

## دراسة و نمذجة نظام كهروحراري أحادي الطبقة باستخدام برنامج PSPICE

ياسر عبد الرزاق الغنيمة\*

ماجستير في الهندسة الميكانيكية، قائم بالأعمال بقسم التصميم الميكانيكي والانتاج،  
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة الفرات.

### الملخص

يهدف البحث أولاً إلى دراسة نظام كهروحراري أحادي الطبقة بطريقة جديدة تسمح بتوصيف التأثيرات الكهروحرارية الأساسية الناشئة في النظام الكهروحراري (تأثير سيبيك، تأثير بلتير،....) في حالة العمل، واستنتاج المعادلات المعبرة عن كل منهما. وثانياً تم نمذجة ومحاكاة النظام الكهروحراري المدروس - بحالتي عمله سواء في التبريد أو توليد الطاقة الكهربائية بواسطة برنامج محاكاة حاسوبي - مثل برنامج (PSPICE) - يسمح بمحاكاة أداء النظام الكهروحراري محاكاة حرارية وكهربائية من خلال تصميم دائرة كهربائية حرارية متكاملة مكافئة للنظام المدروس التجريبي (النموذج الأصلي-Prototype) بكافة عناصره الأساسية، حيث يعتمد إنشاء دائرة نموذجية مكافئة للدائرة الأصلية لنظام كهروحراري بسيط مؤلف من زوج (ازدواج) كهروحراري واحد على تمثيل كافة مكونات النظام إنطلاقاً من الازدواج الكهروحراري المكون من النوعين (n-type) و (p-type).

نوقشت قياسات نتائج محاكاة النموذج والنتائج المقاسة من التجربة والنتائج الحاصلة أظهرت تقارباً واضحاً بالقيم وبدقة كبيرة وهذا واضح من خلال المخططات.

## 1- مقدمة:

تمكّن الأنظمة الكهروحرارية من إجراء عملية التحويل المباشر بين الحرارة والكهرباء بواسطة التأثيرات الكهروحرارية التي تنشأ في الدارات الكهروحرارية المكوّنة بشكل أساسي من المواد شبه الموصلة والتي تسمى أيضاً بأنصاف النواقل (Semiconductors)، فعند تسخين إحدى نهايتي زوج من المواد شبه الموصلة و تبريد النهاية الأخرى سينتج ذلك القوة المحركة الكهربائية أو فرق للكمون يتولد في الدارة وبالتالي نشوء ومرور تيار كهربائي وهذا المبدأ يستخدم في توليد الطاقة الكهربائية من خلال أنصاف النواقل ، واعتماداً على مبدأ أن إي نوعين مختلفين من المعادن (أنصاف النواقل) لهما اختلاف في الخواص الحرارية إذا عرضنا جزء إلى حرارة والجزء الثاني إلى برودة سيتولد على طرفي المعدنين تيار كهربائي، وعند القيام بالعملية العكسية بإمرار تيار كهربائي في وصلة مكونة من مادتين مختلفتين من أنصاف النواقل لتكوين الزوج الكهروحراري (ازدواج كهروحراري)، سينتج لدينا فرقاً في درجات الحرارة بين طرفي النظام محدثاً أثراً تبريدياً ، وعادة المادة الأكثر استخداماً لتكوين هذه المواد هي مادة (Telluride-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>).

## 2- أهمية البحث وأهدافه:

إن إجراء الدراسة التحليلية للأنظمة الكهروحرارية بإنشاء نموذج حاسوبي باستخدام برامج المحاكاة الحاسوبية تشكل طريقة جديدة وحديثة للبحث وهذه البرامج تسمح بالمحاكاة الحرارية والكهربائية لعمل النظام الأصلي، من خلال بناء وإنشاء دارة كهربائية حرارية متكاملة ممثلة لكل عنصر من مكونات النظام الكهروحراري الأصلي، وبالتالي تسمح باختيار وتحديد شروط التصميم المثالية لمكونات النظام.

ولغاية التحقق من نتائج النمذجة العددية للنموذج المدروس حاسوبياً، تم تصنيع نموذج تجريبي مخصص لإجراء التجارب العملية وبنفس شروط الوسط الخارجي وشروط العمل المفروضة للنموذج الحاسوبي حتى تكون عملية المقارنة والمطابقة بين النتائج علمية ومنطقية، والنموذج التجريبي المصنوع تم تجهيزه بحيث يتكون من (65) زوجاً كهروحرارياً من الطراز (Model no: TE-65-0.6-1.5)، فيه كل الأزواج

الكهروحرارية متوضعة بشكل متناوب من النوعين (p-type, n-type) بحيث تكون متصلة كهربائياً على التسلسل بواسطة صفائح رقيقة من النحاس (موصل جيد)، وتتوضع هذه الأزواج بين طبقتين من السيراميك واحدة من الأعلى وواحدة من الأسفل لغرض تأمين حماية لها وبحيث تسمح للانتقال الحراري عبرها، بينما تكون هذه الطبقات عازلة للكهرباء.

### 3- مفهوم الظاهرة الكهروحرارية:

ينشأ الأثر الكهروحراري اعتماداً على مبادئ أساسية هي أن حاملات الشحنة – الإلكترونات- تتحرك في الموصلات من الأماكن ذات درجة الحرارة العالية إلى الأماكن ذات درجة الحرارة الأخفض وفقاً لقوانين الطبيعة [1]. وهذه الحاملات تنقل أيضاً كميات من حرارة التوصيل أثناء حركتها مما ينتج تأثيرات تتميز بها أنصاف النواقل، هذه التأثيرات هي تأثير سيك وتأثير بلتيه وتأثير طومسون.

ويتألف النظام الكهروحراري البسيط ذو الطبقة الواحدة و زوج وحيد من أنصاف

النواقل من الأقسام الرئيسية التالية [2] كما يظهر في الشكل (1) :

1-القاعدة (Substrate): ويقصد بها الطبقة السيراميكية من كل جهة وهي مصنوعة من أكسيد الألمنيوم ( $Al_2O_3$ )، أو أكسيد الباريوم (BAO).

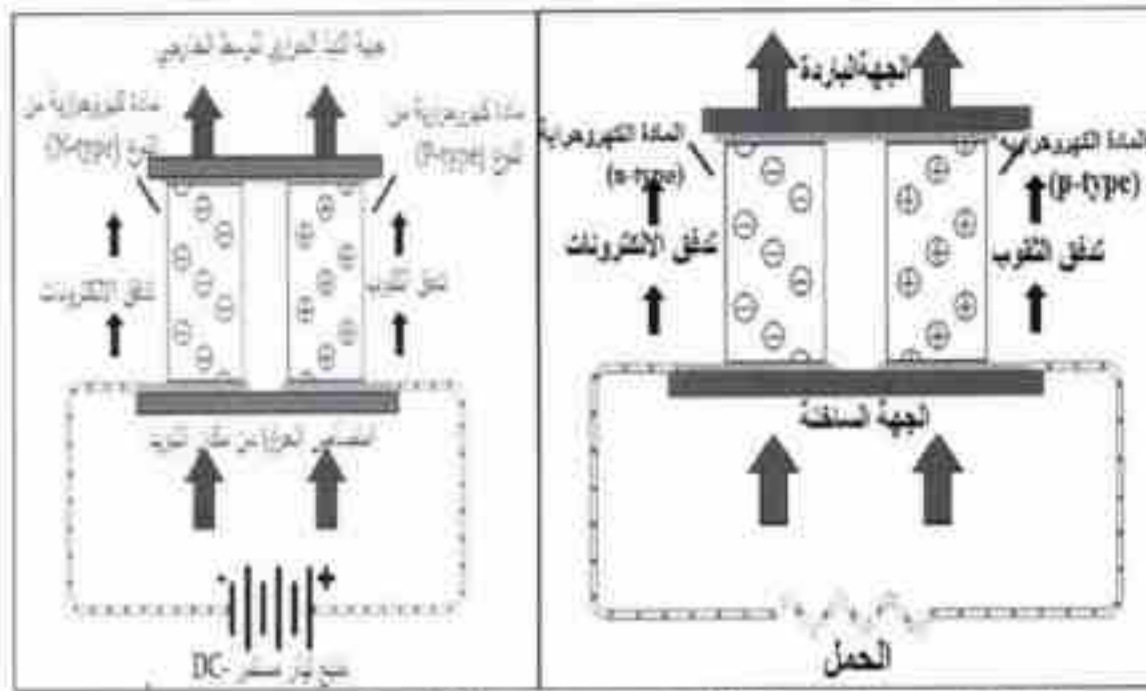
2-الموصل الكهربائي (Conductor): مصنوع من النحاس النقي أو معادن أخرى.

3-المواد الشبه موصلة الكهروحرارية (Thermoelectric Semiconductors):

(1)- النوع (n -type) : تحتوي على (Bismuth-Telluride-Selenium) سيلينيوم تيلورايد البزموت (Bi Te Se).

(2)- النوع (p -type) : تحتوي على (Bismuth-Telluride-Antimony) أنتيمون تيلورايد البزموت (Bi Te Sb).

4-أدوات تجميع ولحام لمكونات النظام الكهروحراري.



الشكل (1) يبين حالتى عمل النظام الكهروحرارى (توليد الطاقة، تبريد) والمكونات الرئيسية له.

وسنقدم شرحاً مختصراً للتأثيرات الكهروحرارية التي تظهر خلال عمل النظام:

### 3-1- تأثير سيبك (Seebeck Effect 1821):

وجد العالم الاستوني توماس سيبك (Tomas Seebeck (1770-1831))، أنه بالإمكان توليد قوة دفع محركة كهربائية (emf) في دائرة الازدواج الحراري المشكّلة من سلكين معدنيين مختلفين عندما تكون النهايتين عند درجتى حرارة مختلفتين، ففي دائرة مفتوحة تحوي قضيب معدني عرض لحرارة عند أحد أطرافه سيصبح هذا الطرف ساخناً بينما الطرف الأخر سيبرد، عندئذٍ الإلكترونات الحرة في المعدن تتصرف كذرات الغاز، أي الإلكترونات الحرة في الطرف الساخن ستتملك طاقة حركية تجبرها على التحرك بسرعة عالية إلى الطرف البارد (الأخر) من القضيب المعدني وسيكون لدينا مجرى لتدفق الإلكترونات من الطرف الساخن إلى الطرف البارد للقضيب، ولتتكسد الشحنات السالبة على الطرف البارد لتمنع الشحنات فيما بعد من التراكم، وفي دائرة مغلقة ونتيجة تراكم الشحنات ويهدف إيقاصها سيتدفق التيار في الدائرة ويستمر طالما هنالك فرق في درجات الحرارة بين نهايتي القضيب المعدني وهذا يسمى (مبدأ سيبك) وهو المستخدم لإنتاج مولدات كهروحرارية. وتعريف القوة المحركة الكهربائية وفق معادلة معامل سيبك والذي يقدر بـ  $[3](V/K)$ :

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} , \quad \Delta V = V_2 - V_1 \quad (1)$$

وبشكل عام إن فرق درجات الحرارة في الناقل يجعل الإلكترونات تتدفق من الجهة الساخنة إلى الجهة الباردة وذلك عند عدم مرور تيار كهربائي، أما في حالة وصل الدارة إلى منبع تيار مستمر يكون هنا اتجاه التيار عكس اتجاه حركة الإلكترونات حيث إن تدفق الإلكترونات ينتج قوة دافعة كهربائية تتناسب مع الحرارة المقدمه، وتزداد القوة المحركة الكهربائية باستخدام المواد الشبه الموصلة، ومعامل سيبك يأخذ قيمة موجبة (حاملات الشحنة هي النيوب) أو سالبة (حاملات الشحنة الإلكترونات) ويدعى أحياناً بمعامل القوة المحركة الكهربائية الحراري.

### 3-2- تأثير بيئيه (Peltier Effect -1834):

يستخدم هذا المبدأ في تطبيقات التبريد، عُرف سنة (1834) عندما وجد العالم الفرنسي جان كارلوس بيئيه ((Jean Charles peltier-(1785-1845)، أنه عند عكس ظاهرة سيبك أي بتمرير تيار كهربائي خلال دارة ازدواج حرارية (Thermocouple) مشكلة من معدنين مختلفين، ستبرد إحدى الوصلتين ويمكنها امتصاص حرارة من الوسط المحيط حولها بينما تسخن الوصلة الثانية ويمكنها نبذ حرارة إلى الوسط المحيط بها. ويتم امتصاص أو نبذ الحرارة نتيجة اختلاف القوى المحركة الكهربائية  $\alpha_p, \alpha_n$  للمادة السالبة والمادة الموجبة على التوالي عند الوصلات، ونميز هذا التأثير بمعامل بيئيه ( $\pi$ ) والذي تعطى معادلته بالعلاقة التالية:

$$\pi = (\alpha_p - \alpha_n).T \quad (2)$$

حيث إن (T) درجة الحرارة المطلقة للوصلة الباردة أو الساخنة، وتعرف الحرارة المعتصمة (المنبوذة) بحرارة بيئيه وتحسب من خلال العلاقة التالية:

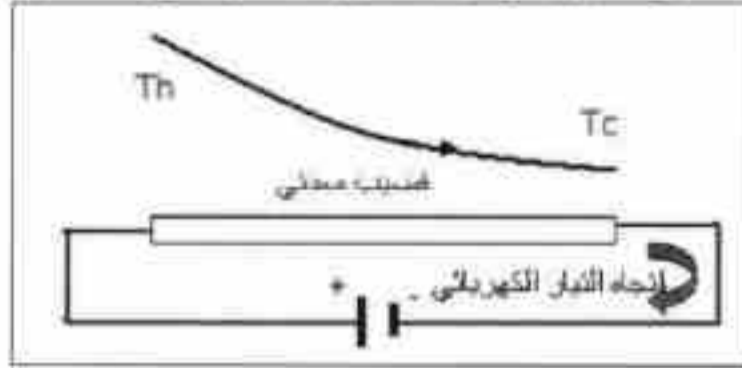
$$Q_p = \pi.I \quad (3)$$

حيث: I- شدة التيار الثابت،  $\pi$ - معامل بيئيه.

### 3-3- تأثير طومسون (Thomson Effect 1855):

عندما يمر تيار كهربائي ثابت عبر قضيب معدني نهايتيه عند درجتين حرارة مختلفة سيتم امتصاص أو نبذ حرارة خلال النهايتين، إضافة لحرارة جول الناتجة عن

المقاومة الكهربائية للقضيب، أي عندما تتدفق الحاملات الكهربائية من النهاية الباردة إلى النهاية الساخنة يتوجب امتصاص حرارة للحفاظ على التوازن في درجة الحرارة وعند تدفق حاملات الشحنة الكهربائية من النهاية الساخنة إلى النهاية الباردة سيتم طرح حرارة للحفاظ على التوازن في درجة الحرارة كما يرى في الشكل (2).



الشكل (2) يبين تأثير طومسون في المعدن.

ويمكن أن نعرف الحرارة الممتصة أو المنبوضة بحرارة طومسون وهي العمل المبذول ضد فرق الجهد الانتشاري في طول القضيب، تعطى معادلة حرارة طومسون:

$$Q_p = \int \tau \cdot I \cdot dT \quad (4)$$

ومعادلة معامل طومسون:

$$\tau = \tau_p - \tau_n \quad (5)$$

ويرتبط معامل طومسون والذي يقاس بـ (W/K. Amp) مع معامل بلتييه ( $\pi$ )

وقوة الدفع الكهربائية ( $\alpha$ ) بالعلاقة التالية:

$$\frac{d}{dT} (\pi_{p,n}) + (\tau_n - \tau_p) = \alpha_p - \alpha_n \quad (6)$$

حيث ( $n$ ) يرمز للمادة السالبة و ( $p$ ) للمادة الموجبة.

كما تظهر عند عمل الجهاز الكهروحراري تأثيرات حرارية أخرى إضافة لتأثير

سيبك و تأثير بلتييه [4] هي:

1- حرارة جول (Heat Joule) ناتجة عن مرور التيار الكهربائي

تعطى بالعلاقة ( $Q_j = I^2 \cdot R$ ), حيث أن ( $R = \rho \cdot L/A$ ).

2- الحرارة الضائعة الناتجة عن اختلاف درجات الحرارة بين طرفي الجهاز (وصلتي

التلامس).

3- حرارة طومسون: ناتجة عن التدرج الحراري في درجات الحرارة في المواد شبه الموصلية والتيار الكهربائي ولكن معامل طومسون في الجهاز الكهروحراري عادة صغير القيمة لذلك يهمل أثناء الدراسات.

أن نشوء الفارق الحراري بين جهتي النظام (  $\nabla T$  ) أثناء مرور التيار الكهربائي وسريان حاملات الشحنة في الموصلات بإيصالية (  $\sigma$  ) من الطرف الساخن للطرف البارد سيؤدي لنشوء كثافة التيار الظاهري التي تعطى بالعلاقة:

$$J_i^E = -\sigma \cdot \alpha \nabla T \quad (7)$$

حيث (  $\alpha$  ) : خاصية تتعلق بطبيعة المواد و تسمى بمعامل سيبيك (Seebeck coefficient). و كون المواد عازلة كهربائياً ينتج كثافة التيار الكهربائي

$$J_i^E = -\sigma \cdot E \quad (8)$$

الناشئ للحفاظ على التوازن أي يجب أن يتحقق:

$$J^E = J_c^E + J_i^E = 0 \quad (9)$$

بتعويض (8) و (7) في (9) ينتج الحقل الكهربائي الناشئ بفعل تأثير سيبيك و يعطى بالمعادلة التالية:

$$E = \alpha \cdot \nabla T \quad (10)$$

التأثير الثاني المعروف بتأثير بلتيه ، فيسبب السعة الحرارية للإلكترونات، كثافة التيار ستوصل طاقة حرارية يتدفق يتناسب مع كثافة التيار أي أن:

$$J_i^T = \pi \cdot J^E \quad (11)$$

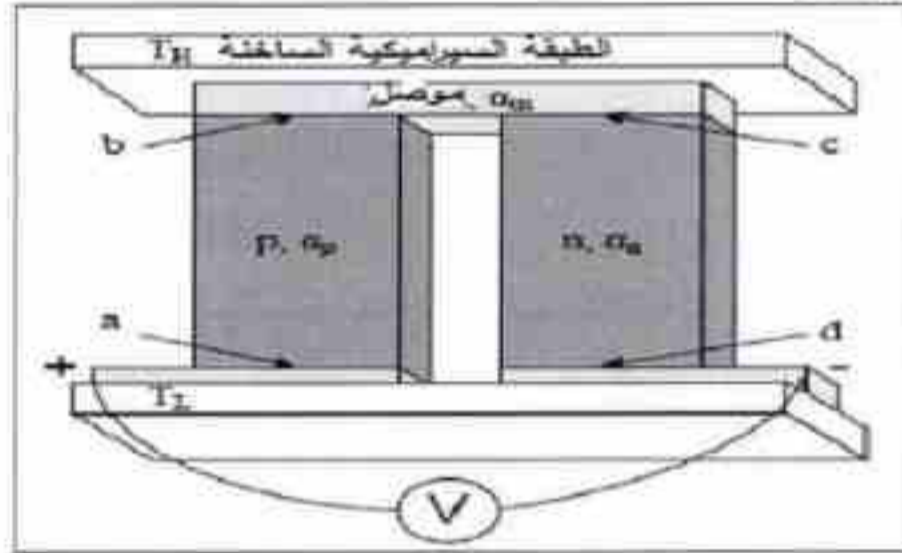
حيث  $\pi$ : معامل بلتيه (Peltier effect)، والذي يرتبط بمعامل سيبيك بالعلاقة :

$$\pi = \alpha \cdot T \quad (12)$$

## 4- الدراسة التحليلية لعمل النظام الكهروحراري البسيط:

النظام الكهروحراري البسيط مؤلف من زوج كهروحراري واحد والمكون من النوعين (n-type) و (p-type)، توصل المادة النصف ناقلة من النوع (n) والتي تتصف بكثرة الإلكترونات فيها بالقطب الموجب بينما توصل المادة النصف ناقلة من النوع (P) والتي تتصف بوفرة من الثقوب وتفتقد للإلكترونات للقطب السالب لمنبع التيار الكهربائي أو منخره، تلحم العناصر الكهروحرارية بحيث توصل المواد النصف ناقلة كهربائياً على التسلسل بواسطة صفائح من مادة موصلة كهربائياً كالنحاس مثلاً، وبعدها توضع هذه الأزواج الكهروحرارية بين طبقتين من مادة السيراميك واحدة من كل جهة كما موضح بالشكل (3)، تتصف هذه الطبقات بالاصالية الحرارية العالية والعازلية الكهربائية ومثبتة بشكل جيد على الموصلات لضمان تحقيق اتصال فعال وانتشار حراري متجانس لكامل سطح الاتصال [5,6].

بافتراض درجة حرارة الوسط المراد امتصاص الحرارة منه  $T_I$  ودرجة حرارة الوسط الخارجي  $T_{II}$ ، وكثافة التيار المار  $J^E$  وهو مقدار ثابت فرضاً على مساحات الاتصال بين المواد المختلفة.



الشكل (3) المكونات الرئيسية للأزواج الكهروحراري البسيط .

عندما يحدث فرق حراري بين طبقتي السيراميك خلال عمل النظام الكهروحراري، ينتج تأثير سيبيك من خلال اختلاف فرق الكمون بين نهايتين الأزواج الكهروحراري:



$$V = - \int E \cdot dl \quad (13)$$

حيث قيمة (E) معطاة في المعادلة (10)، بإجراء التكامل الخطي للأجزاء الداخلية لكل جزء من المواد المكونة للنظام بفرض أنها ذات بنية متجانسة، ينتج التالي:

$$V = - \int_a^d \alpha_m \cdot \nabla T \cdot dl - \int_d^c \alpha_n \cdot \nabla T \cdot dl - \int_c^b \alpha_m \cdot \nabla T \cdot dl - \int_b^a \alpha_p \cdot \nabla T \cdot dl - \int_a^d \alpha_m \cdot \nabla T \cdot dl \quad (14)$$

وبفرض لا وجود لتدرج حراري عبر سطح المعدن، فإن التكامل الخطي يصبح كالتالي:

$$V = - \int_d^c \alpha_n \cdot \nabla T \cdot dl - \int_b^a \alpha_p \cdot \nabla T \cdot dl \quad (15)$$

وبالتعويض بحدود التكامل ينتج:

$$V = -\alpha_n \cdot [T(c) - T(d)] - \alpha_p \cdot [T(a) - T(b)] \quad (16)$$

وبافتراض درجات الحرارة ثابتة ضمن الطبقات السيراميكية وسطوح الاتصال الداخلية ينتج:

$$V = -\alpha_n \cdot [T_H - T_L] - \alpha_p \cdot [T_L - T_H] \quad (17)$$

ويمكن الكتابة بشكل آخر:

$$V = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot (T_H - T_L) \quad (18)$$

ففي حالة المنبع الكهربائي متصل بالدارة سيحدث مرور للتيار الكهربائي خلال الزوج الكهروحراري، مما ينتج تأثير بلتيه الذي يُحدث امتصاص للحرارة من جهة الطرف البارد وينبذ حرارة من جهة الطرف الساخن للوحدة الكهروحرارية وذلك عند الوصلات، وعند مرور التيار الكهربائي نتيجة حركة الإلكترونات من المادة الكهروحرارية ذات الطراز (n-type) عند الاتصال-الوصلة- (a)، ينتج كمية من الحرارة المنبذة عند (a) نسبة لواحدة المساحة و تعطى بالعلاقة:

$$q_a^* = J_m^T - J_p^T = (\alpha_m - \alpha_p) \cdot T_L \cdot J^E \quad (19)$$

وبالتكامل لكامل مساحة التلامس، فإن كمية الحرارة المطروحة عند (a) بسبب تأثير بلتيه:

$$q_a^P = (\alpha_m - \alpha_p) \cdot T_L \cdot I \quad (20)$$

حيث: تدفق التيار عبر الازدواج الحراري، وبنفس الطريقة السابقة يمكن أن نجد بالنسبة لسطوح الاتصال الأخرى التي يفترض حدوث تدفق للتيار بنفس الاتجاه ، ومعدل كمية الحرارة المطروحة عند الجزء الأعلى للازدواج الحراري بسبب تأثير بلتيه يكون وفق المعادلات:

$$q_H^p = q_b^p + q_d^p = (\alpha_p - \alpha_m)T_H \cdot I + (\alpha_m - \alpha_n) \cdot T_H \cdot I \quad (21)$$

$$q_H^p = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_H \cdot I$$

وبنفس الطريقة تكون كمية الحرارة المطروحة عند الجزء الأسفل للازدواج الحراري:

$$q_L^p = q_a^p + q_d^p = (\alpha_m - \alpha_p)T_L \cdot I + (\alpha_n - \alpha_m) \cdot T_L \cdot I$$

$$q_L^p = -(\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_L \cdot I \quad (22)$$

إن تدفق تيار الإلكترونات عبر الازدواج الحراري سيشكل إضافة بسبب مقاومة حرارة البنية. وإذا كانت أطراف المواد معزولة بشكل جيد فإن مقاومة الحرارة ستحدث تدفق متساوي للخارج في كل نهاية تعطى بالعلاقين:

$$q_L^R = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R^E \quad q_H^R = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R^E \quad (23)$$

حيث  $R^E$ : المقاومة الكهربائية الداخلية للازدواج الكهروحراري. إن مجموع حدود حرارة بلتيه وحرارة المقاومة تشكل المعدل الكلي للحرارة المطروحة عند الجزء العلوي والسفلي للازدواج والتي تُعطى بالعلاقين:

$$q_H = q_H^R + q_H^p = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R^E - (\alpha_p - \alpha_n)T_H \cdot I \quad (24)$$

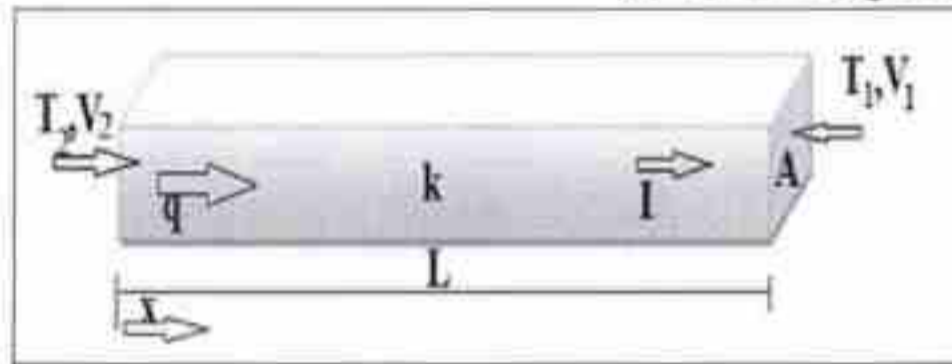
$$q_L = q_L^R + q_L^p = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R^E - (\alpha_p - \alpha_n)T_L \cdot I \quad (25)$$

##### 5 - طريقة تمثيل الدارة:

يمكن من خلال برامج المحاكاة الخاصة بدراسة وتحليل الدارات الكهربائية الحرارية المتكاملة، من هذه البرامج برنامج ( SPICE ) الذي يعتبر أحد أقوى محاكي الدارات التماثلية Analogue circuits نظراً لدوره في التأكد من مشروعية تصميم الدارة و التنبؤ بسلوكها، والرمز اختصار لبرنامج محاكاة مؤكدة بدارة متكاملة Simulation Program With Integrated Circuit Emphasis بينما

يركز PSpice على تصميم الدارات العامة، وتصميم دارة نموذجية لنظام كهروحراري، نعلم أن العلاقات الحرارية الناظمة لنظام ما يجب أن توضع في معادلات ممثلة لعناصر ومكونات الدارة الأصلية المكافئة للنظام الأصلي ولحل مسائل الأنظمة الحرارية يمكن استخدام طريقة نمذجة الدارات، حيث الدارة تُحكم باعتباريات وحدود عامة ، وتكون الدارة الممثلة مكونة من مجموعة من العقد وأسلاك الاتصال وتكون كل عناصر الدارة متصلة مع بعضها البعض حسب ترتيب عناصر الدارة الأصلية التي يمكن تمثيلها بمتغيرين (فرق الكمون-Effort، التدفق-Flow)، أماكن العقد في الدارة تكون حيث تلتقي التدفقات معاً عند نقاط الاتصال، وهناك أيضاً دلالة بالأرقام عند العقد لتدل على فرق الجهود عند الأماكن الخاصة في الدارة. في الدارات الكهربائية، الجهد المتغير يسمى بالفولط (V) ووحدته (V)، والتدفق المتغير هو التيار الكهربائي ويرمز له (I) ووحدته الأمبير (A)، وفي الدارات الحرارية الجهد المتغير هو درجة الحرارة (T) ووحدته الكلفن (K) والتدفق المتغير هو معدل انتقال الحرارة (q) ووحدته الواط (W).

إن نمذجة الأنظمة الكهروحرارية سيتطلب ادماج كلاً من الدارات الكهربائية والحرارية مع بعضهما البعض.



الشكل (4) يبين اتجاه التدفق الحراري والكهربائي عبر عنصر ما.

الشكل (4) يبين عنصر ذو مساحة مقطع متجانسة (A) الايصالية الحرارية (k) والمقاومية الكهربائية ( $\rho^e$ )، سلفترض أن خصائص المواد ثابتة على كامل مساحة مقطع العنصر والعزل كامل على طولها مما ينتج أن التدفق الكهربائي والحرارة يتم باتجاه واحد (انتقال وحيد البعد)، هذا العنصر سيستخدم لمقارنة التوصيل الحراري والكهربائي، ولتحديد مقاومة العنصر

نطبق قانون أوم :

$$J = \frac{E}{\rho \cdot l} \quad (26)$$

بإجراء تكامل لكثافة التيار على كامل مساحة مقطع العنصر يكون:

$$I = \frac{A}{\rho \cdot l} \cdot E \quad (27)$$

كما إن الحقل الكهربائي يمكن أن يكامل على طول العنصر للحصول على فرق الكمون:

$$V_2 - V_1 = \frac{\rho \cdot l}{A} \cdot I = R \cdot I \quad (28)$$

حيث  $R$ : المقاومة الكهربائية للعنصر، المعادلة السابقة يمكن أن يعاد ترتيبها إلى الشكل:

$$I = \frac{1}{R} \cdot (V_2 - V_1) \quad (29)$$

حرارة التوصيل يمكن أن تتمذج بمقاوم (Resistor)، قانون فورييه للتوصيل الحراري

بحالة التدفق وحيد البعد تكون:

$$q = \frac{k \cdot A}{L} \cdot (T_2 - T_1) \quad (30)$$

ويشكل مشابه مع المعادلة السابقة، المقاومة الحرارية المكافئة تعطى بالعلاقة:

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (31)$$

حرارة الحمل (Convection of heat) تنتج على السطح بين جسم صلب و سائل أو

غاز، الارتباط والاتصال المعقد بين الحرارة وتدفق الوسيط (سائل أو غاز) يمكن أن يمثل ويبسط

من خلال معامل انتقال الحرارة الاجمالي (h)، ومن أجل سطح مساحته (A) ودرجة حرارته

( $T_s$ )، معدل التدفق الحراري الخارج من السطح يعبر عنه:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\text{amb}}) \quad (32)$$

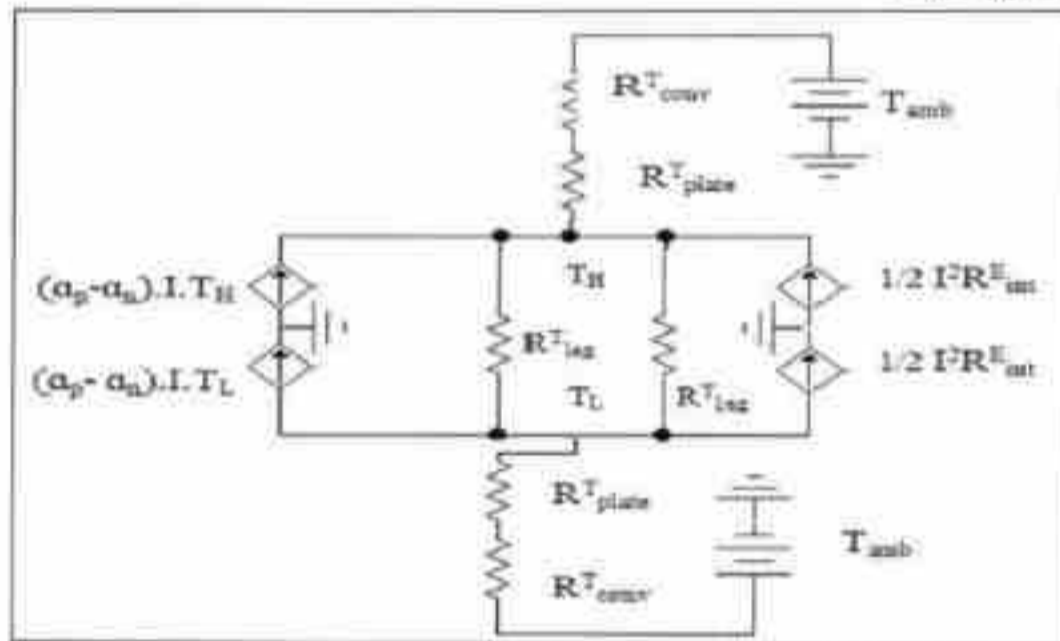
حيث (h): معامل الحمل الحراري الوسطي للسطح،  $T_{\text{amb}}$ : درجة حرارة الوسط

الخارجي بعيداً عن السطح وبالمقارنة مع المعادلة (29) المقاومة الحرارية المكافئة هي:

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (33)$$

## 6- تصميم الدارة المكافئة للازدواج الكهروحراري:

يظهر الشكل (5) دارة نموذجية مكافئة للازدواج الكهروحراري البسيط، حيث فرق الجهد الناتج من خلال تأثير سيبك المعطى بالمعادلة (18)، يعوض كدرجة حرارة منبع الجهد المنتظم على التسلسل مع المقاومة الكهربائية الداخلية ( $R^E$ ) للازدواج الكهروحراري. تم الدلالة على العقد خلال التمثيل في الدارة الحرارية بـ ( $T^H, T^L$ ) وذلك لدرجة حرارة الوصلات الباردة والساخنة للازدواج الكهروحراري، حرارة التوصيل بين عقدتين تظهر خلال مكوني الازدواج يتم التعبير عنها وتمثيلها بـ ( $R^T_{log}$ ). المنابع الحرارية المتصلة مع كل من العقدتين لتمثل لتأثير بلتيه المعبر عن بالمعادلات (21، 22)، حيث المقاومة الحرارية تعطى بالمعادلة (23) والمعادلة (24)، وهذه المنابع متصلة للأرضية طالما الطاقة من هذه المنابع تأتي من المجال الكهربائي. المقاومات الحرارية ( $R^T_{plate} \cdot R^T_{conv}$ ) المتصلة بالعقد الممثلة للجهة الباردة والساخنة وتزود بمسك للضياعات الحرارية بالتوصيل خلال الصفيحة السيراميكية وبالحمل للوسط الخارجي حيث مثلت بمنبع درجة حرارة ثابت.



الشكل (5) يبين الدارة المكافئة لنظام كهروحراري بسيط من زوج واحد.

إن التحدي الأكبر في نمذجة دارة ما هو افتراض أن التدفق الحراري يكون باتجاه واحد ويمكن من خلال التجربة العملية تحديد أين سيكون انحراف في نتائج النمذجة عن نتائج التجربة العملية. وفي نظام ما بغية تأمين قيمة عالية لفرق الجهد المولد - طاقة كهربائية عالية -

للاستخدام في توليد الكهرباء و مقاومة حرارية داخلية عالية لغاية الاستخدام في التبريد ، نلجأ لاستخدام عدة أزواج كهروحرارية في الجهاز الواحد- النظام - بحيث تكون مترابطة مع بعضها البعض من خلال موصلات نحاسية ، وفي النموذج المنروس تم تطوير هذه التقنية من خلال استخدام عدة أزواج كهروحرارية في نظام كهروحراري.

#### 7- مواصفات الوحدة الكهروحرارية (وحدة بلتيه) المستخدمة:

خصائص المواد الكهروحرارية المستخدمة ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) وطبقتي السيراميك وصفائح النحاس الرقيقة أخذت من منتجات إحدى الشركات وموضحة في الجدول (1)، بالإضافة لأن معامل سيك أخذ كقيمة وسطية للنوعين (p-type, n-type) المصنوعين من مادة ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )، ويأخذان القيمة :  $\alpha_p = -\alpha_n = 203.7 \mu\text{V}/\text{K}$  [7].

الجدول (1) يوضح خصائص المواد الكهروحرارية المستخدمة في النظام.

المادة	الصيغة	المقاومة الكهربائية	الاصالية الحرارية
تليرايداليزموت	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	$P_{\text{TE}}^{\text{TE}} = 1.08 * 10^{-3} \Omega.m$	$K_{\text{TE}} = 1.67 \text{ W/m.K}$
طبقتي السيراميك	-	-	$K_{\text{plate}} = 34.6 \text{ W/m.K}$
النحاس	Cu	$P_{\text{cu}}^{\text{cu}} = 1.7 * 10^{-8} \Omega.m$	$K_{\text{cu}} = 400 \text{ W/m.K}$

بينما أبعاد العناصر المستخدمة في تركيب النظام المختبر فموضحة بالجدول (2)

الجدول (2) يبين الأبعاد الهندسية لمكونات النظام المختبر.

المادة	الصيغة	الطول	العرض	الارتفاع
تليرايداليزموت	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ Legs	0.60 mm	0.60 mm	1.50 mm
رقيقة النحاس	Copper Tabs	0.60 mm	0.36 mm	1.50 mm
طبقتي السيراميك	Ceramic Plates	12.00 mm	13.00 mm	0.50 mm
النحاس	Copper Blocks	50.00 mm	63.00 mm	6.50 mm

لقياس المقاومة الكهربائية الداخلية للمواد الكهروحرارية يجب دائماً أن يحسب فرق الكمون الناتج من أي فارق لدرجات الحرارة بين نهايتي هذه المواد، فعندما نقيس هذه المقاومة الصغيرة لكنها ذات تأثير على تدفق التيار خلال عمل النظام في المواد الكهروحرارية هذا التيار سيؤدي لإنتاج حرارة و تبريد عند نهاية المواد الكهروحرارية

بسبب ظهور تأثير بلتييه، هذا التأثير يمكن أن ينخفض، إذا كان اتجاه تدفق التيار يتبدل بسرعة ، حيث لن يكون هناك وقت كافي للحرارة التي تتوزع في نصف الدارة الأول لخلق فرق درجة حرارة واضح داخل النظام المختبر. جهاز التحليل (HP 4294A) يستخدم لقياس المقاومة الداخلية للنموذج ، والجهاز المحلل يستخدم لضبط منبع تيار على (20 mA) ، وإزالة تذبذب التردد من 100 kHz إلى 10kHz. آلية المحاكاة المستخدمة تقيس جهد الدخل عند نقطة دخول الجهاز، ومعدل مضاعفة التواتر نسبة للتيار العابر عبر مقاومة الجهاز، القيمة الوسطى المقاسة أكثر (32) مرة من التردد عند درجة حرارة خارجية (22.5C<sup>0</sup>) و المقاومة (5.866 Ω).

### 8- قياس معامل الحمل الحراري:

للتغلب على صعوبات دقة النمذجة أثناء قياس الحمل الحراري الناتج ، سيؤخذ معامل انتقال الحرارة (h) كالقيمة التجريبية، في هذه التجربة سنسعى لتحديد معامل انتقال الحرارة بتسخين صفيحة النحاس لدرجة حرارة مرتفعة ، وإزالة المنبع الحراري وتم ملاحظة التغير عند الصفيحة التي تبرد لدرجة حرارة الغرفة، علماً أن صفيحة النحاس حضرت مسبقاً وطبقة رقيقة من مادة لاصقة عليها، حيث توضع على سطح التلامس مع نابذ الحرارة لتحقيق التلامس الفعال في تجربة المولد ثم أنها توضع على الجهة الساخنة للصفيحة السيراميكية بنفس الطريقة. تسخن الصفيحة لدرجة حرارة (60C<sup>0</sup>)، الحرارة المزلة من الصفيحة الساخنة تسمح بتبريد مؤقت للهواء المحيط، علماً أن قياسات درجة حرارة الصفيحة أخذت زمن (5sec) باستخدام المزدوجة الحرارية التي تعكس بين الطبقات المتلامسة. هذه التجربة يمكن أن تتمزج كدارة إفراغ سعوي عبر مقاوم. السعة الحرارية (C) للطبقات الرقيقة النحاسية تعرّف بمعدل كمية صغيرة من الحرارة المضافة للطبقة وهي مطابقة لدرجة حرارة التغير وتعطى بالعلاقة التالية:

$$C = \frac{dq}{dT} \quad (34)$$

بإعادة ترتيب معادلة التفاضل، معدل إزالة الحرارة من الطبقة يعطى بالعلاقة:

$$q = - C \frac{dT}{dt} \quad (35)$$

حيث  $T_s$  : هي تابعة للتدفق الحراري عبر مقاوم الحمل.

$$T_s - T_{amb} = \frac{q}{h \cdot A} \quad (36)$$

بتعويض المعادلة (36)، (35) في بعضهما ينتج المعادلة التفاضلية

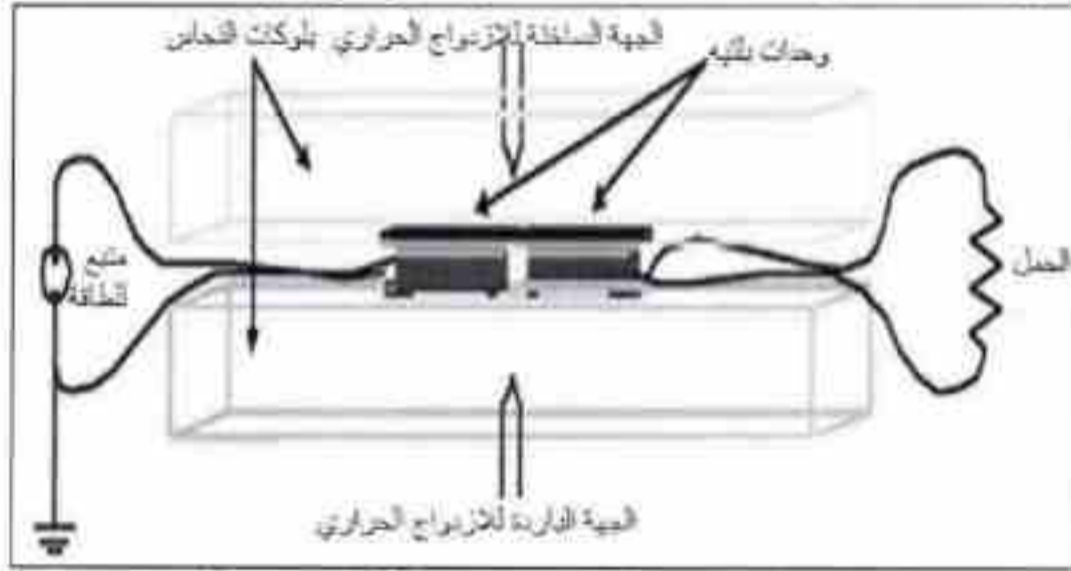
$$\frac{dT_s}{dt} + \frac{h \cdot A}{C} \cdot T_s - \frac{h \cdot A}{C} \cdot T_{amb} \quad (37)$$

الحل بالنسبة لهذه المعادلة هو من الشكل :

$$T_s(t) = [T_s(t=0) - T_{amb}] \cdot e^{\frac{-h \cdot A}{C} t} + T_{amb} \quad (38)$$

### 9- النتائج والمناقشة:

الشكل (6) يبين مكونات النظام الذي بني لاختبار قدرة المواد الكهروحرارية على توليد الطاقة اللازمة لحمل ما من أجل المقارنة مع نتائج قيم المحاكاة السابقة.

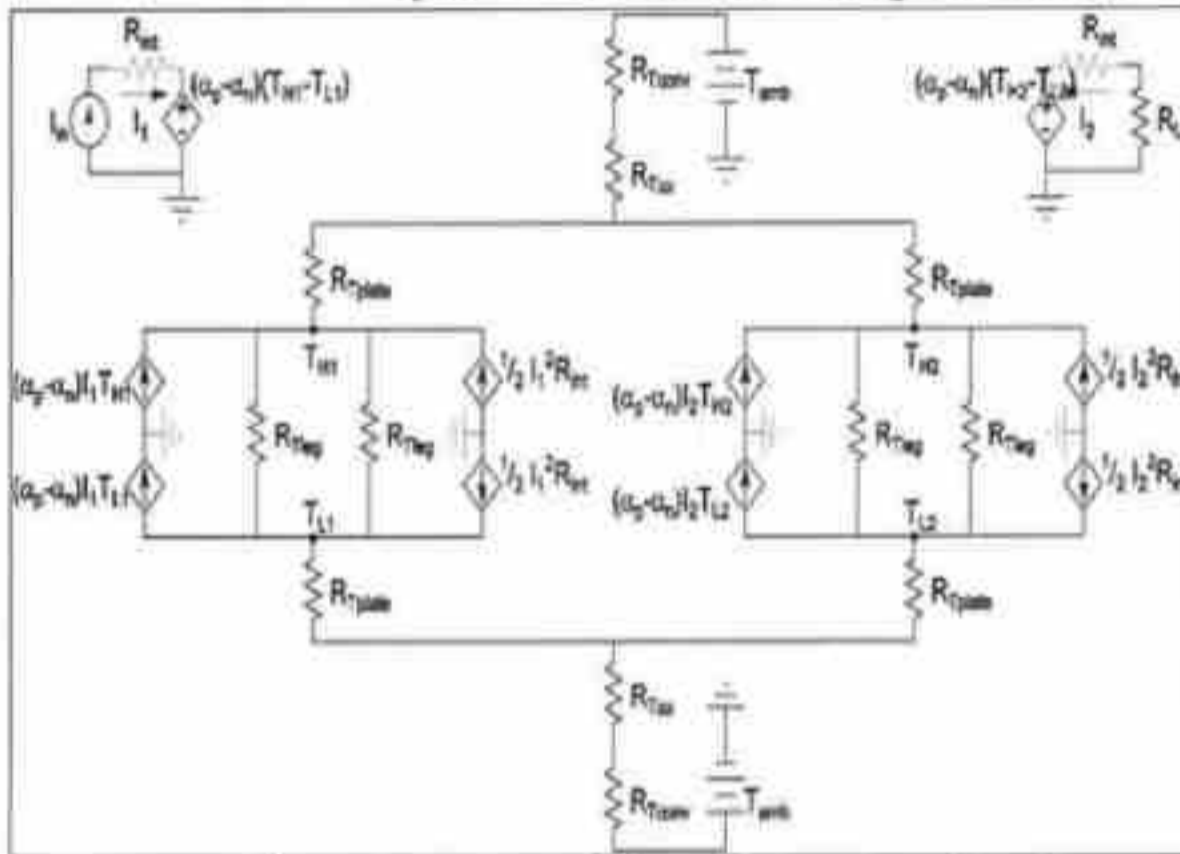


الشكل (6) يبين نظام التجربة المدروس.

نظام التجربة يتكون من وحدتين كهروحراريتين من الطراز (TE-65-0.6-1.5) المتوضعتين بجانب بعضهما البعض ومتصلتين بألواح من النحاس ويحوي كل هذه المكونات صفيحتين من السيراميك أحدهما تشكل الطبقة العلوية والآخرى تشكل الطبقة السفلية بحيث تحمي المكونات السابقة من الأخطار المختلفة وتسمح بالتبادل الحراري مع الوسط الخارجي وتشكل عازل كهربائي مع الوسط المحيط الخارجي ، توضع مادة حرارية لاصقة على سطوح التلامس لتحسين عملية الاتصال الحراري بين ألواح النحاس



والصفائح السيراميكية، وقد زودت التجربة بمزدوجة حرارية (Thermocouple) تتوضع على مركز كل لوح لقياس درجات الحرارة، فالوحدة الأولى توصل لمزود بالطاقة لخلق فرق في درجات الحرارة بين لوحين النحاس، الوحدة الثانية توصل للحمل (مقاومة) لقياس فرق الجهد الناتج، جهاز (Keithley mod.2400) يقيس قيمة لمقاومة الحمل ( $R^E_L=15.7 \Omega$ )، التيار الداخل يتزايد على مراحل للسماح بقياس درجات الحرارة والجهد الناتج عند كل مرحلة بدقة. دارة النموذج المكافئ للازدواج الحراري والذي تم تطويره من أجل محاكاة نظام التجربة المدروسة يظهر في الشكل (7)، النموذج افترض أن ألواح النحاس قادرة على خلق درجة حرارة ثابتة خلال مسطوح السيراميك، السطوح الخارجية للطبقات السيراميكية متصلة مع بعض كمعددة درجة حرارة. المقاومات الحرارية تمثل ألواح النحاس حيث تتوضع بين العقد ومقاومات الحمل الحراري.



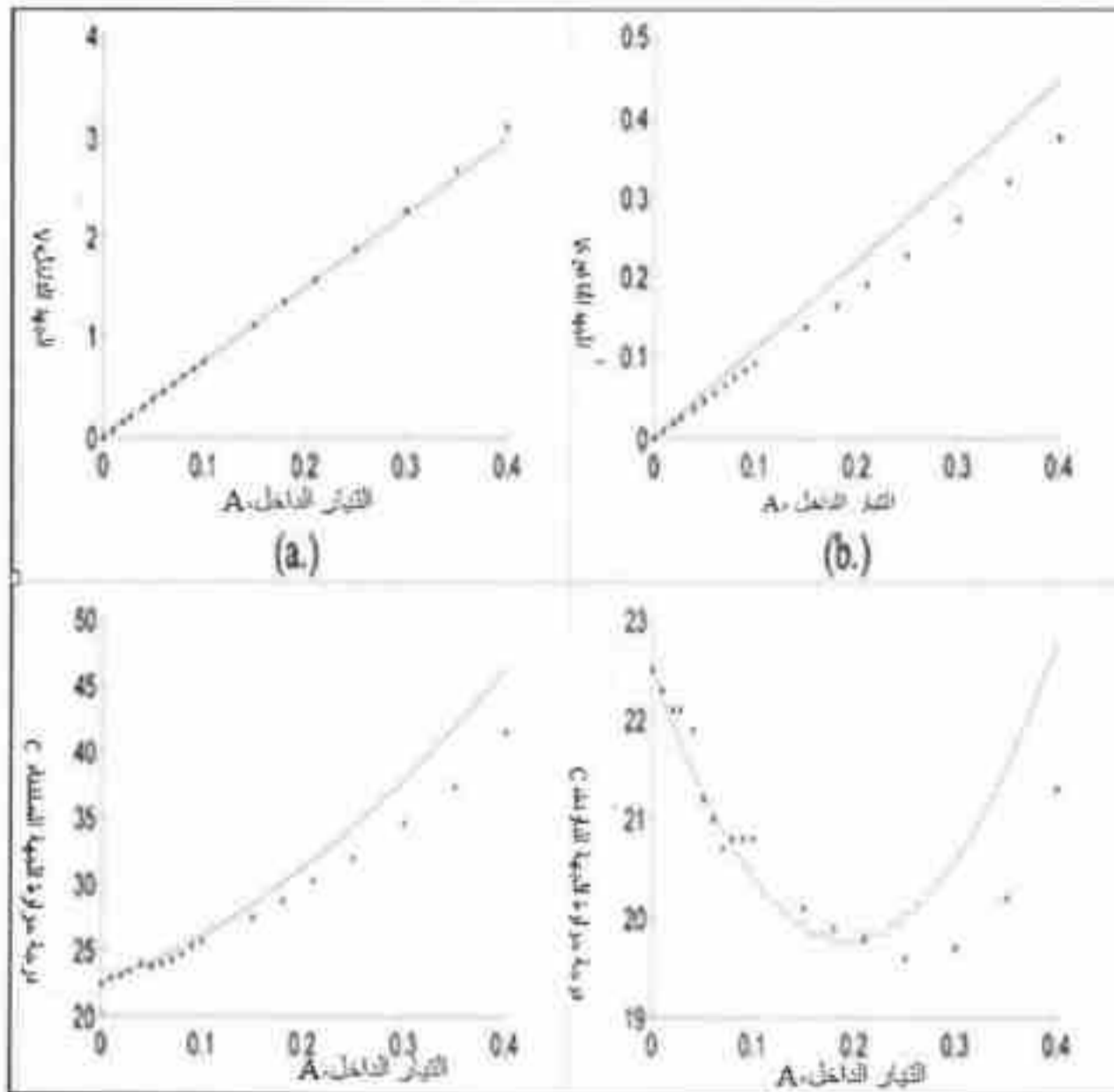
الشكل (7) يبين الدارة المكافئة النمذجة للنظام المدروس في التجربة.

ولحساب قيم المقاومات المتغيرة الموضحة بالجدول (3) وبشكل خاص القيمة المحسوبة ( $R^E_{int}$ )، المقاومة (AC) قسيت بنسبة خطأ 0.2%. تمت نمذجة النظام المدروس بواسطة أحد برامج النمذجة. برنامج (PSPICE Software package).

الجدول (3) يبين ملخص للحسابات الخاصة بالنموذج.

المقاومة	العلاقة	القيمة
$R_{int}^E$	$2 \cdot n \cdot \left( \frac{\rho_{FE}^E \cdot H_{leg}}{W_{leg} \cdot L_{leg}} + \frac{\rho_{Cu}^E \cdot H_{sub}}{W_{sub} \cdot L_{sub}} \right)$	$= 5.865 \Omega$
$R_{leg}^T$	$\frac{H_{leg}}{k_{FE} \cdot W_{leg} \cdot L_{leg}}$	$= 2500 \text{ K/W}$
$R_{plate}^T$	$\frac{H_{plate}}{k_{plate} \cdot W_{plate} \cdot L_{plate}}$	$= 0.093 \text{ K/W}$
$R_{Cu}^T$	$\frac{H_{Cu}}{k_{Cu} \cdot W_{Cu} \cdot L_{Cu}}$	$= 0.005 \text{ K/W}$
$R_{con}^T$	$\frac{1}{h \cdot (W_{Cu} \cdot L_{Cu} + 2W_{leg} \cdot H_{Cu} + 2L_{Cu} \cdot H_{Cu})}$	$= 20.42 \text{ K/W}$

قيم المحاكاة والتجربة الناتجة قيست لكل من المتغيرات التالية : الجهد الناتج ، الجهد الداخل ، درجة حرارة الجهة الساخنة والجهة الباردة، وقد تم تعثيل قيم تلك المتغيرات السابقة بدلالة قيم التيار الداخل بالشكل (8)، الانحدار في المخطط الممثل لقيم (I-V) في الشكل (8 -a) يشير إلى أن قيمة مقاومة الجهاز الفعالة التجريبية ( $R_{eff}^E = 7.5 \Omega$ ) في هذه الحالة الخاصة في كلا حالتى المحاكاة و التجربة. تختلف قيمة المقاومة (DC) الفعالة عن المقاومة الداخلية الفعلية المقاسة في حالة (ac) ، بسبب فرق درجات الحرارة الناشئة بفعل تأثير بلتية و فرق الجهد الناتج بفعل تأثير سيبيك. نتائج المحاكاة للجهد الناتج ودرجة حرارة الجهة الساخنة موضحة بالشكل (8 - b ، 8 -c) على الترتيب، المنحنيات تتبع اتجاه انحناء القيم المقاسة فعليا لكن بمعدل ازدياد أكبر، هذا يشير أن القيمة الفعلية لتأثير سيبيك هي أقل انحناء من القيمة المعطاة من قبل الصانع ، من خلال المنحنيات نرى أيضاً أن درجة حرارة الجهة الباردة تتناقص بشكل مقبول مع التيار الداخل قبل أن يأخذ المنحنى صعوداً كمثل المقاومة الحرارية.



الشكل (8) يبين المنحنيات البيانية للمتغيرات (الجهد الداخل، الجهد الناتج، درجات الحرارة) بدلالة تيار الدخل.

#### 10- الخلاصة: يمكن أن نعمل النتائج الحاصلة بالنقاط التالية:

- ◆ دائرة النموذج المصممة قادرة على محاكاة سلوك الأجهزة الكهروحرارية المستخدمة في حالتها صل الأجهزة ( تبريد- توليد الطاقة الكهربائية).
- ◆ الدارة المصممة للنموذج تسمح بتحليل الأنظمة و اختيار التصميم الأمثل للأنظمة الكهروحرارية عندما تكون الدراسة التحليلية معقدة.
- ◆ النتائج لكلاً من التجربة والمحاكاة أظهرت تقارباً واضحاً بالقيم وبدقة جيدة.

**References**

- [1] FRANCIS R., 2006- Commercialization of Thermoelectric Technology, GM Power train ,General Motors Corporation., 04.1-04.9.
- [2] AGWU A.G.; RUTHERFORD W.I.; WESSAM E.; SANKOWSKI B.R. 2009- Assessment of Thermoelectric Module with Nanofluid Heat Exchanger, *Applied Thermal Engineering*, **29**, 491-500.
- [3] LINEYKIN S.;YAAKOV S.B, 2007-Modeling and analysis of thermoelectric Modules, IEEE transactions on industry application, **43**, 505 – 512.
- [4] GROMOV G., 2002- Thermoelectric cooling system modules, RMT. Ltd, 53 Leninskij prosp, Moscow 119991 Russia, 1-9
- [5] YANG BAO., 2007- Thermoelectric Technology Assessment, Department of Mechanical Engineering, University of Maryland at College Park, College Park, MD 20742, 188.
- [6] HUANG B.J.; CHEN C.J.; DUANG C.L., 2000- A Design Method For a Thermoelectric Cooler, *Int J Refrigeration*, **23**, 208-218.
- [7] STOCKHOLM J.G, 1995- Modeling of Thermoelectric Cooling Systems, In: CRC Handbook of Thermoelectric, New York, CRC Press, 677-683.

---

---

## Studying and Modeling Single-Stage Thermoelectric System by PSPICE program

Yasser Al-Ghanimieh \*

Dept. design Mechanical and product, Faculty of Mechanical and electrical Engineering,  
University of al-furat

Master's degree in mechanical engineering ,Member of technique committee

### Abstract

Firstly .Aim of This paper studying single-stage thermoelectric system by new way that permit to description The fundamentals phenomenon (the effects) is reduced in the thermoelectric system like ( peltier effect, and seebeck effect,.....) during working the system ,and demonstration the equations all each part from the system.

Secondly, done modeling and simulation the behavior of thermoelectric system used for both cooling and power generation by development and verification of a SPICE program who permit thermal and electrical modeling by design circuit-equivalent model for use in (experimental prototype) for all parts. modeling thermoelectric system mean design circuit-equivalent model to simple thermoelectric system which is the building one block of thermoelectric starter from thermocouple (n-type) + (p-type).

Scaling of the model for simulation of more complicated devices is then discussed. Simulation results compared favorably to the actual experimental results, this is clear in charts.

Received //2013

Accepted //2013