

## Studying the Effect of Adding a Thermoelectric Generator to a Hybrid Car System to Benefit from the Heat of Exhaust Gases

Dr. Nabil Gadeer\*  
Hiba Arous\*\*

(Received 6 / 3 / 2022. Accepted 26 / 4 / 2022)

### □ ABSTRACT □

The thermoelectric generator, by converting the heat of the waste gases into electrical energy, contributes to improving the fuel economy of hybrid cars, and this is what prompts us to study the effect of adding it to the hybrid car system. By analyzing the effect of the thermoelectric generator using Matlab software, we were able to determine the appropriate work pattern for the thermoelectric generator system associated with a hybrid car according to a specific range of speed, in order to achieve the greatest benefit from the heat lost with the exhaust gases, and this thus improves the performance of the hybrid car. The results showed that the car's work in the charging mode suited the low speed values, while the engine type was suitable for the medium speed values, while the hybrid mode was suitable for the high speed values, and this shows the importance of switching between the three modes with the change of speed for the car to run in the best efficiency.

**Keywords:** Thermoelectric generator(TEG), hybrid car, waste heat recovery, charging mode, engine type, hybrid mode.

---

\* Professor - Department of Mechanical Power - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University - Lattakia - Syria. [nabil.ghadir57@gmail.com](mailto:nabil.ghadir57@gmail.com)

\*\*Master Student - Thermal Machines Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University - Lattakia - Syria- [hiba.arous@tishreen.edu.sy](mailto:hiba.arous@tishreen.edu.sy)

## دراسة تأثير إضافة مولد كهروحراري لنظام عمل سيارة هجينة للاستفادة من حرارة غازات العادم

د. نبيل غدير\*

هبة عروس\*\*

(تاريخ الإيداع 6 / 3 / 2022. قَبِلَ للنشر في 26 / 4 / 2022)

### □ ملخص □

يساهم المولد الكهروحراري من خلال تحويله حرارة غازات العادم المفقودة إلى طاقة كهربائية في تحسين اقتصادية الوقود في السيارات الهجينة وهذا ما يدفعنا لدراسة تأثير إضافته لنظام عمل السيارة الهجينة. تمكنا من خلال تحليل تأثير المولد الكهروحراري باستخدام برمجيات ماتلاب من تحديد نمط العمل المناسب لنظام المولد الكهروحراري المرتبط مع سيارة هجينة تبعاً لمجال معين من السرعة، بما يحقق أكبر استفادة من الحرارة المفقودة مع غازات العادم وهذا بالتالي يحسن أداء السيارة الهجينة. بينت النتائج أن عمل السيارة في نمط الشحن يناسب قيم السرعة المنخفضة بينما كان نمط المحرك مناسب لقيم السرعة المتوسطة، أما النمط الهجين فكان يناسب قيم السرعة العالية و هذا يبين أهمية التبديل بين الأنماط الثلاثة مع تغير السرعة لتعمل السيارة بأفضل كفاءة.

**الكلمات المفتاحية:** المولد الكهروحراري، السيارة الهجينة، استعادة الحرارة المفقودة، نمط الشحن، نمط المحرك، النمط الهجين.

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

[nabil.ghadir57@gmail.com](mailto:nabil.ghadir57@gmail.com)

\*\* طالبة ماجستير - هندسة الآلات الحرارية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

[hiba.arous@tishreen.edu.sy](mailto:hiba.arous@tishreen.edu.sy)

**مقدمة:**

تأتي حالياً 14% من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري من وسائل النقل [1]. والتي تسبب أيضاً في مشكلة الاستهلاك الكبير لطاقة الوقود، وهذا ما يجعلنا نولي التقنيات التي تزيد كفاءة الطاقة المتعلقة بالسيارات اهتماماً كبيراً. إن الكفاءة الحرارية لمحرك الديزل التقليدي % (34-38) وللمحرك البنزيني % (25-28) [2]. وهذا يعني أن هناك جزء كبير من الطاقة المتولدة من حرق الوقود في المحرك يتحول لحرارة مفقودة معظمها يطرد مع غازات العادم، فينتج عن ذلك ضياع لطاقة الوقود و تلوث للبيئة. استناداً إلى طريق تدفق الطاقة النموذجي لمحرك الاحتراق الداخلي، تقريباً ثلث الطاقة تطرح من خلال غاز العادم. بسبب هذه الإمكانية الكبيرة لاستعادة الحرارة الضائعة في السيارات، الكثير من الجهود تم تحقيقها في هذا المجال في السنوات الأخيرة. من بين طرق تحويل الطاقة المتواجدة حالياً، يعتبر المولد الكهروحراري تقنية جذابة، خصوصاً في تطبيقات السيارات بالمقارنة مع التطبيقات الأخرى، بسبب مميزاته كالتشغيل الهادئ إضافة لكونه تطبيق ذو صيانة منخفضة. تركز الدراسات الحالية تركز على إدخال TEG للسيارات التقليدية، لاستخدامه في استبدال أو مساعدة المولد [3،4]. إن استخدام المولد الكهروحراري في السيارات الهجينة مرغوب مستقبلياً بشكل خاص لكون أعداد السيارات الهجينة في تزايد سريع [5].

أشار الباحثون إلى أن الإنتاجية الكهربائية للمولد الكهروحراري يمكن أن تنتج أكثر من 5% تخفيض باستهلاك الوقود [6]، وقد بينوا فعالية استخدام المولد الكهروحراري في تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية قابلة للاستخدام في التطبيقات المختلفة [7]. قام الباحثون أيضاً [8] بإجراء دراسة بحثية موسعة متعلقة بالسيارات التقليدية مع TEG توصلت إلى أنه على الرغم من أن الكمية الإجمالية لحرارة عادم المحرك أكبر من قيمتها في السيارات الهجينة، إلا أن معدل حرارة العادم للسيارات التقليدية أقل من السيارات الهجينة مما يعني انخفاض كفاءة توليد الطاقة من قبل TEG في حال استخدامه بالسيارات التقليدية. قدم الباحثون في العام 2016 [9] دراسة شاملة لنظام مولد مع سيارة هجينة، وقد أظهرت نتيجة الدراسة طاقة خرج أعظمية للمولد الكهروحراري تقدر بـ 183.24 W.

اعتمد الباحثون في دراساتهم المتعلقة بتحسين أنظمة عمل السيارات الهجينة المتكاملة مع TEG على التركيز على تحسين تصميم المولد الكهروحراري. فقد درس الباحثون [10] كيفية تحسين أداء TEG من خلال الأخذ بالاعتبار بارامترات عدد الوحدات الكهروحرارية للمولد، المواد المستخدمة في صناعته، عدد الوحدات اللازمة للنظام. وهذا ما يوجهاً لمشكلة هذا البحث.

**أهمية البحث وأهدافه:**

تتبع أهمية البحث من كون المولد الكهروحراري (TEG) مصدر طاقة بديل للوقود و صديق للبيئة. إضافة لكونه ذو موثوقية عالية وهو أيضاً تطبيق ذو صيانة منخفضة مقارنة مع التطبيقات الأخرى وبالتالي اقتصادي على المدى الطويل. وهذا ما دفعنا لتحليل تأثير إضافته لنظام عمل السيارة الهجينة لما لذلك من أهمية في تحديد نمط العمل المناسب لتشغيل السيارة بما يزيد كفاءة أدائها من خلال تحسين اقتصادية الوقود وتحقيق أداء قيادة عال .

- يهدف البحث إلى دراسة تأثير إضافة مولد كهروحراري لنظام عمل سيارة هجينة وذلك من خلال :

1- تحديد طاقة الخرج الصافية للمولد الكهروحراري.

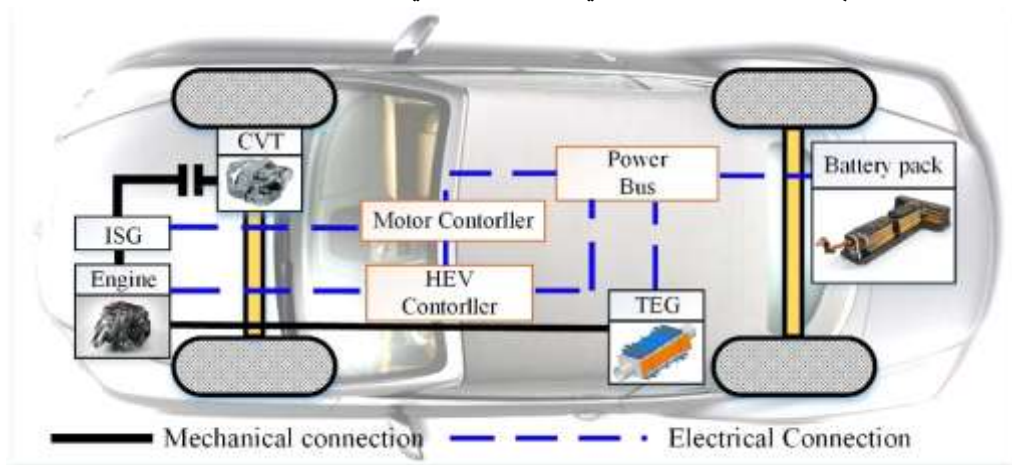
2- حساب الضياعات الناتجة عن إضافته.

3- إيجاد قيم الكفاءة لأنماط العمل المختلفة للسيارة ومقارنتها بغية تحديد نمط العمل المناسب للسيارة الهجينة تبعاً لمجال معين من السرعة.

- تعرض هذه الورقة دراسة تحليلية لتأثير المولد الكهروحراري على سيارة هجينة بهدف تحقيق أقصى استفادة من الحرارة المفقودة مع غازات العادم وذلك لزيادة كفاءة النظام مما سينعكس إيجاباً على اقتصادية الوقود و تخفيض الانبعاثات.

### طرائق البحث و مواده:

1. قمنا ببناء نظام محاكاة لمولد كهروحراري مدمج مع سيارة هجينة باستخدام برمجيات ماتلاب .  
و يبين الشكل (1) الشكل التخطيطي لنظام السيارة الهجينة المتوسطة مع المولد الكهروحراري، والذي يحتوي كل من المولد الكهروحراري ومحرك الاحتراق الداخلي والمولد الكهربائي ISG والبطاريات والمتحكمات.



الشكل (1) شكل تخطيطي لنظام السيارة الهجينة المتوسطة مع المولد الكهروحراري

### التعريف بالسيارة الهجينة:

تعرف السيارة الهجينة على أنها السيارة التي تدار بواسطة اثنين أو أكثر من مصادر الطاقة وأحد هذه المصادر على الأقل يأتي من الطاقة الكهربائية، وفي حالة السيارة الهجينة المتوسطة يعمل المحرك الكهربائي الى جانب محرك الاحتراق، لكنها وعلى خلاف السيارة الهجينة بالكامل فان مصدري الطاقة المذكورين لا يمكنهما العمل بشكل مستقل.

### توصيف نظام السيارة الهجينة مع المولد الكهروحراري:

محرك الوقود: يشبه إلى حد ما محرك الوقود التقليدي لكن مع بعض الأنظمة المتطورة إضافة لأنه ذو حجم أصغر و استطاعة أقل.

خزان الوقود: يعمل على تخزين الوقود الخاص بمحرك الوقود.

المحرك الكهربائي ISG: هو محرك كهربائي متطور بحيث يمكن أن يعمل كمحرك كهربائي أو كمولد للطاقة الكهربائية، وهو يساعد في بدء تشغيل محرك الاحتراق وإعادة شحن البطارية.

مولد كهروحراري: وهو بديل عن المولد الكهربائي حيث تحتوي السيارات الهجينة على مولد كهربائي خاص بتوليد الطاقة الكهربائية فقط ولا يمكن تشغيله كمحرك.  
البطاريات: تستعمل لتخزين الطاقة الكهربائية.

ناقل الحركة: يتشابه مع ناقل الحركة التقليدي من حيث الوظيفة، إذ ينقل الحركة من المحرك إلى العجلات.

المعادلات الرياضية للنموذج:

نموذج المولد الكهروحراري:

$$I = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{r + R_L} \dots \dots \dots (1)$$

$$V = IR_L \dots \dots \dots (2)$$

$$Q_h = \alpha I_{teg} T_h - k\Delta T - 0.5 I_{teg}^2 R_{teg} \dots \dots \dots (3)$$

$$Q_c = \alpha I_{teg} T_c - k\Delta T - 0.5 I_{teg}^2 R_{teg} \dots \dots \dots (4)$$

$$P = I^2 R_L \dots \dots \dots (5)$$

نموذج العادم

$$m_{exh}(t) = (1 + \lambda)m_f(t) \dots \dots \dots (6)$$

$$T_{eout} = T_{CYL0} + m_{exh} \times K \dots \dots \dots (7)$$

$$T_{exh} = T_w + (T_{out} - T_w)e^{-\frac{h A_{pipe}}{c_{ph} m_{exh}}} \dots \dots \dots (8)$$

$$\frac{dT_w}{dt} m_w c_w = Q_i - Q_e \dots \dots \dots (9)$$

نموذج السيارة:

$$T_{ic}(t) = \frac{T_f(t)}{r_e} \dots \dots \dots (10)$$

$$\omega_{ic}(t) = \omega_w(t)r_e \dots \dots \dots (11)$$

$$m_f(t) = f_{ic}(T_{ic}(t), \omega_{ic}(t)) \dots \dots \dots (12)$$

$$T_{em}(t) = \frac{T_e(t)}{r_m} \dots \dots \dots (13)$$

$$\omega_{em}(t) = \omega_w(t)r_m \dots \dots \dots (14)$$

$$p_b = p_{em}(T_{em}(t), \omega_{em}(t)) + p_{TEG}(T_{ic}(t), \omega_{ic}(t)) \dots \dots \dots (15)$$

$$u(t) = \frac{T_e(t)}{T_w(t)} \dots \dots \dots (16)$$

$$J(t, u) = \Delta E_f(t, u) + s(t)\Delta E_e(t, u) \dots \dots \dots (17)$$

$$\Delta E_e(t, u) = \int_t^{t+\Delta t} p_{em}(t, u)dt + \int_t^{t+\Delta t} p_{TEG}(t, u)dt \dots \dots \dots (18)$$

2- قمنا بحساب طاقة الخرج الصافية للمولد TEG:

وتعطى بالعلاقة (91):

$$P_{net} = P_{TEG} - W_p - W_D - W_B \dots \dots \dots (19)$$

حيث  $P_{TEG}$  طاقة خرج المولد الكهروحراري.

وتعطى  $P_{TEG}$  بالعلاقة (20) من [11]:

$$P_{TEG} = n_1 \frac{(N_1 \alpha_1 \Delta T_1)^2}{4R_1} + n_2 \frac{(N_2 \alpha_2 \Delta T_2)^2}{4R_2} \dots \dots \dots (20)$$

حيث :

$n_1, n_2$  الأعداد للوحدتين الكهروحراريتين

$N_1, N_2$  الأعداد للمزدوجات الكهروحرارية.

$R_1, R_2$  المقاومة الداخلية لنوعي المواد المستخدمين ( $\Omega$ ).

$\alpha_1, \alpha_2$  معاملات سيببيك ( $V K^{-1}$ ).

$\Delta T_1, \Delta T_2$  فرق درجات الحرارة لكل من المادتين الكهروحراريتين (K).

3- لحساب طاقة الخرج الصافية للمولد الكهروحراري ، تم إيجاد قيمة الضياعات :

توزعت الضياعات وفق ثلاثة أشكال :

**1- طاقة ضياعات Blow-down:**

النااتجة بسبب الضغط العائد الزائد للمحرك.

وهي الطاقة المطلوبة للمحرك لقيادة غازات العادم من خلال نظام الطرد وهي تتغير مع تغير الضغط العائد للعادم.

تعطى بالعلاقة (21):

$$W_{B=m_e} (h_f + h_{j1} + h_{j2})g \dots \dots \dots (21)$$

حيث:

$m_e$  معدل التدفق الكتلي لغازات العادم (kg/s).

$h_f$  ضياعات احتكاك الجريان W .

$h_{j1}, h_{j2}$  ضياعات المقاومة المحلية للمدخل و المخرج W .

g تسارع الجاذبية [ $m/s^2$ ]

- تعطى hf بالعلاقة (22) :

$$h_f = \lambda \frac{l v^2}{4 R_h} \dots \dots \dots (22)$$

حيث v سرعة تدفق غازات العادم [m/s].

L طول الجدار الداخلي [m].

Rh القطر الهيدروليكي [m].

$\lambda$  معامل دارسي.

- تعطى hj1 بالعلاقة (23) :

$$h_{j1} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g} \dots \dots \dots (23)$$

- تعطى hj2 بالعلاقة (24) :

$$h_{j2} = \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2 \frac{v_2^2}{2g} \dots \dots \dots (24)$$

حيث :

A1 المنطقة المقطعية لأنبوب الدخول و أنبوب الخروج [m<sup>2</sup>].

A2 المنطقة المقطعية للجسم الرئيسي للمبادل الحراري [m<sup>2</sup>].

V1 سرعة دخول الغازات إلى المنطقة المقطعية للمولد الكهروحراري [m/s].

V2 سرعة دخول الغازات إلى الجسم الرئيسي للمبادل الحراري [m/s].

2- طاقة الضياعات الناتجة عن الوزن الزائد بسبب إضافة TEG:

وهي الطاقة اللازمة لنقل وزن النظام TEG، وهو الضياع الذي يغلب على النظام ويعطى بالعلاقة (25):

$$W_D = m_{TEG} g f_r u \cos a + m_{TEG} g u \sin a + m_{TEG} \delta u \frac{du}{dt} \dots \dots \dots (25)$$

$m_{TEG}$  كتلة المولد الكهروحراري [kg]  
 $u$  سرعة السيارة [m/s]  
 $f_r$  معامل التخميد بالمحامل .  
 $a$  زاوية الانحدار  
 $\delta$  معامل الكتلة.

3- طاقة ضياعات التبريد :

وهي الطاقة المطلوبة لضخ سائل التبريد عبر السطح البارد لنظام TEG.

تعطى بالعلاقة (26):

$$W_p = Q \Delta P_c \dots \dots \dots (26)$$

Q معدل التدفق الحجمي لسائل التبريد [m<sup>3</sup>/h].

$\Delta P_c$  انخفاض الضغط عبر السطح البارد للمولد الكهروحراري (pa).

4- النظام المستخدم:

تم اختيار محرك Audi A6 E-Tron لأجل المحاكاة وبارامتراته في الجدول (1)

جدول (1) بارامترات المحرك Audi A6 E-Tron

نوع المحرك	بنزيني	-
عطالة المحرك	0.2	kg.m <sup>2</sup>
نسب نقل التروس للمحرك	13.75 – 7.698 – 5.336 – 3.994 – 3.198 – 2.738	-
طاقة المحرك	155	kW
حجم الإزاحة للمحرك	2	L

وصف المولد الكهروحراري المستخدم:

- يشمل نظام TEG كل من المبادل الكهروحراري - بارامترات المواد الكهروحرارية - وسيط التبريد.
- الأبعاد الإجمالية للمولد الكهروحراري المقترح في هذا العمل:

315mm \* 110 mm \* 120 mm

- التركيب عبارة عن 8 وحدات كهروحرارية من مادة telluride لمنطقة الحرارة العالية متبوعة ب 12 وحدة كهروحرارية من خليطة quinary لمنطقة الحرارة المنخفضة.
- مواصفات المواد الكهروحرارية المستخدمة من جدول (2)

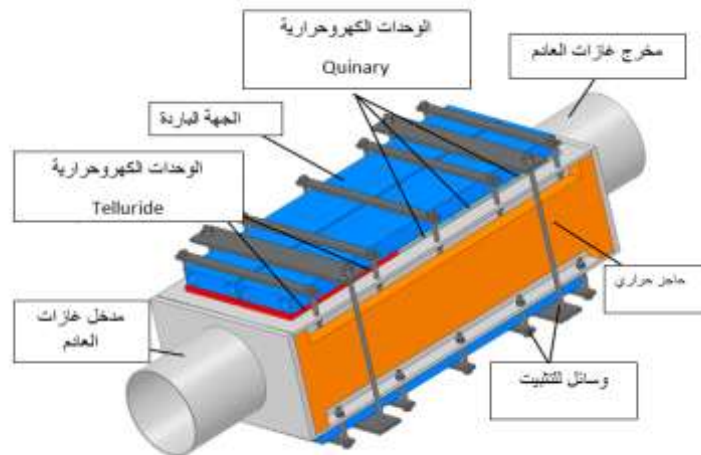
جدول (2) مواصفات المواد الكهروحرارية

Telluride		Quinary		بارامترات الوحدات الكهروحرارية
40 × 40 × 2.9		40 × 40 × 2.9		أبعاد الوحدات الكهروحرارية [mm]
300-800		300-520		مدى درجات الحرارة [K]
1.5		1		المقاومة الكهربائية [Ω]
N-type	P-type	N-type	P-type	بارامترات المواد
-190 ~ -100	100~180	-235 ~ -210	221~140	معامل سيبك [ $\mu V K^{-1}$ ]
1900~2300	900~1200	475~620	310~580	الموصلية الكهربائية [ $10^2 S m^{-1}$ ]
1.7~3	1.1~2	0.8~1.1	0.7~1	الناقلية الحرارية [ $W m^{-1} K^{-1}$ ]

يبين الشكل (2) الشكل التخطيطي للمولد الكهروحراري المستخدم:

جدول (3) مواصفات TEG المستخدم

Kg	14	وزن المولد الكهروحراري
W/m <sup>2</sup> K	120	معامل انتقال الحرارة للجهة الساخنة
W/m <sup>2</sup> K	105	معامل انتقال الحرارة للجهة الباردة
Kg/s	0.1	معدل تدفق وسيط التبريد
K	293	درجة حرارة وسيط التبريد



شكل (2) الشكل التخطيطي للمولد الكهروحراري المقترح



-مواصفات TEG المستخدم من جدول (3)

آلية عمله:

المولد الكهروحراري مركب على أنبوب عادم السيارة نظراً لسخونته العالية، للاستفادة من حرارة غازات الاحتراق لتوليد الكهرباء، حيث تمر تلك الحرارة من خلال الجهاز عبر مواد نصف ناقلة (أشباه موصلات) حتى تصل إلى الجزء البارد من الجهاز، ويفعل الفارق في درجات الحرارة بين الجزئين، تتحرك الإلكترونات داخل المواد نصف الناقلة، مما يؤدي إلى حدوث فرق في الجهد يولد تياراً كهربائياً.

بارامترات السيارة الهجينة المستخدمة من جدول (4):

جدول (4) بارامترات السيارة الهجينة

الوزن	1520	kg
نصف قطر العجلة	0.326	m
عطالة العجلة	1.136	kg.m <sup>2</sup>
طاقة مولد ال ISG	40	kW
نسب نقل التروس للمولد	3.32 – 12.38	-
البطارية	6.5	Ah
معامل مقاومة الهواء	0.32	-

5- وفقاً لأنماط التشغيل الموجودة في السيارة الهجينة، فإننا قمنا بإيجاد قيم كفاءة النظام في أنماط التشغيل المختلفة عند قيم سرعة مختلفة وفقاً للتالي :

1- نمط المحرك فقط :

➤ وفيه المحرك يقود السيارة لوحده، أما المولد ISG فلا يولد أي كهرباء.

➤ المعادلة المعبرة عن طاقة خرج السيارة تعطى بالعلاقة (27) من [11]:

$$P_{out} = um(f_r g \cos a + g \sin a) + \frac{cd A u^3}{21.15} + \frac{(I_e + I_m)}{r^2} i_g n_g u^2 \frac{di_g}{dt} + P_{net} n_{bat.c} + \frac{u}{r^2} \frac{du}{dt} [\sum I_r + (I_e + I_m) i_g^2 i_0^2 n_g + mr^2] \dots (27)$$

➤ المعادلة المعبرة عن الطاقة الداخلة للسيارة تعطى بالعلاقة (28):

$$P_{in} = \frac{T_e W_e}{n_e} \dots (28)$$

➤ كفاءة النظام تعطى بالعلاقة (29):

$$\eta_{sys} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \dots (29)$$

2- نمط الشحن :

➤ وفيه يعمل محرك الاحتراق بينما مولد ISG يقوم بشحن البطارية.

➤ المعادلة المعبرة عن طاقة خرج السيارة تعطى بالعلاقة (30) من [11]:

$$P_{out} = um(f_r g \cos a + g \sin a) + \frac{cd A u^3}{21.15} + \frac{(I_e + I_m)}{r^2} i_g n_g u^2 \frac{di_g}{dt} + (P_{net} + P_m) n_{bat.c} + \frac{u}{r^2} \frac{du}{dt} [\sum I_r + (I_e + I_m) i_g^2 i_0^2 n_g + mr^2] \dots (30)$$

➤ المعادلة المعبرة عن الطاقة الداخلة للسيارة تعطى بالعلاقة (13):

$$P_{in} = \frac{T_e W_e}{\eta_e} \dots \dots \dots (30)$$

➤ كفاءة النظام تعطى بالعلاقة (31):

$$\eta_{sys} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \dots \dots \dots (31)$$

**3- النمط الهجين :**

➤ وفيه يعمل كل من محرك الاحتراق ومولد ISG على تشغيل السيارة

➤ المعادلة المعبرة عن طاقة خرج السيارة تعطى بالعلاقة (32) من [11]:

$$P_{out} = um(f_r g \cos a + g \sin a) + \frac{cd A u^3}{21.15} + \frac{(I_e + I_m)}{r^2} i_g \eta_g u^2 \frac{di_g}{dt} + P_{net} \eta_{bat.c} - P_m \eta_{bat.d} + \frac{u}{r^2} \frac{du}{dt} [\sum I_r + (I_e + I_m) i_g^2 i_0^2 \eta_g + mr^2] \dots (32)$$

➤ المعادلة المعبرة عن الطاقة الداخلة للسيارة تعطى بالعلاقة (33):

$$P_{in} = \frac{T_e W_e}{\eta_e} \dots \dots \dots (33)$$

➤ كفاءة النظام تعطى بالعلاقة (34):

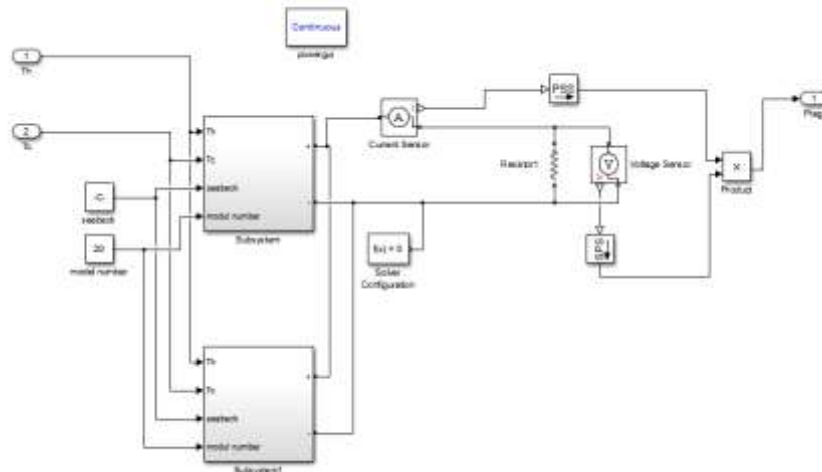
$$\eta_{sys} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \dots \dots \dots (34)$$

**النتائج والمناقشة:**

- من خلال دراستنا للنظام المقترح، توصلنا من خلال المحاكاة إلى ما يلي :

نموذج المولد الكهروحراري :

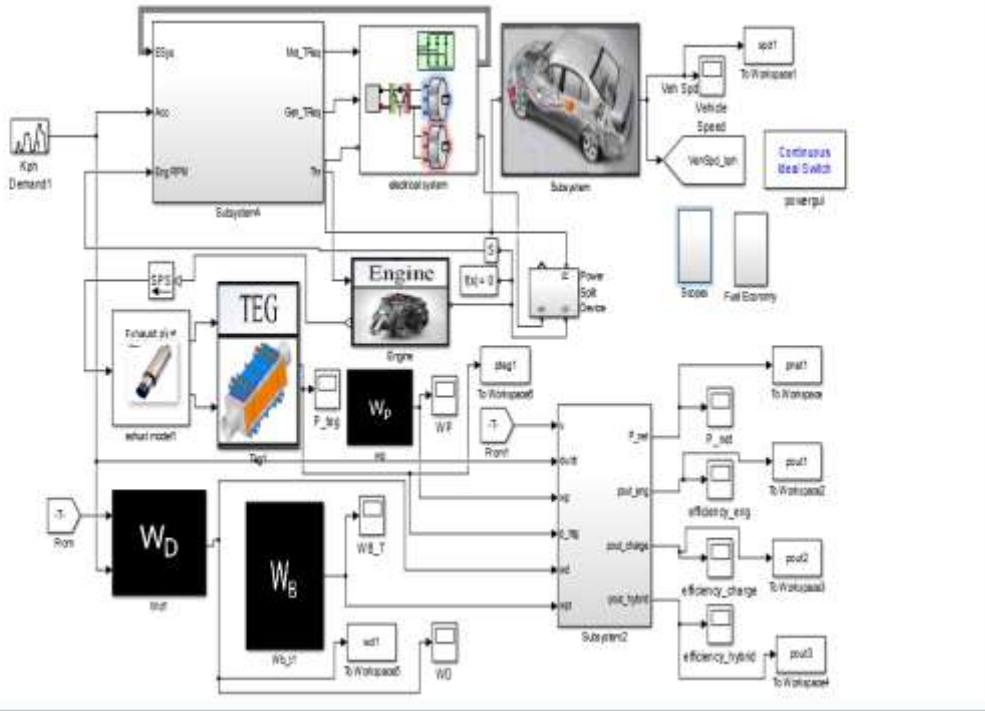
يبين الشكل (3) نموذج المولد الكهروحراري:



الشكل (3) نموذج المولد الكهروحراري

- نموذج السيارة الهجينة مع المولد الكهروحراري:

يبين الشكل (4) نموذج السيارة الهجينة مع المولد الكهروحراري :



الشكل (4) نموذج السيارة الهجينة مع المولد الكهروحراري

-تحليل طاقة المولد الكهروحراري:

الطاقة الكهربائية التي حصلنا عليها من المولد الكهروحراري:

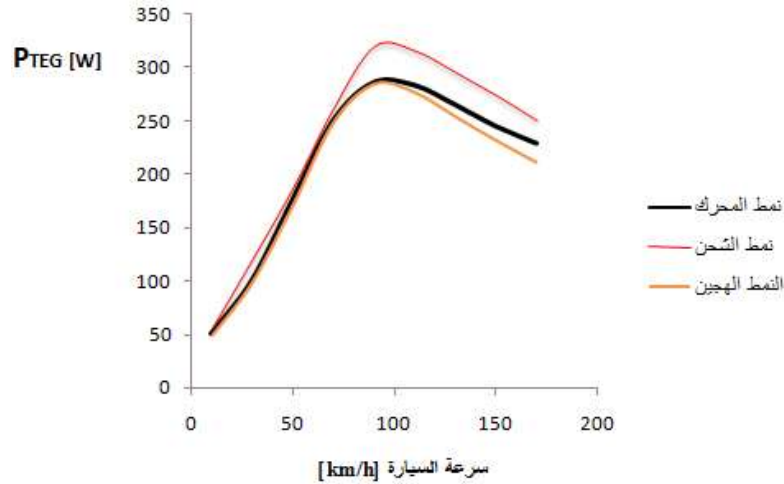
قمنا بتطبيق النموذج المقترح عند قيم سرعة مختلفة وبالتالي درجات حرارة مختلفة لغازات العادم فحصلنا على القيم التالية

المبينة في الجدول (5) :

جدول (5) الطاقة الناتجة عن المولد الكهروحراري في أنماط العمل الثلاثة

170	150	130	110	90	70	50	30	10	السرعة (km/h)
228.87	245.01	265.18	283.43	286.03	250.36	175.77	100.17	50.27	نمط المحرك
250.44	273.82	295.33	215.55	320.12	262.46	187.71	120.81	55.43	نمط الشحن
210.27	230.97	253.22	275.99	284.12	248.41	170.63	98.32	47.77	النمط الهجين

ويبين الشكل (5) تغير طاقة المولد الكهروحراري في الأنماط الثلاثة :



شكل (5) تغير طاقة المولد الكهروحراري في الأنماط الثلاثة

الطاقة الصافية للمولد الكهروحراري TEG بعد اقتطاع طاقة الضياعات:

توزعت طاقة الضياعات وفق ثلاثة أنواع :

-A (WB) طاقة ضياعات Blow-down.

-B (WD) طاقة ضياعات بسبب الوزن الزائد لنظام TEG.

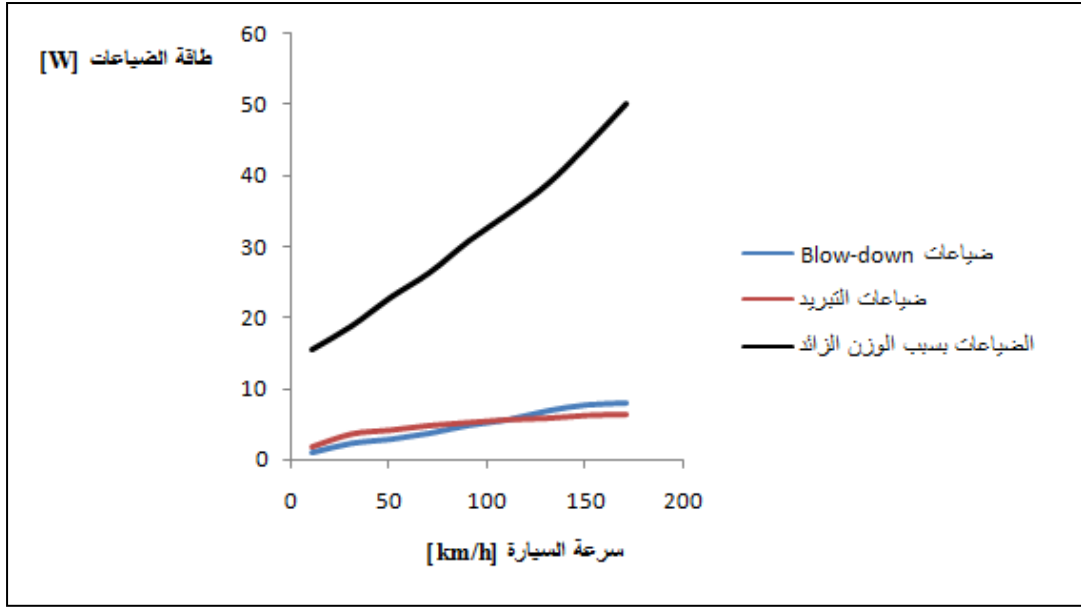
-C (WP) طاقة ضياعات التبريد.

ويبين الجدول (6) قيم طاقة الضياعات مع تغير قيم السرعة

جدول (6) قيم طاقة الضياعات عند السرع المختلفة

170	150	130	110	90	70	50	30	10	السرعة (km/h)
7.99	7.74	6.91	5.7	4.93	3.82	2.98	2.43	1.15	WB (w)
6.45	6.33	5.92	5.73	5.32	4.91	4.27	3.72	1.93	WP (w)
50.05	44.18	38.76	34.61	30.79	26.33	22.81	18.76	15.47	WD (w)

يبين الشكل (6) منحنيات طاقة الضياعات مع تغير السرعة :



شكل (6) منحنيات طاقة الضياعات مع تغير السرعة

-تحليل كفاءة نظام عمل السيارة مع المولد تحت شروط أنماط عمل مختلفة:

افتراضنا أن السيارة تسير على طريق أملس هادئ ، وقمنا بإعطاء مدى سرعة يتراوح بين (10 حتى 170) km/h. بناء على مجموعة نقل الحركة في السيارة الهجينة، فإننا نميز ثلاثة أنماط تشغيل شائعة متاحة:

• تحليل النظام في نمط الشحن :

يبين الجدول (7) قيم كل من كفاءة للنظام والطاقة الصافية عند سرع مختلفة :

جدول (7) الطاقة الصافية للمولد الكهروحراري في نمط الشحن

السرعة (km/h)	170	150	130	110	90	70	50	30	10
الطاقة الصافية (w)	185.95	221.9	243.74	269.51	279.08	227.4	157.65	95.9	36.88
الكفاءة	0.32	0.34	0.36	0.17	0.16	0.15	0.3	0.28	0.26

• تحليل النظام في نمط المحرك :

يبين الجدول (8) قيم كل من كفاءة للنظام والطاقة الصافية عند سرع مختلفة :

جدول (8) الطاقة الصافية للمولد الكهروحراري في نمط المحرك

السرعة (km/h)	170	150	130	110	90	70	50	30	10
الطاقة الصافية (w)	164.38	193.09	213.59	237.39	244.99	215.3	145.71	75.26	31.72
الكفاءة	0.3	0.35	0.32	0.18	0.22	0.19	0.28	0.25	0.22

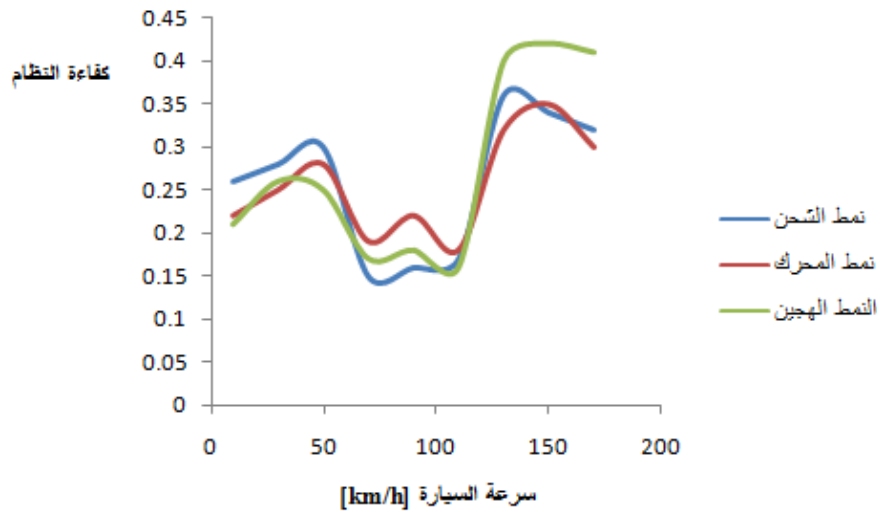
### تحليل النظام في حالة النمط الهجين :

يبين الجدول (9) قيم كل من كفاءة للنظام والطاقة الصافية عند سرع مختلفة :

جدول (9) الطاقة الصافية للمولد الكهروحراري في النمط الهجين

السرعة (km/h)	10	30	50	70	90	110	130	150	170
الطاقة الصافية (w)	29.22	73.41	140.63	213.35	243.08	229.95	201.63	179.05	145.78
الكفاءة	0.21	0.26	0.25	0.17	0.18	0.16	0.4	0.42	0.41

ويبين الشكل (7) منحنيات كفاءة النظام في الأنماط الثلاثة مع تغيير السرعة :



شكل (7) كفاءة النظام في الأنماط الثلاثة

### النتائج والمناقشة:

كانت طاقة خرج TEG أعلى في نمط الشحن بالمقارنة مع النمطين الآخرين، كما كانت قيمها لنمط المحرك أفضل منها للنمط الهجين .

ازدادت طاقة خرج TEG مع ازدياد السرعة حتى بلوغ السرعة [90 km/h] حيث بلغت قيمتها عندها 320.17 W لنمط الشحن و 286.03 W لنمط المحرك و 284.12 W للنمط الهجين .

بدأت طاقة خرج TEG بالانخفاض عند ازدياد السرعة عن 90 [km/h] لتبلغ عند السرعة [170 km/h] القيمة 250.44 W لنمط الشحن و 228.87 W لنمط المحرك و 210.27 W للنمط الهجين.

كانت الضياعات الناتجة عن وزن TEG هي الضياعات الأكبر تأثيراً ، حيث ازدادت بشكل كبير مع ازدياد السرعة لتبلغ 50.05 W عند السرعة [170 km/h]، أما بالنسبة لطاقة ضياعات Blow-down فحافظت على مستوى

منخفض في مجال السرعة المنخفضة، بينما كانت أعلى من ضياعات التبريد عند بلوغ السرعة [km/h] 130 وبلغت أعلى قيمة لها 7.99 W عند السرعة [km/h] 170. أظهرت النتائج أن طاقة الخرج الصافية القصوى للمولد الكهروحراري هي 279.08 W وهو ما يمثل نقصان تقريبا 13% مقارنة مع طاقة خرج TEG و ذلك في نمط الشحن، أما بالنسبة للنمط الهجين فبلغت قيمتها 243.08 W وهو ما يمثل نقصان تقريبا 15% بينما بلغت قيمتها لنمط المحرك 244.99 W أي نقصان 17% مقارنة مع طاقة خرج TEG. أوضحت النتائج أنه بالرغم من ازدياد طاقة خرج TEG مع ازدياد السرعة إلا أنه عند بلوغ السرعة القيمة [km/h] 170 يصبح استهلاك المولد الكهروحراري للطاقة كبير نسبيا حيث يصبح النقصان بقيمة الطاقة يعادل 30% للنمط الهجين و 28% لنمط المحرك و 26% لنمط الشحن. بينت النتائج أنه عند قيم السرعة المنخفضة، كانت قيم الكفاءة الأعلى للنظام عند عمل السيارة في نمط الشحن، حيث بلغت أعلى قيمة للكفاءة 0.3 و ذلك عند السرعة [km/h] 50. أما بالنسبة لمجال السرعة العالية فكانت قيم الكفاءة الأعلى للنظام عند عمل السيارة في النمط الهجين، حيث بلغت أعلى قيمة للكفاءة 0.42 و ذلك عند السرعة [km/h] 150.

### الاستنتاجات والتوصيات:

- ❖ أظهرت الدراسة أهمية دراسة تأثير إضافة المولد الكهروحراري إلى نظام عمل السيارة الهجينة إذ لا بد من الأخذ بعين الاعتبار التأثير الشامل ل TEG في استهلاك وحفظ طاقة السيارة.
- ❖ إن الطاقة الكهربائية المنتجة من قبل TEG تساعد على إعادة شحن البطارية وهذا سيقول من استهلاك الوقود.
- ❖ إن طاقة خرج TEG العالية في نمط الشحن والتي تبلغ القيمة الصافية القصوى لها 270.08 W ناتجة عن درجة حرارة العادم العالية و معدل تدفق الكتلة العالي الناتج عن العزم الإضافي الذي ينتجه المحرك لقيادة المولد لشحن البطارية.
- ❖ بازدياد السرعة تزداد درجة حرارة العادم العالية و معدل تدفق الكتلة مما يؤدي لزيادة طاقة خرج TEG، و لكن بعد قيمة معينة للسرعة تتوقف قابلية المادة الكهروحرارية على تحويل الحرارة لكهرباء.
- ❖ تبين النتائج ضرورة حساب ضياعات الطاقة التي يسببها TEG كونها تزيد الطاقة المطلوبة من المحرك والتي يصل مجموع قيمها 64.49 W في السرع العالية، ويشكل الضياع الناتج عن الوزن الأكبر منها مما يستدعي ضرورة اختيار مواد خفيفة الوزن.
- ❖ نستنتج من مقارنة قيم الطاقة الصافية ل TEG، بأن أفضل إنتاجية له تكون عند عمل السيارة عند السرعة 90 km/h.
- ❖ أوضحت النتائج من خلال مقارنة قيم الكفاءة في أنماط العمل المختلفة بأن لكل سرعة نمط عمل يوافق استخدام أفضل للطاقة.
- ❖ إن التبديل بين أنماط العمل المختلفة تبعاً لتغير السرعة ضروري لتحسين أداء السيارة و الاستفادة من الطاقة بالشكل الأفضل.
- ❖ إن اقتناء السيارة الهجينة لمصدر طاقة احتياطي يعتمد على الطاقة البديلة، يزيد من كفاءتها و موثوقيتها.

- ❖ التأكيد على تبني فكرة المولد الكهروحراري كحل واعد لتحسين أداء السيارات الهجينة لتعمل بكفاءة دون أن تتسبب بمزيد من التلوث .
- ❖ نوصي بتطوير هذا البحث من خلال :
- 1- القيام بدراسة اقتصادية تبين الوفرة الحاصل في تكاليف الوقود من جراء اعتماد TEG.
- 2- متابعة العمل على إيجاد طرق لتخفيض الضياعات الناتجة عن إضافة TEG.
- 3- متابعة البحث عن أنواع مواد كهروحرارية ذات قابلية أكبر لتحويل الحرارة لكهرباء.
- 4- دراسة تأثير بارامترات أخرى على إدارة نظام عمل السيارة بما يحقق طاقة خرج أعلى للمولد الكهروحراري.
- 5- استمرار البحث عن تقنيات لاستعادة الحرارة المفقودة مع غازات العادم.

### References :

- [1] Change, *Intergovernmental Panel on Climate*. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Vol. 3:Cambridge University Press, 2015.
- [2] Vázquez J, Sanz-Bobi M A, Palacios R, et al. *State of the art of thermoelectric generators based on heatrecovered from the exhaust gases of automobiles*. In: Proc 7th European workshop on thermoelectrics,Pamplona, Spain; 2002.
- [3] Stobart, R., Wijewardane, A., and Allen, C. "*The Potential for Thermo-Electric Devices in Passenger Vehicle Applications*," SAE Technical Paper [2010-01-0833](https://doi.org/10.4271/2010-01-0833), 2010, doi:[10.4271/2010-01-0833](https://doi.org/10.4271/2010-01-0833).
- [4] LaGrandeur, John, Crane D., Hung S., Mazar B., and Eder A. "*Automotive waste heat conversion to electric power using skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe*." In 2006 25th International Conference on Thermoelectrics, pp. 343–348. IEEE, 2006.
- [5] SLOT, ARNOUD VAN DER. "*Study Integrated Fuels and Vehicles Roadmap 2030+*." Roland Berger.
- [6] [www.greencarcongress.com/2009/02/volkswagenshow.html?cid=147803439](http://www.greencarcongress.com/2009/02/volkswagenshow.html?cid=147803439)[25.12..
- [7] Alpert Patrick David,"*Thermoelectric Generator :Power Generation Using Temperature Difference For Use in Home Applications*"Bulacan State University,2017.
- [8] Oetringer K, Kober M, Altstedde M K. *Upgrading hybrid-vehicles with a Thermoelectric Generator.Ecological Vehicles and Renewable Energies*, 2014 Ninth International Conference on. IEEE 2014: 1-5.
- [9] Liu X, Li C, Deng YD, Su CQ. An energy-harvesting system using thermoelectric power generation for automotive application. *Int J Elec Power* 2015; 67: 510-6.
- [10] Muhamad Sharzul bin Dzulkfli,*Thermoelectric Generation in Hybrid Electric Vehicles*,Energies,2020.
- [11] Ruochen Wang, Wei Yu, Xiangpeng Meng. *Performance investigation and energy optimization of a thermoelectric generator for a mild hybrid vehicle*.