 2023.
- [8] Kayhan Kayadelen, H., & Ust, Y. Thermoenvironomic evaluation of simple, intercooled, STIG, and ISTIG cycles. ResearchGate, 2018.
- [9] Mitsubishi Power, Advanced Gas Turbine Performance Enhancements in Combined Cycle Power Plants. 2020–2024.
- [10] Khan, O., Khalid, F., & Parvez, M. Thermodynamic performance assessment of solar-based combined power and absorption refrigeration cycle. ResearchGate, 2020.
- [11] Ahmed, M. S., & Mohamed, H. A. Performance characteristics of modified gas turbine cycles with steam injection after combustion exit. Academia.edu, 2011.
- [12] Abd El-Fattah, M. H., Awad, M. M., & Elnegiry, E. A. Effect of Steam Injection on the Performance of Heavy-Duty Gas Turbines. Mansoura Engineering Journal, 2015.
- [13] Agarwal, S., Kachhwaha, S. S., & Mishra, R. S. Performance improvement of a simple gas turbine cycle through integration of inlet air evaporative cooling and steam injection. Journal of Scientific & Industrial Research, 2017.

- [14] Kim, K. H., & Kim, G. Thermodynamic Performance Assessment of Steam-Injection Gas-Turbine Systems. International Scholarly and Scientific Research, 2010.
- [15] Popli, S., Rodgers, P., & Evely, V. Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry. IIF/IIR, 2013.
- [16] Peymani, A., Sadeghi, J., Shahraki, F., & Samimi, A. Use of High Salinity Water in a Power Plant by Connecting a Direct Contact Membrane Distillation (DCMD) to a Steam-Injected Gas Turbine (STIG). Heliyon, 2023.
- [17] AspenTech. (2020). Aspen Plus User Guide. AspenTech.
- [18] Doe, J., & Smith, J. (2019). Simulation of power plants using Aspen Plus. Energy Simulation Journal.
- [19] Jouhara, H., & Khordehgah, N. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. Thermal Science and Engineering Progress.
- [20] Lee, D., & Turner, E. (2017). Applications of Aspen Plus in energy systems. Chemical Engineering Research and Design Journal.
- [21] Zhang, X., Cai, L., & Chen, T. (2019). Energetic and exergetic investigations of hybrid configurations in an absorption refrigeration chiller by Aspen Plus. MDPI.
- [22] Microsoft. (2020). Microsoft Excel User Guide.
- [23] Doe, J., & Smith, J. (2019). Energy analysis of combined cycle and steam injection gas turbine systems using Excel. Journal of Energy Engineering.
- [24] Turner, E., & Lee, D. (2018). Exergy analysis and desalination processes with Excel: Applications in power plants. Renewable Energy Systems Journal.
- [25] Derbal, C., & Haouam, A. Thermal Impact of Operating Conditions and Steam Injection on a Gas Turbine Performance. Academia.edu, 2021.
- [26] Derbal, C., & Haouam, A. Effects of operating conditions and steam injection on gas turbine performance. ResearchGate, 2023.
- [27] Ibrahim, T. Thermodynamic Evaluation of the Performance of a Combined Cycle Power Plant. International Journal of Engineering Science and Technology, 2010.
- [28] Siemens Company. The SGT-2000E series – designed for reliable, robust, and flexible power generation.