

Modelling and Simulation of Organic Rankine Cycle (ORC) for Waste Thermal Energy Recovery System in Marine Applications

Dr. Nabel Gadeer^{*}
Dr. Wafaa Rajab^{**}
Wardshan Slman^{***}

(Received 9 / 1 / 2020. Accepted 14 / 6 / 2020)

□ ABSTRACT □

In this paper, we investigated the Organic Rankine Cycle if it can be applied as an ORC-WHRS for exhaust marine engines gas. The organic fluids in the Fluid Prop library were analyzed by Cycle-Tempo program, and we chose 5 fluids that have the most ability to recover energy. Using Matlab, modified station models was analyzed from a vapor-dynamic model to simple organic Rankine cycle (suitable to wet fluids), and it showed a recovery rate of 3.0%, then a heat-recovery Rankine cycle (dry fluids) which showed a recovery rate of 3.2%.

Then analyze was made for these models in order to determine the corresponded models output uncertainties with the model inputs uncertainties (the pressure, temperature and mass flow rate), where we found that there was no effect of the unreliability of the exhaust gas pressure inputs on the model's output, unlike both temperature and mass flow rate which showed that the effect of the unreliability of the model's outputs consistent with changes in its inputs.

Keywords: Organic Rankine Cycle (ORC), Waste Heat Recovery (WHR).

^{*} Professor- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering – Tishreen University- Lattakia- Syria.

^{**} Assistant Professor-.Dept. Environmental Prevention-Higher Institute for Environmental Research-Tishreen University- Lattakia- Syria.

^{***} Postgraduate student (Master) - Dept. environmental prevention-Higher Institute for Environmental Research- Tishreen University- Lattakia- Syria.

نمذجة ومحاكاة دورة رانكن العضوية كنظام لاستعادة الطاقة الحرارية المفقودة في التطبيقات البحرية

د. نبيل غدير*

د. وفاء رجب**

وردشان سلمان***

(تاريخ الإيداع 9 / 1 / 2020. قُبِلَ للنشر في 14 / 6 / 2020)

□ ملخص □

تم التحقق في هذا البحث من إمكانية تطبيق دورة رانكن العضوية كنظام لاستعادة الطاقة الحرارية المفقودة (ORC- WHRS) لغاز العادم الصادر عن المحركات البحرية، حيث تم تحليل الموائع العضوية الموجودة مكتبة Fluid Prop باستخدام برنامج Cycle-Tempo، واخترنا أكثر 5 موائع لديها القدرة على استرجاع الطاقة، وتم باستخدام الماتلاب تحليل نماذج محطات معدلة من نموذج ديناميكي بخاري إلى نموذج دورة رانكن العضوية البسيطة الملائمة للموائع الرطبة وقد أظهر قدرة استرجاع بنسبة 3.0%، وأظهر نموذج دورة رانكن المسترجعة للحرارة الملائمة للموائع الجافة قدرة استرجاع بنسبة 3.2%.

كما تم إجراء تحليل مؤشرات النماذج الديناميكية لدراسة تأثير تغيير بارامترات مدخلات النموذج على مخرجاته، وهي الضغط، ودرجة الحرارة، ومعدل التدفق الكتلي، حيث لوحظ أنه لا يوجد تأثير يذكر لمدخلات الضغط على مخرجات النموذج، على عكس كلا من درجة الحرارة ومعدل التدفق الكتلي التي أظهرت تغيرات مخرجات النموذج موافقة لتغيرات مدخلاته.

الكلمات المفتاحية: دورة رانكن العضوية، غاز العادم، دورة رانكن العضوية كنظام لاستعادة الطاقة المفقودة.

* أستاذ - قسم القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** مدرسة - قسم الوقاية البيئية-المعهد العالي لبحوث البيئة-جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

*** طالبة ماجستير - قسم الوقاية البيئية-المعهد العالي لبحوث البيئة-جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة:

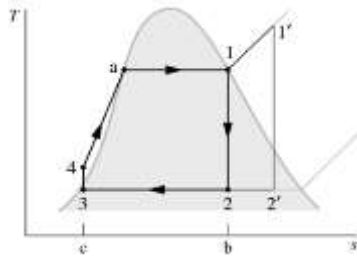
حُدثت انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون التي تسببها الأنشطة البشرية كواحدة من العوامل الرئيسية لتغير المناخ والاحتباس الحراري العالمي حيث تعد السفن مصدراً هاماً لهذه الانبعاثات في الغلاف الجوي [1]. يمكن التخفيف من هذه الآثار السلبية عبر تخفيضها من خلال وسائل تصميمية أو تشغيلية متعددة، وتعد تقنية استعادة الطاقة الحرارية المفقودة (Waste heat recovery (WHR)) إحدى هذه الوسائل حيث يتحقق ذلك من خلال تحسين الكفاءة الكلية للوقود المستخدم في السفن البحرية. وستزيد استعادة الطاقة الحرارية المفقودة من محركات الديزل البحرية كفاءة الطاقة الكلية في السفينة [2].

وتخضع أنظمة استعادة الطاقة الحرارية المستخدمة في التطبيقات البحرية إلى تحديات عديدة مثل التشريعات القانونية وقيود المساحة والوزن والمخاطر وغيرها، لذلك لا بد أن تتمتع هذه الأنظمة المستخدمة في التطبيقات البحرية بالميزات التالية [3]:

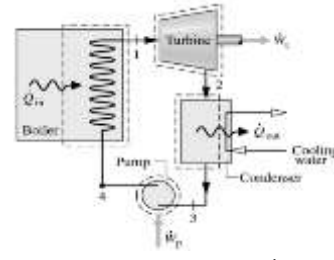
- الاستخدام الفعال للحرارة المفقودة بكثافة طاقة عالية وآثار بيئية قليلة.
- القدرة على التشغيل في مجال واسع من الظروف التشغيلية.
- القدرة على التعامل مع خصائص مصدر الحرارة الانتقالية.
- سهولة الاندماج مع الأنظمة الأخرى والموثوقية العالية.
- سهولة وأمان التشغيل والصيانة.

تعد تقنية دورة رانكن (RC) Rankin cycle واحدة من الأنظمة ذات التشغيل البسيط والقادرة على تلبية هذه القيود والشروط ويعد نوع مائع التشغيل المستخدم في هذا النظام من أهم العوامل التي تحدد درجة بساطة التشغيل ومخطط المحطة وحجمها [4]. يعتمد اختيار مائع التشغيل المناسب على درجة حرارة مصدر الحرارة المفقودة من المحرك البحري عند حمولات تشغيل متنوعة ويجب أن يتمتع هذا المائع بتطابق حراري أفضل بين الحرارة المفقودة ودرجات حرارة مياه التبريد للحصول على أداء كارنو Carnot الأعظمية الممكنة [5].

دورة رانكن (RC): تعد دورة (RC) التي تستعمل المياه كمائع التشغيل المقاربة الأكثر واقعية لدورة كارنو حيث يتم استعمالها عالمياً لتوليد الطاقة الكهربائية [6]. يلعب مائع التشغيل دوراً هاماً في دورة رانكن حيث تعتمد كفاءة النظام وظروف التشغيل والشروط البيئية والفعالية الاقتصادية على مائع التشغيل. ويجب أن يكون مناسباً ترموديناميكياً لعمل المحطة مثل خصائص التبخر والتكاثف، كما يجب ألا يمتلك فقط خصائص الاستقرار الكيميائي الملائمة في مجال درجة الحرارة المرغوبة ولكن أيضاً أن يمثل الخصائص الفيزيولوجية التي تلائم التطبيق. ويجب أن تشمل شروط اختيار مائع التشغيل خصائص نقل الحرارة مثل اللزوجة والناقلية الحرارية، ويأخذ بعين الاعتبار أيضاً الخصائص الأخرى مثل التآكل والسمية وغيرها. تعد درجة الحرارة الحرجة والضغط مؤشرات مهمة من أجل اختيار مائع التشغيل، كما تُعد نقطة تجمد مائع التشغيل خاصية أخرى مهمة عند اختيار المائع. ويجب أن يعمل مائع التشغيل ضمن مجال الضغط المقبول حيث تعد الضغوط العالية شديدة التأثير على مقدرة عمل الدارة أو زيادة تكلفة المحطة [7]. يوضح الشكل (1) مبدأ عمل ونقل الحرارة في دورة رانكن (RC)، وتمثل الدورة المثالية في الشكل (2).



الشكل (2) مخطط الحرارة-الأنثروبي لدورة رانكن المثالية [8]



الشكل (1) مبدأ عمل ونقل الحرارة في دورة رانكن [8]

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى استقصاء تقنية دورة رانكن العضوية (ORC)، واستنباط منهجية اختيار وتحليل المائع، وتطوير نماذج دورة رانكن العضوية الديناميكية وتحليل تطبيقها على متن السفن كطريقة لاستعادة الحرارة المفقودة في المحركات البحرية، وبذلك الاستفادة من الطاقة الحرارية المفقودة من غازات العادم مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الوقود وتقليل التلوث. تتبع أهمية البحث كونه يتناول تصميم منهجية خاصة تسمح باختيار الموائع وتصميم المحطة للوصول إلى التجميع الأمثل استناداً للطاقة الحرارية المفقودة المتوفرة والعوامل المختارة، لفهم قدرة وسلوك (ORC-WHRS) لتطبيقها على متن السفن البحرية السورية.

طرائق البحث ومواده:

المرحلة الأولى: تتضمن اختيار المائع؛ أي إعداد منهجية من أجل إيجاد المائع الأنسب ومخطط المحطة الخاصة به بالاعتماد على المعايير التي يتم اختيارها؛
المرحلة الثانية: يتم فيها بناء النموذج الديناميكي الأبسط لمحطة دورة رانكن العضوية عبر تعديل نموذج محطة دورة رانكن البخارية SRC الموجودة حالياً، وتطوير نموذج ديناميكي لمحطة دورة رانكن العضوية المسترجعة للطاقة من النموذج الديناميكي الأبسط لمحطة ORC؛
المرحلة الثالثة: تتضمن تحليل مؤشرات مدخلات النموذج الديناميكي أي تحليل كيف أن تغيير بارامترات مدخلات النموذج قد يؤثر على مخرجاته.

النتائج والمناقشة:

للحصول على هدف هذا البحث تم ما يلي:

المرحلة الأولى: نفذت التحليلات لكل مائع عضوي باستخدام برنامج الترموديناميك Cycle-Tempo 5.0 ومكتبة خصائص المائع Fluid Prop 2.4 مأخوذ بعين الاعتبار غاز العادم لمحرك بحري في حالتي الغاز والديزل، حيث استعملت بيانات عادم المحرك لحساب وتحليل أداء وحجم ومخطط محطة ORC-WHR، وحددت مدخلات كل مكون من مكونات محطة ORC في برنامج Cycle-Tempo 5.0 إلى جانب بيانات غاز العادم وبيانات مياه البحر من أجل إكمال التحليل بنجاح.

أُخذت البيانات لغاز العادم من محرك ثنائي الوقود Wärtsilä 6L50DFDE لتحديد مواعيد التشغيل الوظيفية، أُخذ كل من حالتي المحرك الغاز والديزل بعين الاعتبار من أجل التحليل لأن نواتج احتراق غازات العادم في الحالتين غير متشابهتين.

يوضح الجدول (1) بيانات الحرارة المفقودة لغاز العادم عند نقاط تحميل مختلفة للمحرك في حالتي الغاز والديزل، لا بد من الحصول على التدفق الكتلي ودرجة الحرارة عند ضغط ثابت من أجل قياس الطاقة الحرارية المتوفرة في أي مائع.

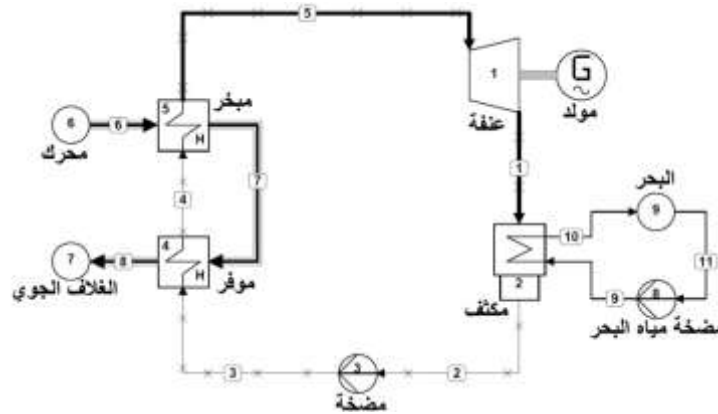
الجدول (1) التدفق الكتلي ودرجة حرارة غاز العادم عند حمولات مختلفة [9]

نموذج المحرك				
حالة الغاز		حالة الديزل		الحمولة
Massf. [Kg/s]	Temp. [C°]	Massf. [Kg/s]	Temp. [C°]	Load [%]
9.4	373	11.6	343	100
7.1	424	9	351	75
5.4	426	6.3	385	50

افترضنا في التصميم أن درجة حرارة العادم عند مخرج المرجل تساوي (165C°) ، ولقد اختيرت درجة الحرارة هذه لأنها أعلى قليلاً من نقطة تكاثف حمض ثاني أكسيد الكبريت والذي يمكن أن يكون أحد مركبات الغاز بالاعتماد على نوع الوقود المستخدم. تمت المحافظة على ظروف أولية أخرى ثابتة بهدف تحليل أداء الموائع العضوية المختلفة من أجل فرز المائع مثل ضغط البخار عند (30 bar)، ودرجة حرارة التكثيف مساوية (40C°)، وتثبت درجة حرارة مياه البحر للتبريد عند درجة الحرارة (25C°).

الفرز الأولي: صممت محطة ORC من أجل تنفيذ الفرز الأولي للموائع العضوية المتوفرة بالاعتماد على تصميم هذه المحطة تم التوصل إلى بيانات مدخلات العناصر وبيانات مائع التبريد والتسخين والموائع التشغيلية وبالتالي نفذ التحليل كما هو مرغوب.

يوضح الشكل (3) مخطط المحطة الأبسط التي اعتمدت لتحليل وتحديد مواعيد التشغيل العضوية الممكنة ويتشابه مخطط تصميم هذه المحطة ORC مع مبدأ تصميم دورة رانكن، مع ملاحظة أن عنصر المرجل في مخطط ORC البسيطة قد قسم إلى مبادلين حراريين اثنين (الموفر والمبخر) يعملان كعنصر مرجل واحد. ترفع درجة حرارة المائع العضوي في الموفر من درجة حرارة التكثيف إلى درجة حرارة التبخير عند ضغط ثابت من خلال امتصاص الحرارة المحسوسة من غاز العادم وتبقى الحالة الفيزيائية للمائع العضوي غير متغيرة (حالة سائلة). أما في المبخر فتتغير الحالة الفيزيائية للمائع العضوي من السائل إلى البخار المشبع عند درجة حرارة ثابتة (درجة التبخير).



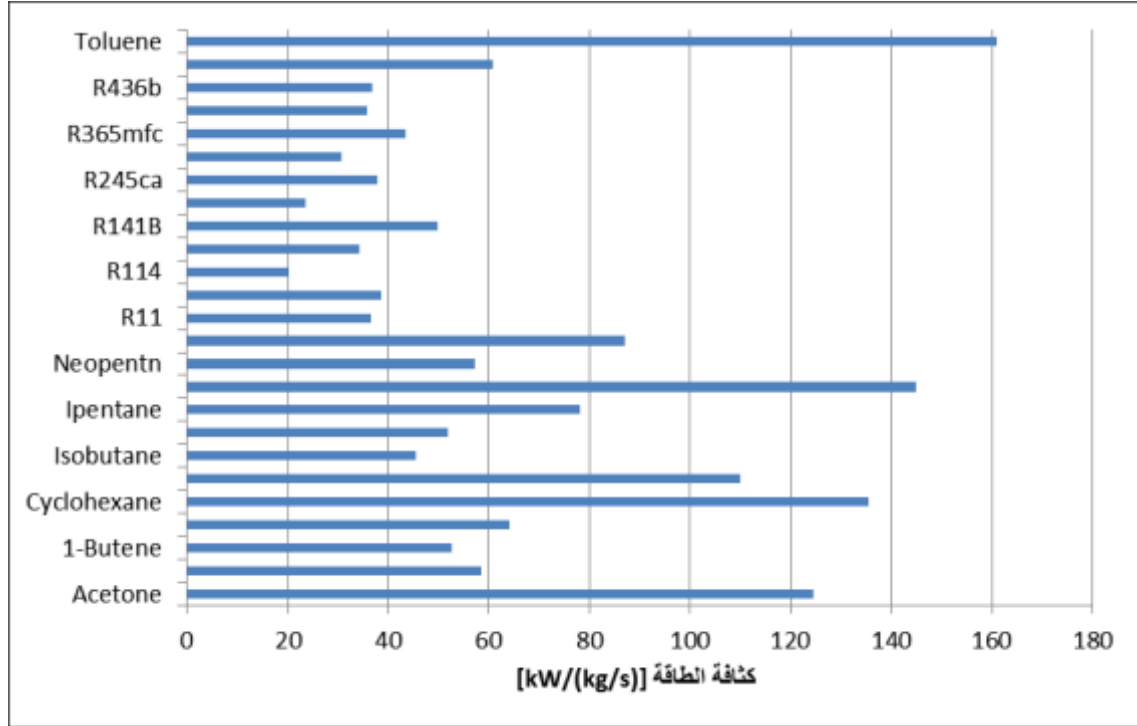
الشكل (3) مخطط ORC البسيطة

بالاعتماد على مخطط محطة ORC البسيطة (الشكل 3)، وغاز عادم مائع التسخين (الجدول 1) ومياه البحر كمائع التبريد وبيانات الإدخال، حُللت جميع الموائع المتوفرة في نموذج محطة ORC البسيطة في برنامج Cycle-Tempo، بالاعتماد على هذا التحليل يمكن أن تكمل الموائع العضوية الموضحة في الجدول (2) دورة الترموديناميك ضمن مجال درجات الحرارة المستفاد منها من أجل هذا التطبيق.

الجدول (2) قائمة الموائع التشغيلية ضمن مجال درجة الحرارة المستفاد منها

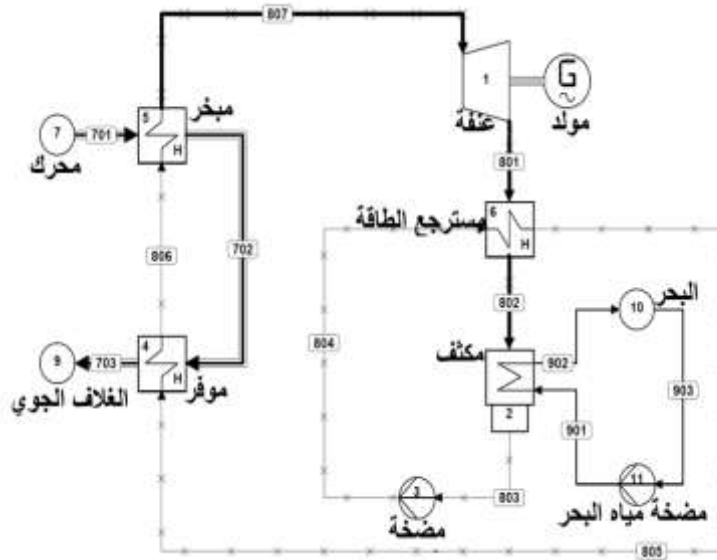
الموائع التشغيلية				
one Ace	Cyclohexane	Methylcyclohexane	R113	R236ea
tane B	e Cyclopenta	Neopentane	R114	5ca R2
1-Butene	Isobutane	Pentane	R123	R245fa
Cis-2-Butene	Ibutene	R11	R141B	R365mfc
Ipentane	R436a	R436b	Toluene	T2Butene

معييار الاختيار: ليست جميع موائع التشغيل التي تم التوصل إليها ملائمة للاستخدام على متن السفن بسبب تأثير المائع المستخدم على تصميم المحطة وحجمها، حيث يعد الحجم أحد المعايير التصميمية المقيدة في التطبيقات البحرية، وتؤخذ كثافة طاقة محطة ORC-WHR كمعييار فرز من أجل فرز الموائع التشغيلية، كما هو موضح في الجدول (2)، وتقاس كثافة الطاقة بوحدة $(kW/(kg/s))$ وتقارن الموائع التشغيلية بالاعتماد على معادلة كثافة الطاقة هذه. تمت ملاحظة أن عدداً قليلاً من الموائع العضوية أظهرت كثافة طاقة أكبر من البقية وهي ما أطلقنا عليها اسم الموائع الواعدة: التولوين والبنتان الحلقي وميتيل الهكسان الحلقي والأسيتون والهكسان الحلقي. ويظهر الشكل (4) كثافة الطاقة المحتواة لكل مائع من الموائع التشغيلية.



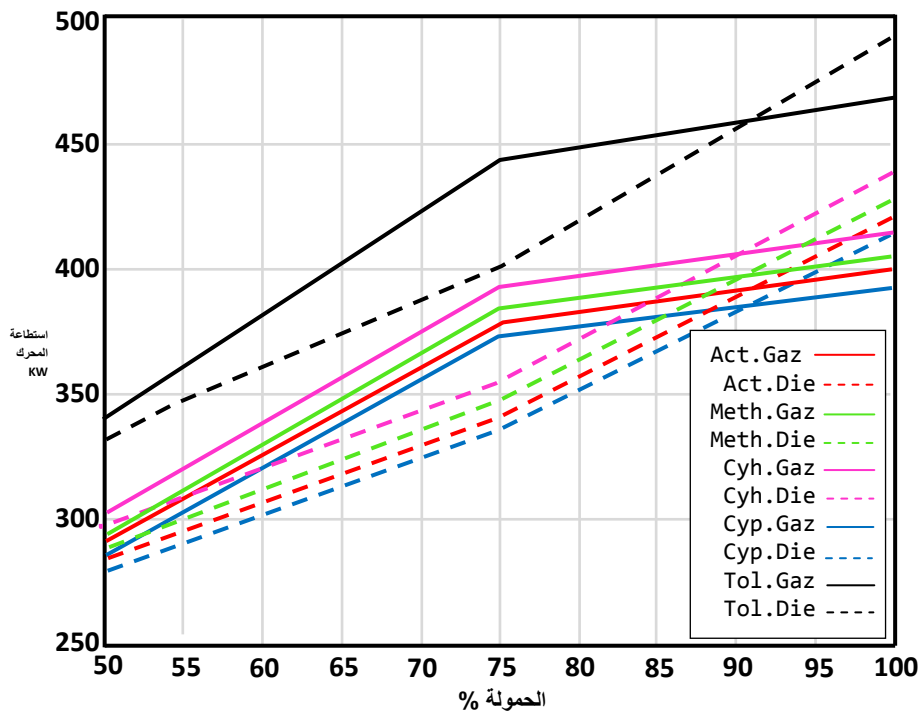
الشكل (4) مقارنة الموائع التشغيلية بالاعتماد على كثافة الطاقة (Kw/(kg/s))

إعادة التحليل الأولي: تم تعديل محطة ORC البسيطة للحصول على محطة ORC المسترجعة للحرارة التي تتضمن مسترجع للطاقة وهو عبارة عن مبادل حراري يسمح بانتقال الحرارة بين مائع التشغيل بعد المضخة ومائع التشغيل بعد التوربين، يخفض هذا العنصر تدفق كتلة مائع التبريد في المكثف وبالتالي يخفض كمية الطاقة الحرارية الضائعة عبر مائع التبريد، بالإضافة إلى إنه يزيد درجة حرارة مائع التشغيل قبل مدخل المرجل الأمر الذي يزيد من كفاءة المحطة ويخفض حجم المكثف أيضاً، ويظهر الشكل (5) مخطط محطة ORC المسترجعة للطاقة الملائمة للموائع الجافة.

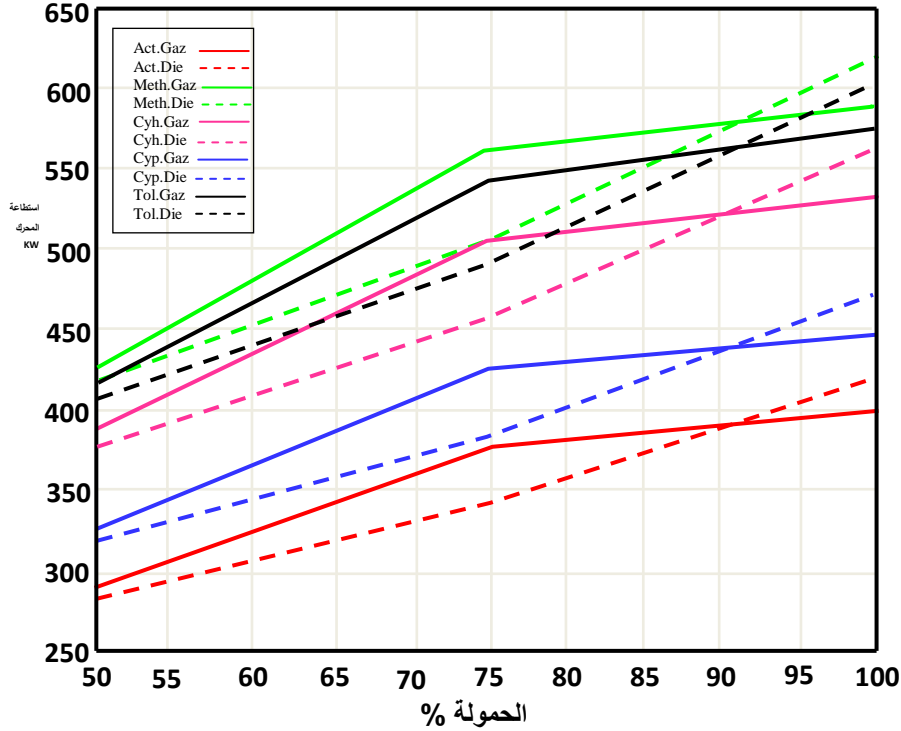


الشكل (5) مخطط ORC المسترجعة للطاقة

التحليل الستاتيكي: يظهر الشكل (6) والشكل (7) قدرة توليد الطاقة الحقيقية للموائع في محطة ORC المسترجعة للحرارة بالمقارنة مع الموائع نفسها في محطة ORC البسيطة من أجل مدخلات الحرارة نفسها، لوحظ أن ميتيل الهكسان الحلقي Methylcyclohexane يمتلك كمائع تشغيل القدرة الأعلى على توليد الطاقة من غاز العادم وليس التولوين toluene كما في محطة ORC البسيطة، كما لوحظ أن الموائع المختلفة تمتلك قدرات مختلفة على توليد الطاقة من أجل المدخل الحراري نفسه في محطة ORC، وبغض النظر عن المائع المستخدم يشابه اتجاهات توليد الطاقة بواسطة ORC-WHR في الحالة الغازية وحالة الديزل مع اتجاهات مدخلات الطاقة الحرارية إلى ORC-WHR في الحالة الغازية وحالة الديزل على التوالي، وأيضا لوحظ أنه من أجل بيانات الحرارة المفقودة نفسها والشروط الأولية تنتج جميع الموائع العضوية في محطة ORC المسترجعة للطاقة أكثر مقارنة بالموائع العضوية نفسها في محطة ORC البسيطة.



الشكل (6) الطاقة المتولدة في محطة ORC البسيطة

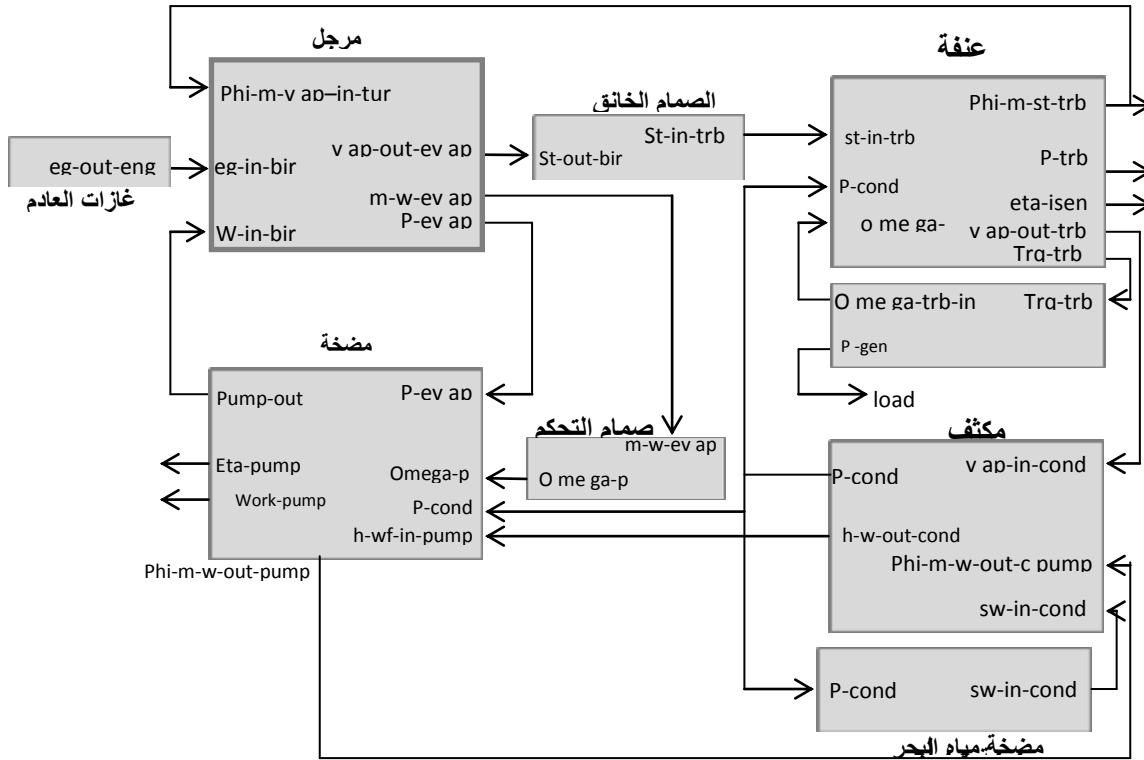


الشكل (7) الطاقة المتشكلة في محطة ORC المسترجعة للطاقة

المرحلة الثانية: تمت نمذجة محطة ORC في محاكي Matlab-Simulink، بعد تحديد مخطط المحطة وتحليل الموائع المحتملة بالاعتماد على كثافة الطاقة. استعملت هذه النماذج لتحليل أداء تصميم المحطة بالاعتماد على حمولات المحرك المتغيرة، كما استعملت مكتبة Fluid Prop و Matlab لحساب الخصائص الترموديناميكية للمائع خلال عملية المحاكاة.

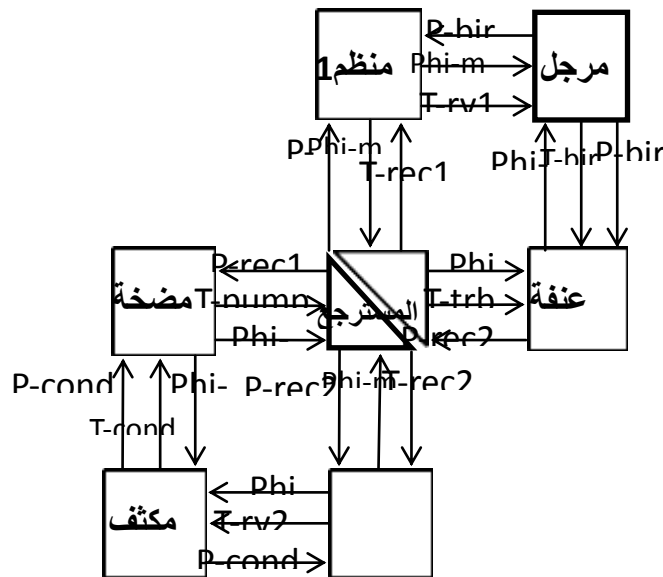
تعديل المحطة: يتطلب تعديل نموذج محطة رانكن البخارية إلى نموذج ORC إزالة بعض المكونات مثل الدائرة البخارية (لا تتطلب ORC الخط البخاري أو خط إعادة التدوير، والسبب في ذلك يعود لامتلاك الموائع العضوية فرق كثافة بين حالتها البخارية والسائلة أصغر من البخار والماء، وخاصة من أجل الموائع العضوية ذات الوزن الجزيئي الأعلى [10]، ونازع الهواء (تتمتع موائع التشغيل الواعدة بضغط الإشباع الخاصة بها عند درجات حرارة التكثيف القريبة من الضغط الجوي التي تسهل دورتها في محطة ORC من دون نازع الهواء) [11]، وأيضا إزالة عناصر أخرى مثل سخان HT الطاقة الحرارية المفقودة نظراً لجودته الطاقية المنخفضة نسبياً فيما يتعلق بغاز العادم، كما يزال أيضاً التحميص لأنه لا يحقق أي فائدة واضحة في محطة ORC من حيث الكفاءة الحرارية أو شروط التوسع، وتزال أيضاً بعض المضخات الإضافية بما أن النظام يعمل وفقاً لضغط المكثف أو المبخر في المبادلات الحرارية ولا يمتلك أي ضغط وسطي في النظام.

تعتمد وتبنى نماذج ORC على كتل توازن عناصر (الموفر والمبخر ومسترجع الحرارة والمكثف، استعمل عنصر الحجم لحساب الضغط ودرجة الحرارة في العنصر مع توازن الكتلة والطاقة) وعناصر (المضخات والتوربينات والصمامات، واستعمل العنصر المقاومة لحساب التدفق الكتلّي خلال النظام ودرجة حرارة المخرج كنتيجة اختلاف الضغط ودرجة

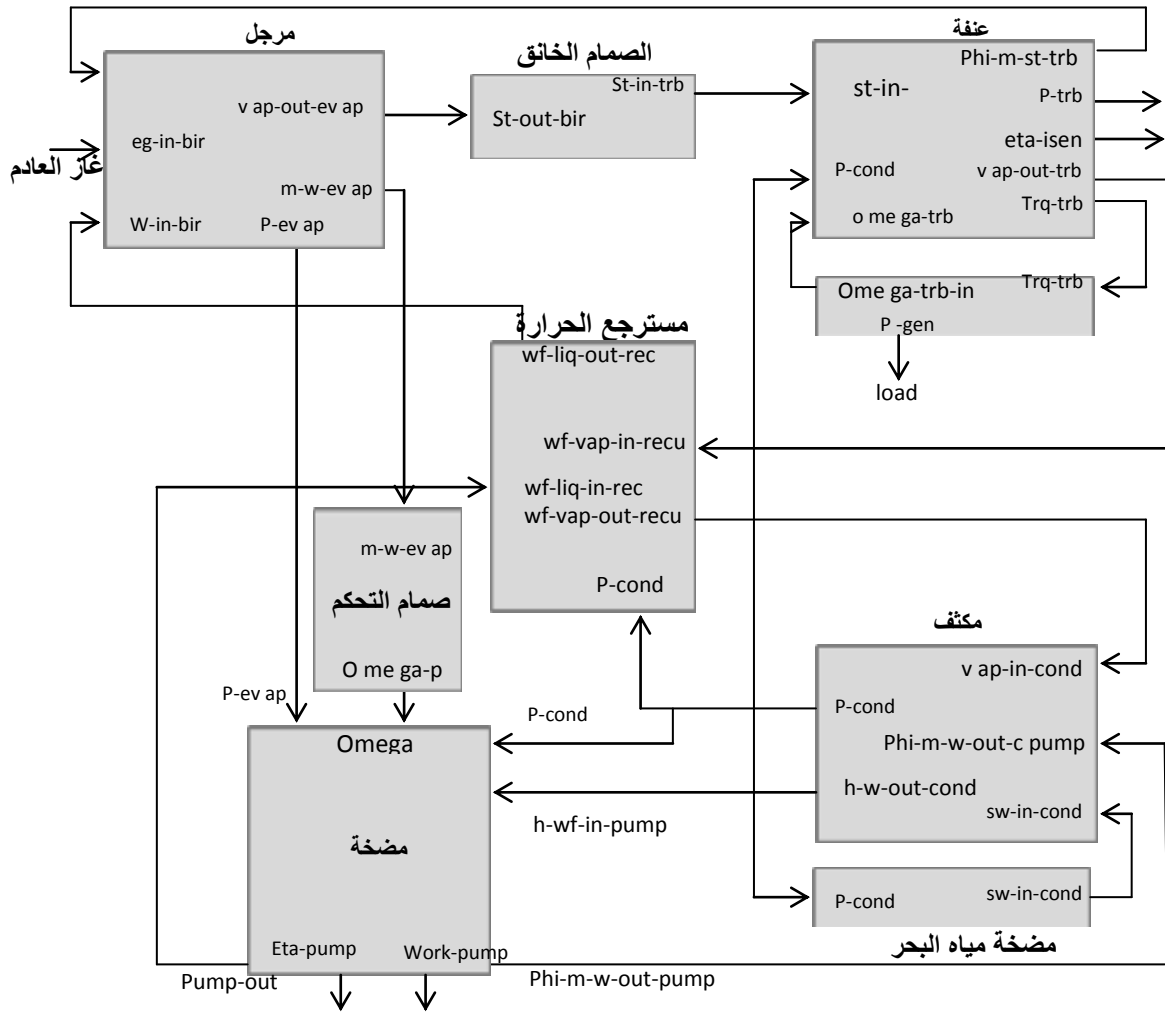


الشكل (9) نموذج simulink لمحطة ORC البسيطة

يتشابه نموذج المحطة المسترجعة للطاقة وطريقة النمذجة مع نموذج محطة ORC البسيطة على الرغم من الإضافات والتعديلات القليلة. يوضح الشكل (10) التمثيل لمحطة ORC المسترجعة للطاقة والشكل (11) نموذج Simulink لهذه المحطة حيث يبنى نموذج محطة ORC المسترجعة للطاقة بواسطة إضافة مسترجع الطاقة إلى نموذج محطة ORC البسيطة مع تعديل المكثف.



الشكل (10) العلاقة السببية لـ ORC المسترجعة للطاقة



الشكل (11) نموذج simulink لمحطة ORC المسترجعة للطاقة

المرحلة الثالثة: دراسة تغير بارامترات مدخلات النموذج وتأثيرها على مخرجات النموذج [13]، ويمكن أن يكون هذا النموذج نموذجاً رياضياً أو يمثل نظاماً أو يكون النموذج كما في دراستنا هو محطة ORC-WHRS. ينفذ هذا التحليل لنموذج ORC-WHRS لتحليل أداء ORC وبارامترات النموذج فيما يتعلق بتغيرات مدخلاته، بما أن نموذج محطة ORC في حالة الدراسة استعمل لاستعادة الحرارة المفقودة لغاز العادم من محركات الديزل البحرية فإن بارامترات مدخلات النموذج لنظام ORC هي بارامترات غازات عادم المحرك وهي الضغط ودرجة الحرارة والتدفق الكتلي. وأبقيت البارامترات الأخرى ثابتة من أجل تحليل تأثير كل بارامتر من بارامترات الإدخال على مخرجات النموذج.

الضغط المتغير Varying Pressure: غُيّر ضغط غاز العادم وأبقيت بقية البارامترات ثابتة، ونفذ هذا التحليل من أجل نقاط الضغط المتغيرة من 0.5 بار إلى 1.05 بار. يظهر الجدول (3) نتائج بارامترات مخرجات النموذج من أجل الضغط المتغير لغاز العادم في محطة ORC-WHRS، ويمكن ملاحظة أنه لا تتأثر مخرجات النموذج عند تغيير مدخلات ضغط غاز العادم، وقد يكون ذلك لأن مجال الضغط المتغير المستعمل في هذا التحليل صغيراً ليحقق أي تغيرات مهمة على مخرجات النموذج، ولكن على أي حال يعد هذا المجال المستعمل مجالاً واقعياً لمحركات الديزل البحرية.

الجدول (3) تحليل الحساسية لنموذج محطة ORC البسيطة من أجل ضغط غاز العادم المتغير

P_{eg} [bar]	P_{Gen} [KW]	P_{Net} [KW]	η_{Net} [%]	$\phi_{m,wf}$ [Kg/s]	$\phi_{m,sw}$ [Kg/s]	$\phi_{q,cond}$ [MW]	$\phi_{q,econ}$ [MW]	$\phi_{q,evap}$ [MW]	P_{evap} [bar]	P_{cond} [bar]
1.05	404.53	381.46	10.66	3.37	43.02	1.81	1.41	0.81	29.92	0.57
1.046	404.53	381.46	10.66	3.37	43.02	1.81	1.41	0.81	29.92	0.57
1.037	404.53	381.46	10.66	3.37	43.02	1.81	1.41	0.81	29.92	0.57
1.03	404.53	381.46	10.66	3.37	43.02	1.81	1.41	0.81	29.92	0.57
1.022	404.53	381.46	10.66	3.37	43.02	1.81	1.41	0.81	29.92	0.57
1.02	404.53	381.46	10.66	3.37	43.02	1.81	1.41	0.81	29.92	0.57
0.5	404.53	381.46	10.66	3.37	43.02	1.81	1.41	0.81	29.92	0.57

درجة الحرارة المتغيرة **Varying Temperature**: غيّرت درجة حرارة غاز عادم المحرك لفهم تأثير حالة عدم الموثوقية في درجة حرارة غاز العادم على مخرجات أداء نموذج ORC، بينما أبقيت العوامل الأخرى ثابتة ونفذ هذا التحليل من أجل نقاط درجة الحرارة المتغيرة من (350C° إلى 500C°).

يوضح الجدول (4) نتائج بارامترات مخرجات النموذج من أجل درجات حرارة غاز العادم المتغيرة في محطة ORC-WHRS ويلاحظ من النتائج امتلاك عدم موثوقية مدخلات درجة حرارة العادم تأثيراً مهماً على مخرجات النموذج على عكس ما لوحظ في حالة الضغط المتغير، يلاحظ من الجدول ازدياد الحرارة المنتقلة في المبادل الحراري والتدفق الكتلي في مائع التشغيل وضغط المبخر بزيادة درجة حرارة غاز العادم كما تعد الطاقة المنتجة بواسطة ORC-WHRS والمحسوبة بالعلاقة :

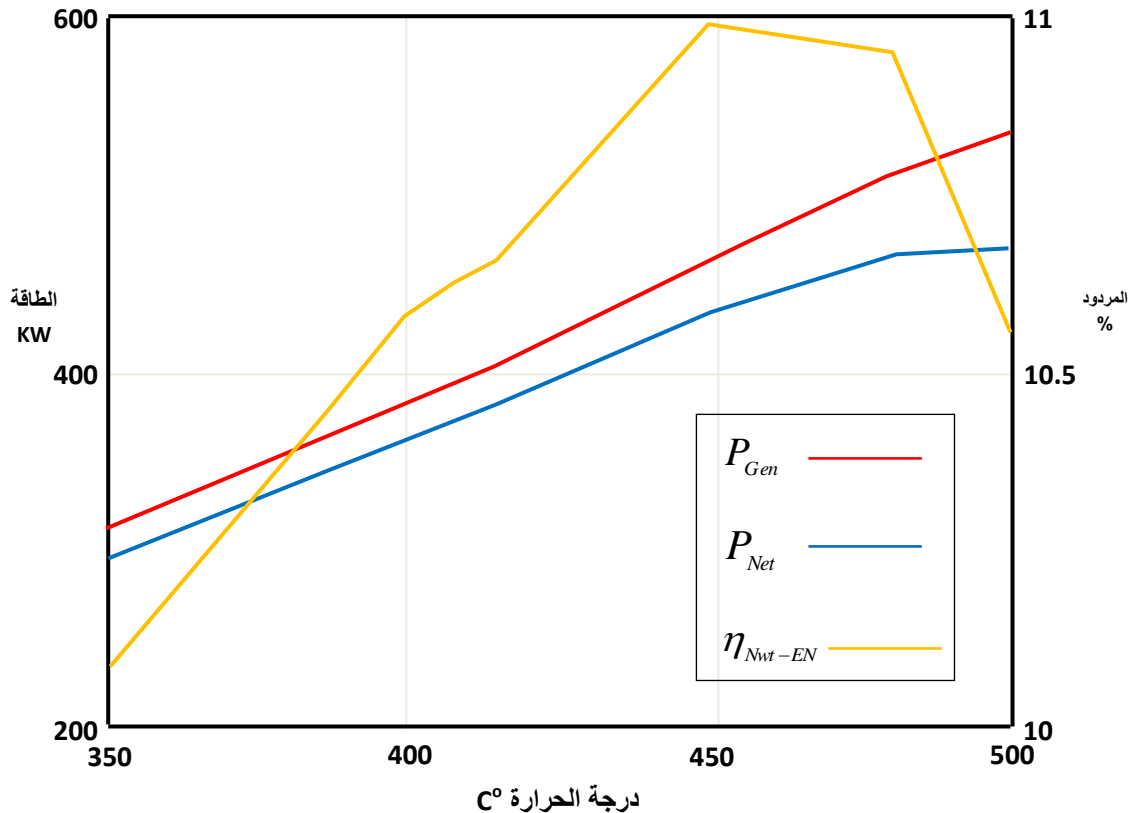
$$P_{Net} = P_{Gen} - (P_{Pump} + P_{SW-Pump})$$

حيث أن P_{Net} هي الطاقة المنتجة الكلية، P_{Gen} الطاقة المنتجة بواسطة التوربين، P_{Pump} الطاقة الكهربائية المطلوبة من أجل مائع التشغيل، P_{SWPump} الطاقة الكهربائية المطلوبة من أجل مضخات مياه البحر للتبريد. وكفاءة المحطة مخرجات النموذج الأكثر أهمية لتحليل الحساسية، لذا تم التركيز على هذه المخرجات بشكل كبير لأنهما تحددان الأداء الفعلي للنموذج.

الجدول (4) تحليل الحساسية لنموذج محطة ORC البسيطة من أجل درجة حرارة غاز العادم المتغيرة

$T_{eg,in}$ [C]	P_{Gen} [Kw]	P_{Net} [Kw]	η_{Net} [%]	$\phi_{m,wf}$ [Kg/s]	$\phi_{m,sw}$ [Kg/s]	$\phi_{q,cond}$ [MW]	$\phi_{q,econ}$ [MW]	$\phi_{q,evap}$ [MW]	P_{evap} [bar]	P_{cond} [bar]
500	535.71	469.35	10.54	4.61	86.31	2.42	1.82	1.13	37.88	0.63
481	511.09	465.48	10.94	4.30	86.31	2.27	1.73	1.05	36.08	0.60
450	464.17	432.38	10.99	3.84	74.10	2.05	1.58	0.94	33.17	0.57
415	404.53	381.46	10.66	3.37	43.02	1.81	1.41	0.81	29.92	0.57
408	394.92	372.81	10.62	3.29	39.99	1.77	1.38	0.79	29.39	0.57
400	383.83	362.74	10.58	3.21	36.89	1.73	1.34	0.76	28.78	0.57
350	312.19	296.04	10.08	2.68	23.12	1.45	1.10	0.58	24.72	0.57

يوضح الشكل (12) الطاقة المتغيرة ومردود المحطة ORC-WHRS فيما يتعلق بتغير درجة حرارة العادم ويمكن ملاحظة أن مخرجات الطاقة للمولد تزداد بازدياد درجة الحرارة. بما أن الطاقة الصافية تمثل الاسترداد الفعلي لنظام ORC، فإن الطاقة الصافية للنظام تزداد بازدياد درجة حرارة غاز العادم كما هو موضح في الشكل نفسه حتى درجة الحرارة (450C°) تقريباً ثم تتناقص تدريجياً هذه الزيادة في الطاقة الصافية بعد درجة الحرارة (450C°) بازدياد درجة حرارة غاز العادم وتصبح تقريباً ثابتة وخاصة بين (480C° و 500C°)، ويعود السبب في ذلك إلى عاملين رئيسيين يؤثران في قدرة التوربين وقدره المضخة.



الشكل (12) تحليل الحاسوبية لنموذج ORC البسيطة من أجل درجة الحرارة المتغيرة على الطاقة المنتجة وكفاءة المحطة

يتمثل العامل الأول بالحد المفروض على معدل التدفق الكتلي لمائع التبريد ليكون قادراً على المحافظة على الضغط المرغوب للمكثف ودرجة الحرارة حيث تزداد حمولة المكثف بازدياد درجة حرارة غاز العادم لكن حتى الحد فقط، ويزداد ضغط التكثيف ودرجة الحرارة أيضاً بعد درجة حرارة غاز العادم المحددة (450C°)، وهذا يؤثر على عملية فتحة التوربين من خلال تخفيضه من درجة الحرارة التبخير إلى زيادة درجة حرارة المكثف وبالتالي يؤدي ذلك إلى تخفيض في طاقة التوربين المتولدة لمحطة ORC-WHRS.

ثانياً فيما يتعلق بالعوامل المؤثرة بأداء المضخة، تعود زيادة قدرة المضخة إلى الزيادة السريعة في ضغط المبخر بسبب زيادة درجة حرارة غاز العادم، تؤدي هذه الزيادة السريعة إلى زيادة فرق الضغط عبر المضخة تؤدي هذه الزيادة إلى زيادة في قدرة المضخة اللازمة لتنفيذ عملية محطة ORC في نموذج المحطة من أجل WHR، تؤدي هذه الزيادة في

قدرة المضخة إلى تخفيض مخرجات الطاقة الصافية للنظام، وينعكس انخفاض مخرجات الطاقة الصافية على منحنى كفاءة الطاقة الصافية.

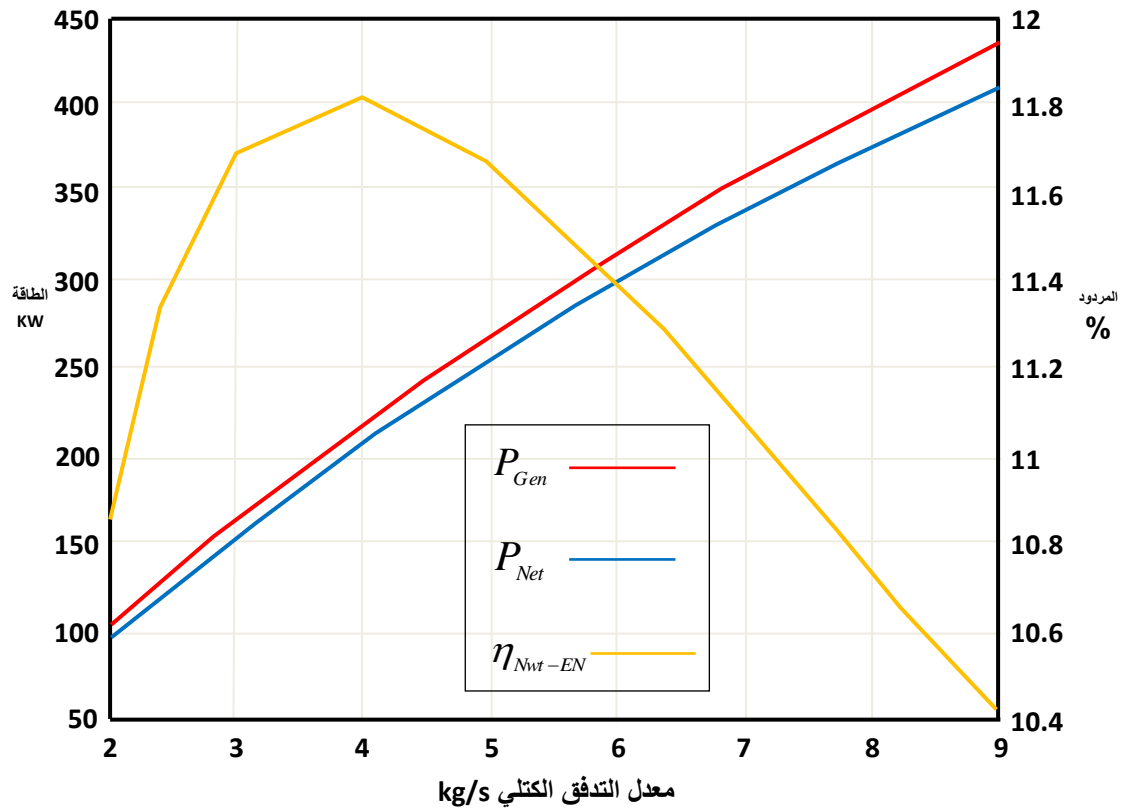
معدل التدفق الكتلي المتغير Varying Mass-Flow Rate: غير معدل التدفق الكتلي لغاز عادم المحرك بينما أبقيت العوامل الأخرى ثابتة. نفذ هذا التحليل من أجل عدة قيم لمعدل التدفق الكتلي من 2kg/s إلى 9kg/s. يوضح الجدول (5) نتائج مخرجات النموذج من أجل قيم معدل التدفق الكتلي المتغيرة في محطة ORC-WHRS. يلاحظ أن طاقة المولد والطاقة الصافية في ازدياد بزيادة معدل التدفق الكتلي لغاز العادم. على أي حال، لا تنعكس هذه الزيادة على كفاءة الطاقة الصافية للمحطة حيث توضح منحنيات الاتجاه في الشكل (13).

الجدول (5) تحليل الحساسية لنموذج محطة ORC البسيطة من أجل معدل التدفق الكتلي المتغير لغاز العادم

$\dot{\phi}_{m,eg}$	P_{Gen}	P_{Net}	η_{Net}	$\dot{\phi}_{m,wf}$	$\dot{\phi}_{m,sw}$	$\dot{\phi}_{q,cond}$	$\dot{\phi}_{q,econ}$	$\dot{\phi}_{q,evap}$	P_{evap}	P_{cond}
[Kg/s]	[KW]	[KW]	[%]	[Kg/s]	[Kg/s]	[MW]	[MW]	[MW]	[bar]	[bar]
9	435.83	408.99	10.41	3.61	55.88	1.93	1.53	0.84	31.64	0.57
8.2	404.53	381.46	10.66	3.37	43.02	1.81	1.41	0.81	29.92	0.57
8	396.98	374.67	10.73	3.31	40.61	1.78	1.38	0.80	29.51	0.57
7	357.46	338.46	11.08	3.01	30.78	1.62	1.22	0.76	27.30	0.57
6.6	340.77	322.92	11.21	2.89	27.62	1.56	1.15	0.74	26.36	0.57
6	314.75	298.46	11.39	2.70	23.49	1.46	1.05	0.70	24.87	0.57
5	268.49	254.51	11.66	2.36	17.82	1.28	0.88	0.65	22.15	0.57
4	218.16	206.26	11.81	2.00	13.24	1.08	0.70	0.58	19.08	0.57
3	163.10	153.18	11.70	1.61	9.39	0.87	0.51	0.50	15.55	0.57
2.4	127.49	118.76	11.34	1.34	7.33	0.72	0.39	0.45	13.15	0.57
2	102.58	94.71	10.85	1.16	6.03	0.62	0.31	0.41	11.39	0.57

بالاعتماد على الشكل (13) يلاحظ أن كفاءة الطاقة الصافية الأعظمية تقع عند (4 Kg/s) وتبدأ بالتناقص كلما ازداد معدل التدفق الكتلي لغاز العادم. عند تتبع هذا الاتجاه المتناقص يلاحظ أن أي زيادة في معدل التدفق الكتلي أعلى من (9 Kg/s) المحسوبة سيؤدي إلى تناقص أكثر في كفاءة الطاقة الصافية. سينعكس مثل هذا الاتجاه على الطاقة المتولدة ومخرجات الطاقة الصافية مما يؤدي إلى انخفاض تدريجي بسبب تأثيرات قدرة التوربين.

يتمثل العامل الذي يؤثر على قدرة التوربين في هذا التحليل بالعامل الأول نفسه الذي شرح في تحليل درجة الحرارة المتغيرة لكن قد لا يظهر ذلك بسرعة في تحليل معدل التدفق الكتلي لغاز العادم المتغير. يكمن السبب في ذلك في أن معدل زيادة ضغط المبخر لمعدل التدفق الكتلي المتغير لغاز العادم يكون أصغر عند مقارنته بالمعدل نفسه في تحليل درجة الحرارة المتغيرة.



الشكل (13) تحليل الحساسية لنموذج محطة ORC البسيطة من أجل معدل التدفق الكتلتي على الطاقة المنتجة وكفاءة المحطة

الاستنتاجات:

- يتم الاستنتاج من عدد التحليلات الستاتيكية أن درجة حرارة غازات العادم وتدفق كتلتها هو البارامتر الأكثر أهمية لإيجاد الموائع العضوية المناسبة لأي تطبيق، لذا تم وضع منهجية الاختيار في هذا البحث بالاعتماد على تلك المؤشرات لغازات العادم ومعياري الاختيار هو كثافة طاقة المحطة.
- الأسيتون هو المائع الأنسب للتطبيق البحري في محطة ORC البسيطة لأن درجة حرارة غاز العادم تؤثر على اختيار الموائع ومجال درجة حرارة غاز العادم في معظم المحركات البحرية متشابه، سيتبين الفرق الوحيد في حجم المحطة الذي يتأثر بمعدل تدفق كتلة غاز العادم، وفقاً للأسباب المذكورة، البنتان الحلقي هو أكثر الموائع ملاءمة للتطبيقات البحرية في محطة ORC المسترجعة للطاقة.
- بناء على برنامج المحاكاة والنتائج التي حصلنا عليها تمتلك محطات (ORC) البسيطة العاملة بالأسيتون طاقة صافية في المحطة بما يقارب 10.3%. وهذا يتناسب مع استعادة الطاقة للوقود بحوالي 3%. وقد ترتفع نسبة الطاقة المستردة عندما تكون حمولة المحرك منخفضة.
- وتمتلك محطات (ORC) البسيطة العاملة بالبنتان الحلقي طاقة صافية في المحطة بما يقارب 11.5%. يتناسب مع استعادة الطاقة للوقود بحوالي 3.2%.

- تغطي الموائع المتساوية الأنتروبي والموائع الجافة معظم الموائع العضوية المستخدمة في دورة رانكن، وبالتالي يمتلك هذين النموذجين مرونة في استخدامهما لدراسة معظم الموائع العضوية المستخدمة في ORC كنظام لاستعادة الطاقة الحرارية المفقودة.
- لوحظ في تحليل مؤشرات غاز العادم أن الشكوك فيما يتعلق بمدخلات ضغط العادم على مخرجات أداء النموذج تقريبا ليس لها أي تأثير.
- ولوحظ أيضا أنه يوجد تأثير ملحوظ في مخرجات النموذج إذا ما تم تغيير مدخلات درجة حرارة غاز العادم ومعدل التدفق الكتلي، مع ملاحظة أن معدل التغيير في مخرجات أداء النموذج إلى معدل التغيير في التدفق الكتلي لغاز لعادم أعلى من درجة حرارته.

الرموز المستخدمة:

التدفق الكتلي للموائع التشغيلية	$\phi_{m,vf}$	ضغط المكثف	P_{cond}
المردود الكلي	η_{Net}	ضغط المبخر	P_{evap}
الضغط الكلي	P_{Net}	الناقلية الحرارية للمبخر	$\phi_{q,evap}$
ضغط المولد	P_{Gen}	الناقلية الحرارية للموفر	$\phi_{q,econ}$
ضغط غازات العادم	P_{eg}	الناقلية الحرارية للمكثف	$\phi_{q,cond}$
درجة حرارة غازات العادم الداخلة	$T_{eg,in}$	التدفق الكتلي لمياه البحر	$\phi_{m,sw}$

- [1] FRIEDRICH, A; HEINEN, F; KAMAKATÉ, F; KODJAK, D. *Air pollution and greenhouse gas emissions from ocean-going ships: Impacts, mitigation options and opportunities for managing growth*. International Council on Clean Transportation (ICCT), 2007.
- [2] CIMAC Congress. *Energy Saving Technologies and New Analysis Methods in Cargo Ship Machinery Design*. Helsinki, 2016, 310.
- [3] SINGH, D; PEDERSEN, E. *A review of waste heat recovery technologies for maritime applications*. Energy Conversion and Management, 2016, 315–328.
- [4] SPROUSE, C; DEPCIK, C. *Review of organic rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery*. Applied Thermal Engineering, 2013, 711–722.
- [5] LINDSTAD, H. *Maritime shipping and emissions: A three-layered, damage-based approach*. Ocean Engineering, 2015, 94–101.
- [6] ZHANG, X; He, M; ZHANG, Y. *A review of research on the kalina cycle*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012.
- [7] LARSEN, U; PIEROBON, L; HAGLIND, F; GABRIELII, C. *Design and optimisation of organic rankine cycles for waste heat recovery in marine applications using the principles of natural selection*. 2013, 803–812.

- [8] MORAN, J. M; SHAPIRO, N. H. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 5th Edition, 2004, 325–372.
- [9] WÄRTSILÄ. *Product Guide Wartsila 50DF*, 1/2012. WARTSILA Engines, 2012.
<http://www.wartsila-hyundai.com/data/project_guide/Project_guide3>
- [10] ANDREASEN, J. G; MERONI, A; HAGLIND, F. *A comparison of organic and steam rankine cycle power systems for waste heat recovery on large ships*. 2017.
- [11] URIS, M; LINARES, J.I; ARENAS, E. *Techno-economic feasibility assessment of a biomass cogeneration plant based on an organic rankine cycle*. 2014, 707–713.
- [12] BOONEN, E.J. *Advanced waste heat recovery for 4-stroke diesel engines onboard ships*. TU Delft Master Thesis, 2009.
- [13] SALTELLI, A. *Sensitivity analysis for importance assessment*. Risk Analysis, 22(3), 2002, 579–590.