مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (10) العدد (9) 2026
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (9) 2026

دراسة وتحليل تأثير تغير درجات الحرارة في الأنظمة الإلكترونية في البيئات الفضائية

د.م حسن محمد البستاني*

م. علي جمال عبد الله**

(تاريخ الإيداع 2026/3/8 . قُبِل للنشر في 2026/5/4)

ملخّص

مع تزايد الاعتماد على الأنظمة الإلكترونية في التطبيقات الحساسة مثل تطبيقات الفضاء، الاستكشاف الجوي، واستخراج النفط، بات من الضروري فهم تأثير العوامل البيئية المفرطة HARSH Environment وخاصة درجات الحرارة على أداء وعمر المكونات الإلكترونية.

قد تتعرض الأنظمة الإلكترونية لظروف بيئية مفرطة تتمثل بـ: درجات الحرارة المنخفضة أو العالية، الإشعاع، الاهتزازات الميكانيكية. قد تتراوح درجات الحرارة في الفضاء بين $-230\,℃$ في الظّل إلى $+150℃$ في أشعة الشمس المباشرة، بينما تتراوح درجة الحرارة التشغيلية للإلكترونيات بين $-100℃$ إلى $+200℃$ تقريباً ما يجعل تصميم الدارات الإلكترونية والحفاظ على أدائها تحدياً كبيراً.

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير الظروف الحرارية القاسية على أداء نظام إلكتروني بسيط (LED Chaser)، والذي يُستخدم في العديد من التطبيقات الفضائية والصناعية. تم تحليل المكونات الرئيسية للدارة (NE555 Timer، CD4017B Counter، LEDS، المقاومات، المكثفات) ضمن نطاق درجات حرارة يتراوح بين $-100℃$ حتى $+200℃$.

سوف نقوم بتحليل تغير مجال عمل المكونات مع تغير درجة الحرارة ضمن المجال المذكور، حيث أظهرت النتائج حدود التشغيل الآمن لكل مكون، وتم تحسين الحدود التشغيلية للمكونات (مجال التشغيل) باستخدام آليات الإدارة الحرارية السلبية Passive وفق عدة سيناريوهات، تُعد هذه الدراسة خطوة مهمة نحو تصميم أنظمة إلكترونية تعمل في البيئات الفضائية المتطرفة حرارياً.

الكلمات المفتاحية: لوحات الدارات المطبوعة PCBs، الانتقال الحراري، تقنيات الإدارة الحرارية، معادلة ارينيوس.

*: مدرس في قسم النظم الحاسوبية والإلكترونية – كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات – جامعة طرطوس

**: طالب ماجستير في قسم هندسة النظم الحاسوبية والإلكترونية – كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات – جامعة طرطوس – سورية

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (10) العدد (9) 2026
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (9) 2026

Investigation and Analysis of Thermal Variation Effects on Electronic Systems in Space Environments

Dr-Eng. Hasan Mohammad Albustani *
Eng. Ali Jamal Abdullah **

(Received 8/3/2026. Accepted 4/5/2026)

□ ABSTRACT □

With the increasing reliance on electronic systems in sensitive applications such as space application, aerospace exploration, and oil extraction, it has become essential to understand the impact of harsh environmental factors, particularly temperature, on the performance and lifespan of electronic components.

Electronic systems may be exposed to extreme environmental conditions including: low or high temperatures, radiation, and mechanical vibrations. Temperatures in space can range from -230°C in the shade to +150°C in direct sunlight, while the operating range for electronics is approximately $-100℃$ to $+200℃$ This poses a significant challenge for designing electronic circuits and maintaining their performance.

This research aims to study the effect of extreme thermal conditions on the performance of a simple electronic system (LED Chaser), which is used in numerous space and industrial applications. The main components of the circuit (NE555 Timer, CD4017B Counter، LEDs، resistors، capacitors) were analyzed within a temperature range of [-100°C to +200°C].

We will analyze the change in the components operating range with temperature variation within the mentioned range. The results showed the safe operating limits for each component and the operating limits were improved. This study is an important step towards designing electronic systems that operate in extreme thermal space environments.

Keywords: Printed Circuit Boards (PCBs)، Heat Transfer، Thermal Management Techniques، Arrhenius Equation.

* Assistant Professor, CESE Department - Faculty of Communication and Information Engineering Technology – Tartous University – Syria
** Master Student at CESE Department, Faculty of Communication and Information Engineering Technology - Tartous University - Syria

- مقدمة:

مع تقدم العلوم والتكنولوجيا المختلفة عبر السنين، ازداد التطور البشري وازدادت معه المشكلات التي قد تعرقل عملية التطور هذه، لعل أبرزها المشكلات التقنية والإلكترونية التي قد تواجهنا عند تصميم الأنظمة الإلكترونية والدارات المتكاملة للعمل في بيئات قاسية أو ما يعرف بـ (Harsh Environment) وخاصة في المجالات العسكرية، مجال استخراج النفط، التطبيقات الطبية، وأخيراً في مجال الأقمار الصناعية والمحطات الفضائية.

تُعد الدارات المتكاملة (Integrated Circuits) حجر الأساس في تصميم الأنظمة الحديثة، بدءاً من الأنظمة البسيطة وصولاً إلى أنظمة الفضاء والأنظمة المعقدة. ونظراً لأهمية الحصول على أداء عالي وموثوقية جيدة في البيئات القاسية، أصبح تحليل السلوك الحراري للدارات الإلكترونية عنصرًا حاسمًا في مرحلة التصميم والمحاكاة. فالحرارة الناتجة عن التبديد الكهربائي في المكونات الإلكترونية تؤثر بشكل مباشر على أداء الدارة واستقرارها، والعمر التشغيلي للمكونات، ما يؤدي إلى فشل النظام بالكامل إذا لم تتم إدارتها بشكل صحيح.

سوف نستخدم دارة LED Chaser التي تمثل نموذجًا مثاليًا لدراسة التفاعل بين السلوك الكهربائي والديناميكا الحرارية التي تعبر عن تحول الطاقة الحرارية من وإلى أشكال أخرى من الطاقة، تعكس هذه الدارة تعقيدات هندسية حقيقية عند تشغيلها في مجالات حرارية واسعة، إذ تتأثر خصائص المكونات بأعلى درجة بالانجراف الحراري (Thermal Drift) ويحصل تغييرات في التوصيل الكهربائي للمواد شبه الموصلة (MORISON, 2002).

1-1- أهمية البحث وأهدافه:

تتجلى أهمية هذا البحث في دراسة النظام الإلكتروني ومكوناته بدقة، وتحليل درجة حرارة هذه المكونات عند مجال واسع من درجات الحرارة، ووضع خريطة حرارية تظهر مناطق الحرارة العالية (HotSpots) وكيفية التحكم بدرجة حرارة الدارة باستخدام تقنيات الإدارة الحرارية بهدف زيادة مجال عمل الدارة عند التعرض لدرجات حرارة متطرفة.

1-2- الدراسات المرجعية:

نظراً للتطور السريع في الصناعات الفضائية، أصبحت هناك متطلبات متزايدة لتحسين وتطوير أنظمة الإدارة الحرارية للمركبات الفضائية. تقدم الدراسة (ALGHAMDI & ALOTAIBI, 2021) تحليلاً شاملاً لعوامل الفشل في البيئات القاسية، مع التركيز على التأثيرات الحرارية والإشعاعية على الشرائح الإلكترونية. وتبحث الدراسة (RAMESH & KUMAR, 2020) نماذج انتقال الحرارة في الأنظمة الفضائية، وتركز على تأثير الفراغ (غياب الحمل الحراري) على تبريد المكونات، إذ تؤكد أن التوصيل (Conduction) والإشعاع (Radiation) هما الوسيلتان الوحيدتان لتبديد الحرارة في الفضاء. تستعرض الدراسة (WANG & MENG, 2024) تقنيات الإدارة الحرارية للإلكترونيات في المركبات الفضائية وفقاً لعمليات نقل الحرارة المختلفة، بما في ذلك اكتساب الحرارة ونقلها وطردها. إذ أظهرت الدراسة أنه بعد تجاوز درجة حرارة الوصلة (Tj) لشريحة إلكترونية مصنوعة السيليكون حوالي 80 إلى 90 درجة مئوية، قد تنخفض وثوقيتها بنحو 10% مع كل زيادة قدرها 2 درجة مئوية. وأظهرت الدراسة (SUN & OTHERS, 2023) التغير الحاصل في أداء الدارات الإلكترونية وتقليل درجة حرارة المكونات باستخدام رغوة النحاس والتي تعتبر من تقنيات الإدارة الحرارية السلبية. وتحققت الدراسة (WANG & MENG, 2024) من ازدياد معدل فشل المكونات الإلكترونية مع تزايد درجة الحرارة وذلك وفقاً لمعادلة أرينيوس للتسارع الحراري. كما أظهرت الدراسة (LUI & OTHERS, 2023) دقة عالية في التنبؤ بالعمر التشغيلي للمكثفات، حيث قدمت نموذجاً معدلاً لمعادلة أرينيوس يدمج تأثير الإجهاد الميكانيكي مع العامل الحراري لتقدير معدل فشل وصلات اللحام في دارات PCB، مما

يدعم منهجية هذا البحث في استخدام نماذج أرينيوس لتقدير العمر الافتراضي للدارة الإلكترونية تحت ظروف قاسية. وذكرت الدراسة (PEABODY, 2022) أن الأقمار الصناعية التي تدور في مدار الأرض تتعرض لدرجة حرارة تصل إلى 393 كلفن في عند التعرض لأشعة الشمس الكاملة و3 كلفن في الظل مما يتطلب منا فهماً عميقاً لعمليات نقل الحرارة وخصائص المواد، وأكدت على أهمية تحديد بنية التصميم الحراري المناسبة وإجراء الحسابات الحرارية مبكراً وتحديد متطلبات التكيف الحراري للمكونات. وهذا ما تظهره الدراسة (OHADI, 2005) إذ تتناول تقنيات التبريد المختلفة سواءً كانت التبريد بالرش (Spray Cooling) أو تطبيق تقنيات التبريد الكهروهيدروديناميكية (EHD) أو أنظمة التبريد بالقنوات الدقيقة MicroChannel (Cooling) للتطبيقات عالية الكثافة الحرارية.

2- أدوات البحث:

2-1- الظروف البيئية الحرجة في الفضاء:

تختلف الظروف البيئية الحرجة التي قد تتعرض لها الأنظمة الإلكترونية في الفضاء (COSTANTINO, 2013) وقد تكون:

1- حرارية: عالية – منخفضة.

2- ذرية: إشعاعية – نووية.

3- إلكترونية: التفريغ الستاتيكي – الموصلات الكهرومغناطيسية.

4- كيميائية: التآكل – عوامل انفجارية.

5- ميكانيكية: الاهتزازات – الانحشار.

بناءً عليه يوجد عدة عوامل يجب أخذها بعين الاعتبار عند تصميم إلكترونيات الفضاء:

1. الشريحة الأساسية للدارة قد يحصل فيها خطأ Defect ما يؤدي إلى حدوث أخطاء في الخرج أو حدوث تحول في الطور (Phase Transformation).
2. المعدن المستخدم أو الموصلات قد تعاني من حالات قصر أو حالات قطع مما يعرقل عمل النظام.
3. قد تفقد الكابلات والأسلاك عازليتها أو تفقد تسليحها (Shielding). (COSTANTINO, 2013)

2-2- لوحة الدارات المطبوعة PCB:

تعد لوحة الدارات المطبوعة (PCB) مكون مهم ضمن الأجهزة الإلكترونية وهي بمثابة منصة مهمتها ربط العناصر الإلكترونية المثبتة عليها ودعمها (مقاومات – مكثفات – دارات متكاملة)، مصنوعة من مادة غير ناقلة (فيبرغلاس مثلاً) يتم طلائها بمادة ناقلة (نحاس) بالاعتماد على رسم تم إعداده مسبقاً يوضح المسارات المراد تنفيذها، الهدف الرئيسي من استخدام لوحات الدارات المطبوعة PCB هو أنها تؤمن الدعم الميكانيكي و التوصيل الكهربائي للعناصر الكهربائية مثل الترانزستورات – المكثفات – الديود – الدارات المتكاملة و غيرها هذه العناصر حيث يتم تثبيتها على سطح لوحة PCB ويتم الوصل بينها من خلال المسارات التي تم رسمها بواسطة المادة الناقلة (SHTREN & OTHERS, 2018).

2-2-1- فوائد استخدام لوحات PCB في الأجهزة الإلكترونية:

1. توفر تصميم مدمج ومنظم للمكونات والعناصر الإلكترونية، مما يساعد في التقليل من حجم الشريحة الإلكترونية بشكل عام.
2. توفر لوحات الدارات المطبوعة موثوقية عالية للعناصر الإلكترونية، حيث أن الاتصالات بين المكونات المختلفة تكون أكثر استقرارًا مقارنة بالأسلاك اليدوية.
3. كما يمكن إجراء عمليات إصلاح وتحديد الأعطال بسهولة، حيث يمكن تحديد المكونات الخاطئة واستبدالها بسهولة (NEFF & CLAYTON, 2018).

2-2-2- أنواع دارات PCB:

1. Single-Sided PCB: تتألف من طبقة واحدة من مادة عازلة تسمى الركيزة (عادة تستخدم الألياف الزجاجية "الفيبرغلاس Fiberglass") تم طلاءها بطبقة من النحاس من إحدى الجهتين.
2. Double-Sided PCB: هذا النوع من اللوحات يمتلك طبقة من النحاس في كل من الجهتين بالتالي يتم رسم المسارات الواصلة بين العناصر الإلكترونية في كلا الجهتين، و كل طبقة تتصل بالأخرى من خلال ثقوب موصلة، يؤمن هذا النوع من اللوحات مساحة أكبر للعناصر الإلكترونية كما يساعد في تصميم دارات إلكترونية أكثر تعقيداً.
3. Multi-Layers-PCB: تتألف من عدة طبقات من المادة العازلة (الركيزة) يوجد بينها طبقات من النحاس، يمكن أن يتراوح عدد الطبقات من 4 وحتى 16 طبقة تبعاً لدرجة تعقيد الدارة المراد تنفيذها، يتم الوصل بين الطبقات من خلال ثقوب موصلة، ما يسهم في تحقيق ترابط وثيق بين العناصر الإلكترونية.
4. Rigid PCB: و هي النوع الأكثر شيوعاً، تصنع من مواد صلبة مثل الفيبرغلاس، يشتهر هذا النوع من اللوحات بثباته و موثوقيته، لذلك هو مناسب للتطبيقات التي تحتاج أن تكون الدارة ثابتة و آمنة.
5. Flexible PCB: و تسمى أيضاً لوحات الدوائر المطبوعة المرنة، تصنع من مواد مرنة مثل البوليميدات "Polyimides"، هذه اللوحات قابلة للانحناء بالتالي تكون مثالية للتطبيقات التي تتطلب تقييد المساحة.
6. Rigid-Flex PCB: هذا النوع من اللوحات تجمع بين مزايا كل من Rigid PCB و Flexible PCBإذ تتكون من أقسام صلبة و أقسام مرنة مما يسمح بتصميم دارات معقدة قابلة للطي و الانثناء، يستخدم هذا النوع في التطبيقات التي تتطلب متانة وتوفير المساحة ومرونة عالية في نفس الوقت (SHTREN & OTHERS, 2018).

2-3- تأثير الحرارة في الشرائح الإلكترونية:

الحرارة هي عبارة عن طاقة في حالة عبور، تنشأ عن الفرق في درجات الحرارة بين سطحين. ومصطلح انتقال الحرارة هو الذي يتعامل مع الآليات المسؤولة عن انتقال الطاقة من مكان الى آخر عند وجود فرق في درجات الحرارة، أي أن انتقال الحرارة هو طاقة حرارية تنتقل بسبب اختلاف درجة الحرارة المكانية.

بحسب القانون الثاني للديناميكا الحرارية فإن الحرارة تنتقل بشكل طبيعي من جسم ذي درجة حرارة عالية إلى جسم ذي درجة حرارة منخفضة. إذ تتضمن الطاقة الحرارية حركات مثل دوران الجزيئات وانتقالها واهتزازها، تعبر درجة الحرارة عن متوسط الطاقة الحركية لهذه الجزيئات.

عندما يمر التيار الكهربائي من خلال المكونات الإلكترونية فإنه يولد حرارة، توليد هذه الحرارة يتناسب مع مستوى التيار ومقاومة المكون الكهربائية، فإذا تولدت الحرارة في مكون ما دون أن يتم تبريده، فإن درجة حرارة المكون تبدأ في الارتفاع وستستمر في الارتفاع حتى يذوب المكون ويتم فصل التيار. لمنع هذا الارتفاع في درجة الحرارة، يجب استخدام تقنيات لتقليل درجة الحرارة (BERGMAN & LAVINE, 2018).

الهدف من التحليل الحراري للدارة هو تحديد متى تكون هناك حاجة إلى تدابير التبريد مثل المراوح Fans أو مشعات الحرارة أو النحاس الإضافي Copper أو الفتحات الحرارية Thermal Vias للحفاظ على درجة الحرارة ضمن الحدود (BERGMAN & LAVINE, 2018).

2-3-1- دراسة خصائص المكون:

أولاً يجب الاطّلاع على الممانعة الحرارية للمكون، يمكن أن تكون قيمة هذه الممانعة منخفضة والتي قد تكون (حوالي20 C°/W) لمضخمات الطاقة المنخفضة أو الدارات المتكاملة، أو يمكن أن تكون مرتفعة (حوالي200 C°/W) للمعالجات الدقيقة (JAMNIA, 2025).

كهربائياً تعرَّف الاستطاعة على أنها جداء الجهد V بالتيار I

$$P = V \times I \qquad (1)$$

حيث:

- P الاستطاعة (مقدرة بالواط :W)
- V فرق الجهد (مقدراً بالفولت :V)
- I التيار (مقدراً بالأمبير :A)

يتم تحديد درجة حرارة التشغيل من خلال العلاقة:

$$T = T_a + (P \times R_{th}) \mathbf{(2)}$$

حيث:

- T: درجة حرارة المكون (مقدرةً بالدرجة المئوية °C)
- T_a درجة حرارة المحيط (مقدرةً بالدرجة المئوية °C) :
- الاستطاعة المبددة (مقدرةً بالواط :WP)
- R_{th} المقاومة الحرارية للمكون (مقدرةً درجة مئوية/واط °C/W) :

لتحديد تسارع الفشل الحراري للمكونات الإلكترونية عند درجات الحرارة المرتفعة نلجأ إلى استخدام معادلة أرينيوس Arrhenius Equation) إذ تعتمد هذه المعادلة على فكرة أن ارتفاع الحرارة يسرّع التفاعلات الكيميائية والميكانيكية المسببة للتلف (فصل الطبقات – تدهور العوازل – تشقق اللحام(JAMNIA, 2025) ( ) تعطى معادلة أرينيوس لحساب معدل فشل المكون بالعلاقة:

$$k = A \times e^{-\frac{E_a}{R}} \qquad (3)$$

حيث:

- k: معدل تسارع الفشل
- E_a: طاقة التنشيط للعملية المسببة للتلف (تقاس بواحد J أو eV)
- R: ثابت الغاز قيمته مساوية لثابت بولتزمان (8.617×10^{-5} eV/K)
- T: درجة الحرارة المطلقة بالكلفن (K)
- A: ثابت تجريبي

2-3-2- تقنيات الإدارة الحرارية:

يمكن تصنيف تقنيات الإدارة الحرارية في الأنظمة الإلكترونية إلى:

1- الإدارة الحرارية الفعالة (Active):

هذا النوع من التقنيات يتطلب مصدر تغذية (Power Supply) ويوفر أداء أفضل ولكنه في نفس الوقت يقلل من الموثوقية ويزيد من التعقيد.

من التقنيات الأساسية للإدارة الحرارية للنوع Active:

1. المبردات (Refrigerators and Coolers)
2. حلقات الضخ (Pumped Loops)
3. الحمل الحراري القسري (Forced Convection)

2- الإدارة الحرارية السلبية (Passive):

هذه الآلية سهلة التنفيذ وموثوقيتها عالية ولا تتطلب استخدام مصدر طاقة، لكنها محدودة الأداء بالنسبة للعديد من التطبيقات، تقنيات الإدارة الحرارية الأساسية من النوع Passive:

1. التوصيل (Conduction)
2. الحمل الحراري الطبيعي (Natural Convection)
3. الإشعاع (Radiation)
4. تغيير المرحلة (Phase change)

2-4- الأدوات البرمجية المستخدمة:

1. برنامج Altium Designer: والذي يعتبر أحد أفضل برامج تصميم الدارات الإلكترونية والذي يجمع بين الرسوميات (Schematics) وتصميم الدارات المطبوعة (PCB) كما يقدم ميزة التصميم ثلاثي الأبعاد للدارة المطبوعة ويوفر أدوات توجيه متقدمة لتوصيل المسارات الإلكترونية المعقدة بدقة وكفاءة عالية. يتم فيه هذا البرنامج تصميم دارة LED Chaser كهربائياً والتحقق من كفاءة تشغيلها ثم يتم تصميم دارة مطبوعة ذات طبقتين لدارة LED Chaser المدروسة ثم يتم تصديرها إلى برنامج Altair PollEX من أجل عملية المحاكاة (ALTIUM DOCUMENTATION, 2025)
2. برنامج Altair PollEX: يركز هذا البرنامج على عمليات المراجعة والتحقق كما يقوم بتحليل سلامة الإشارة والتأكد من عدم وجود تداخل (Crosstalk) أو هبوط في الجهد (Voltage Drop) كما يوفر ميزة التحليل الحراري للدارات الإلكترونية وتحديد النقاط الساخنة (Hotspots) على اللوحة قبل تصنيعها لحماية المكونات الحساسة من التلف. يتم في هذا البرنامج استيراد الدارة المطبوعة التي تم تصميمها في برنامج Altium Designer ثم إجراء عمليات التحليل الحراري عليها والحصول على خرائط حرارية وقيم

الحرارة لمكونات الدارة المدروسة عند مجال واسع من درجة الحرارة $[-100℃, 200℃]$
(ALTAIR USER GUIDE, 2023)

2-5- تصميم دارة LED Chaser ومحاكاتها:

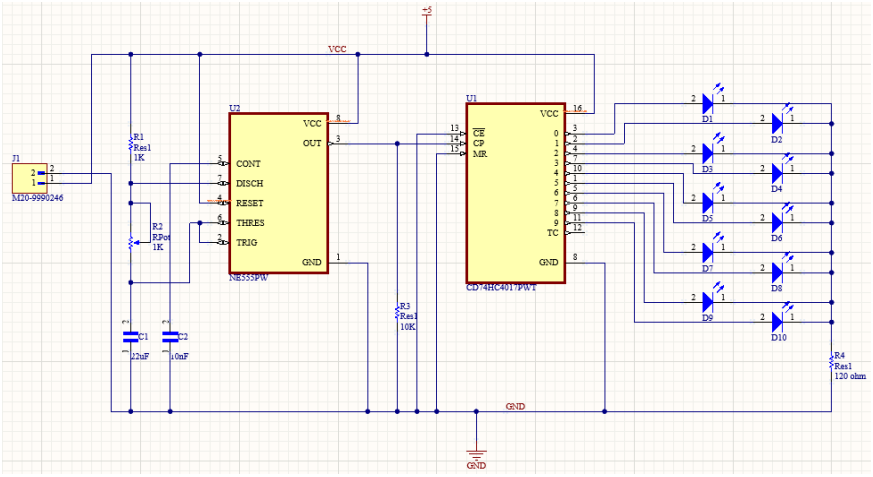
سوف نقوم بإجراء تحليل حراري على الدارة الإلكترونية (LED Chaser)، إذ تُستخدم هذه الدارة بشكل شائع في تطبيقات مختلفة مثل المؤشرات البصرية وأجهزة الإنذار البسيطة، وتعتبر مناسبة لهذه الدراسة نظراً لبساطتها ولاحتوائها على مكونات إلكترونية شائعة (مقاومات – مكثفات – NE555 Timer – LED - CMOS 4017B IC Decade Counter/Divider) يمكن تحليل سلوكها الحراري، تبلغ سماكة الشريحة الإلكترونية 1.6mm وفق المواصفات القياسية التطبيقية.

2-5-1- مكونات دارة LED Chaser:

1. (Astable NE555 Timer Timer IC (5551 يعمل كمذبذب غير مستقر: بتردد محدد، يتحكم تردد هذه (Clock Pulses) لتوليد سلسلة من النبضات المربعة (Multivibrator النبضات في سرعة تتابع إضاءة الـ LEDs.
2. CMOS 4017B IC Decade Counter/Divider يستقبل نبضات الساعة من 555 Timer) ويقوم بتفعيل مخارجه العشرة 0 حتى 9Q بالتتابع مع كل نبضة ساعة، يتم توصيل كل (Q أو مجموعة صغيرة من) منفصل LED مخرج من مخارج العداد بـ LEDs).
3. وعددها (LEDs مجموعة من 10 يتم توصيل كل منها بمخرج من مخارج العداد، (CMOS 4017B
4. مجموعة من المقاومات والتي تملك وظيفتين:
   - مقاومات لتحديد تيار الـ LEDs وحمايتها.
   - مقاومات لتحديد تردد مذبذب 555 Timer. (عادةً يتم استخدام مقاومتين)
5. مكثفان لهما الوظائف التالية:
   - مكثف سيراميكي Ceramic Capacitor لتحديد تردد مذبذب (NE555 Timer .
   - مكثف إلكتروليتي Electrolytic Capacitor لترشيح الضوضاء بالقرب من مصدر (التغذية لدارة IC
6. مصدر تغذية $V_{DD} = 9V$ لتوفير الجهد اللازم لعمل الدارة.

2-5-2- مبدأ عمل الدارة:

يوضح الشكل (1 دارة LED Chaser ومكوناتها، حيث يقوم مؤقت NE555 Timer بتوليد للعداد (Clock Input) نبضات مربعة يتم إرسالها إلى مدخل الساعة CMOS 4017B IC ومع كل نبضة ، (يقوم العداد بتفعيل المخرج التالي في التسلسل 0Q، 1Q، 2Q.. ،9Q، LED وبما أن كل مخرج متصل بـ (Q تضيء وتطفئ بالتتابع، و بعد الوصول إلى المخرج الأخير LEDs فإن الـ Q9 (يعود العداد إلى المخرج الأول Q0. وهكذا)



الشكل (1) دارة LED Chaser

2-5-3- التحليل الحراري لمكونات الدارة الإلكترونية

يهدف هذا التحليل الحراري إلى دراسة درجة حرارة كل مكون من مكونات دارة LED Chaser في نطاق درجات حرارة يتراوح بين [−100°C, 200°C] وهو نطاق يغطي معظم الظروف الحرارية التي تتعرض لها الأنظمة الإلكترونية في البيئات الفضائية .سيتم تحليل أداء كل مكون على حده لفهم تأثير درجات الحرارة المتطرفة على أدائه، .كما سيتم العمل على دراسة حرارة المكونات الإلكترونية وتوسيع مجال التشغيل الحراري لها

لنبدأ أولا بتحديد خصائص كل مكون من مكونات الدارة وتحديد استهلاكها للطاقة، يظهر الجدول (1) بارامترات الأداء لمكونات دارة LED Chaser المستخدمة في عملية المحاكاة:

الجدول (1) بارامترات الأداء لمكونات دارة LED Chaser:

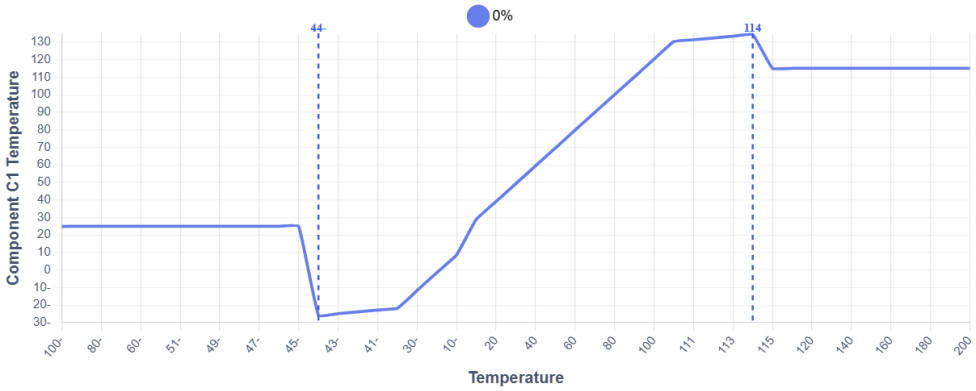
المكون	المقاومة الحرارية R_{th}	طاقة التنشيط E_a	الاستطاعة المبددة	المرجع
Timer IC 555	100 W/°C	0.7 eV	600 mW	(TEXAS INSTRUMENTS. 2026).
CMOS 4017B IC	80 W/°C	0.7 eV	500 mW	(TEXAS INSTRUMENTS, 2004)
Resistors	100 W/°C	0.2 eV	250 mW	(ROHM, 2012)
Ceramic Capacitor	50 W/°C	0.3 eV	10 mW	(MULTICOMP, 2013)
Electrolytic Capacitor	50 W/°C	0.9 eV	15 mW	(PANASONIC, 2016)
LEDS	250 W°C - 400W/°C	0.4 eV	100 mW	(KINGBRIGHT, 2006)

3- نتائج البحث والمناقشة:

سوف تتم عملية المحاكاة من خلال عدة سيناريوهات، في البداية سوف يتم تطبيق المحاكاة على الدارة المدروسة بحالتها الطبيعية ومن دون استخدام تقنيات الإدارة الحرارية، ثم سوف نقوم باستخدام تقنية الإدارة الحرارية السلبية (Passive) حيث سنعتمد على خاصية التوصيل (Conduction) في عملية تعديل حرارة المكونات وذلك من خلال إضافة طبقة من معدن النحاس بسماكة تصل إلى 5% من سماكة الشريحة الإلكترونية للدارة المدروسة والتي تبلغ 1.6mm ثم بسماكة 25% ثم بسماكة 50% بهدف إدارة درجة الحرارة التي تتعرض لها مكونات الدارة وبالتالي تحسين مجال العمل الحراري للدارة.

يتم تطبيق عملية المحاكاة على الدارة ككل حيث نحصل خلال كل عملية محاكاة على درجات حرارة جميع العناصر الإلكترونية في الدارة المدروسة، سيتم عرض نتيجة المحاكاة للعنصر الإلكتروني C1 خلال كل سيناريو معتمد، ثم سيتم عرض نتيجة المحاكاة لبقية المكونات.

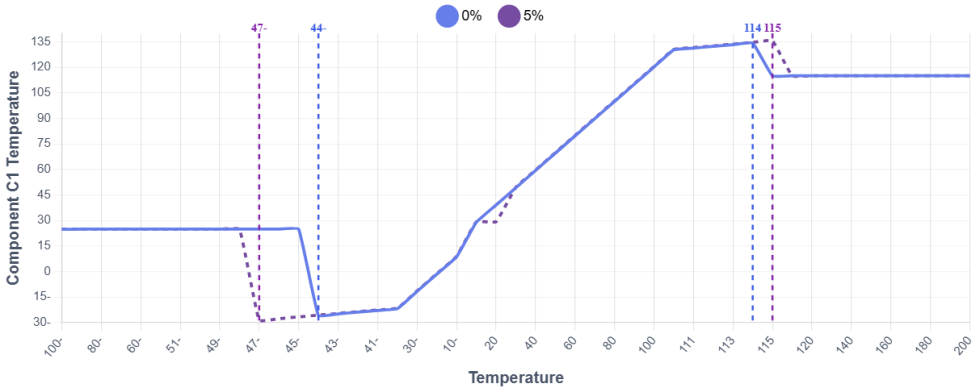
3-1- المحاكاة دون تطبيق تقنية إدارة حرارية:



الشكل (2) مجال عمل المكثف C1 قبل إضافة طبقة النحاس

يظهر في الشكل (2) مقدار التغير في درجة حرارة المكثف C1 عند تغير درجة الحرارة المحيطة في المجال $[-100℃, 200℃]$ إذ كانت الدارة الإلكترونية في حالة عمل ضمن المجال الحراري $[-44℃ ، 114℃]$ بلغت درجة حرارة المكثف C1 $-25.88℃$ في درجة الحرارة المحيطة $-44℃$ و $134.36℃$ عند درجة الحرارة $114℃$.

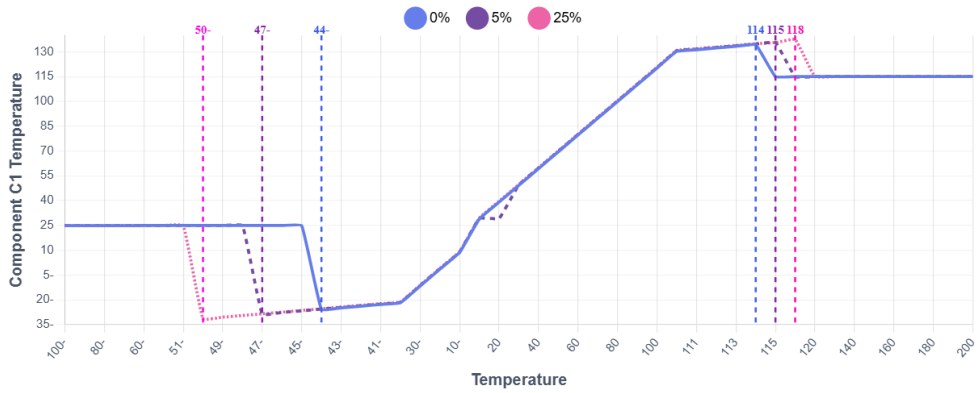
3-2- المحاكاة مع إضافة طبقة نحاس سماكتها 5%:



الشكل (3) مجال عمل المكثف C1 بعد إضافة طبقة بسماكة 5%

نلاحظ في الشكل (3) ازدياد مجال عمل المكثف C1 عند إضافة طبقة من معدن النحاس بسماكة 5% حيث أصبحت الدارة الإلكترونية في حالة عمل ضمن المجال الحراري $[-47℃ ، 115℃]$ بينما كان مجال العمل قبل إضافة طبقة النحاس $[-44℃ ، 114℃]$ بلغت درجة حرارة المكون $-28.67℃$ في درجة الحرارة المحيطة $-47℃$ و $135.67℃$ عند درجة الحرارة $115℃$.

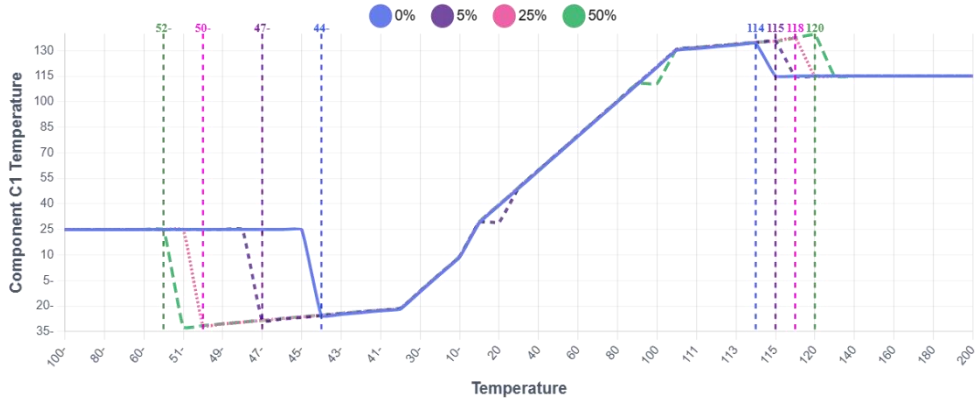
3-3- المحاكاة مع إضافة طبقة نحاس سماكتها 25%:



الشكل (4) مجال عمل المكثف C1 بعد إضافة طبقة بسماكة 25%

يظهر في الشكل (4) مجال عمل المكثف C1 عند إضافة طبقة من معدن النحاس بسماكة 25% حيث ازداد مجال عمل الدارة ليصبح [−50℃ ، 118℃] بلغت درجة حرارة المكون −31.51℃ في درجة الحرارة المحيطة −50℃ و 137.45℃ عند درجة الحرارة 118℃.

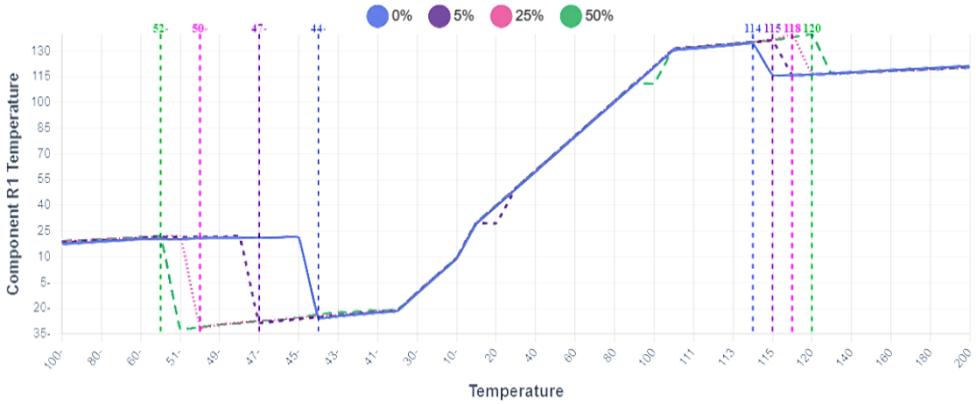
3-4- المحاكاة مع إضافة طبقة نحاس سماكتها 50%:



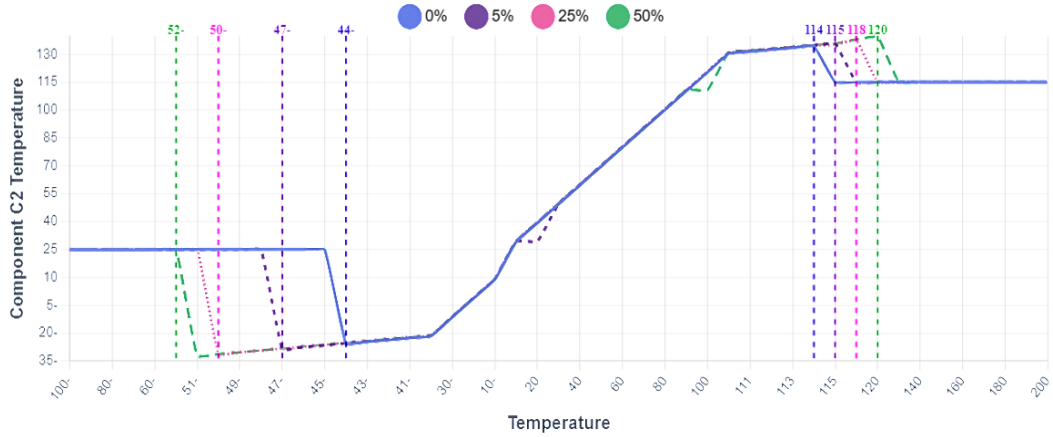
الشكل (5) مجال عمل المكثف C1 بعد إضافة طبقة بسماكة 50%

كما نلاحظ في الشكل (5) ازدياد مجال عمل المكثف C1 عند إضافة طبقة من معدن النحاس بسماكة 50% حيث ازداد مجال عمل الدارة ليصبح [−52℃ ، 120℃] بلغت درجة حرارة المكون −32.54℃ في درجة الحرارة المحيطة −52℃ و 139.04℃ عند درجة الحرارة 120℃.

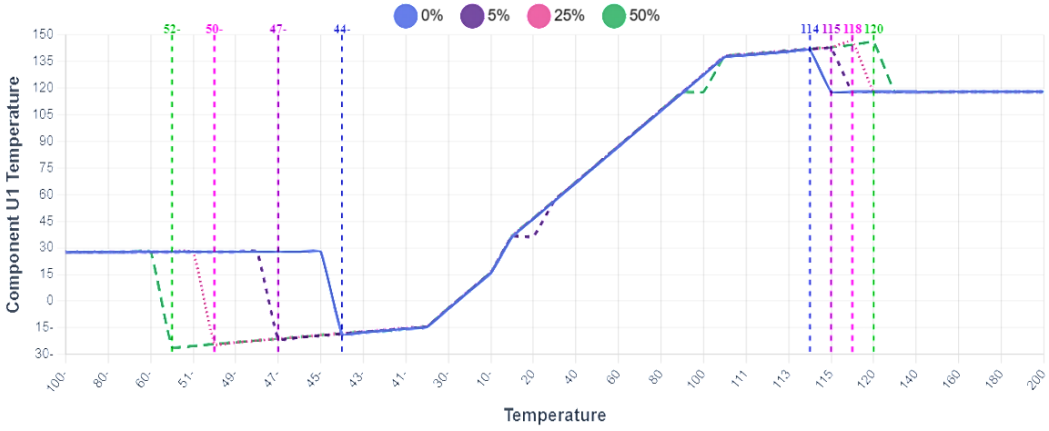
بشكل مشابه يوضح الشكل (6) و (7) و (8) و (9) تغير درجة حرارة المقاومة(R1) والمكثف (C2) والدارة المتكاملة CD4017 (U1) والدارة المتكاملة NE555 (U2) وذلك عند تغير درجة الحرارة المحيطة ضمن المجال المدروس في مختلف ظروف المحاكاة (دون إضافة طبقة نحاس، مع إضافة طبقة بسماكة 5% ، مع إضافة طبقة بسماكة 25% ، مع إضافة طبقة بسماكة 50%).



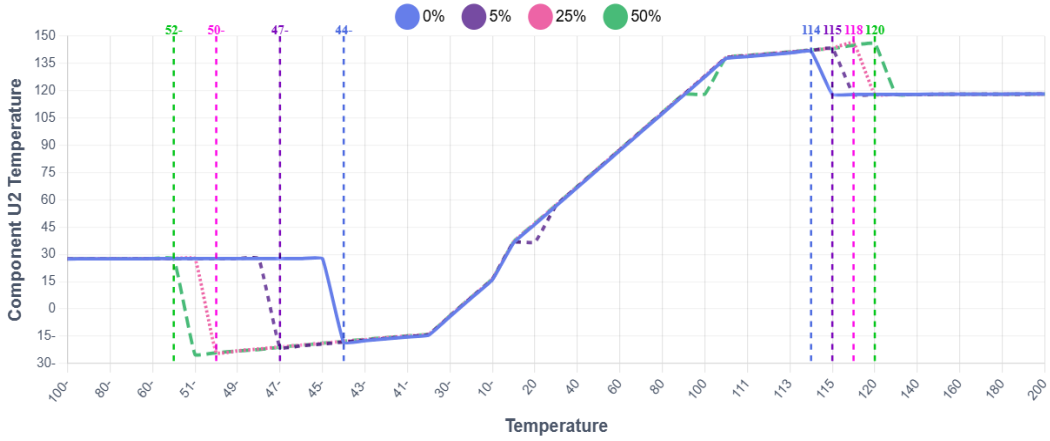
الشكل (6) مجال عمل ودرجة حرارة المقاومة R1



الشكل (7) مجال عمل ودرجة حرارة المكثف C2



الشكل (8) مجال عمل ودرجة حرارة الدارة المتكاملة U1



الشكل (9) مجال عمل ودرجة حرارة الدارة المتكاملة U2

يظهر الجدول)2 (قيم درجات حرارة المكونات ومجال عملها في ظروف تشغيلية عدّة.

الجدول)2 (نتائج تطبيق المحاكاة على دارةLED Chaserفي ظروف بيئية وتشغيلية مختلفة

سيناريوهات العمل	مجال العمل	مجال درجات حرارة المكونات المختلفة (ابتداء من أقل درجة حرارة وصولاً إلى أعلى درجة حرارة للمكونات ككل)
دون إضافة طبقة نحاس	[−44°C ، 114°C]	[−25.88°C ،141.75°C]
إضافة طبقة نحاس بسماكة 5%	[−47°C ، 115°C]	[−28.67°C ، 143.3°C]
إضافة طبقة نحاس بسماكة 25%	[−50°C ، 118°C]	[−31.5°C ، 146.4°C]
إضافة طبقة نحاس بسماكة 50%	[−52°C ، 120°C]	[−32.4°C ، 146.43°C]

4- الاستنتاجات والتوصيات:

أظهرت نتائج المحاكاة الحرارية للدارة دون تطبيق أي آلية إدارة حرارية وجود تباين واضح في درجات الحرارة عبر مكونات الدارة، وكان مجال عمل الدارة [−44°C ، 114°C] حيث تراوحت القيم بين −50°C في المناطق الطرفية التي لا تحتوي على عناصر الكترونية و −18°C في المناطق المركزية التي تحوي الدارات المتكاملة (وذلك باعتبار أن درجة الحرارة المحيطة −44°C) وبين 91°C في المناطق الطرفية و 141°C في المناطق المركزية التي تحتوي على العناصر الإلكترونية والدارات المتكاملة (وذلك عند درجة الحرارة المحيطة 114°C).

عند إضافة طبقة حماية من النحاس بسماكة 5%، وجدنا تحسناً ملموساً في توزيع الحرارة، كما تحسن التجانس الحراري بين مكونات الدارة وشريحة الدارة الأساسية بشكل واضح وازداد مجال تشغيل الدارة إلى [−47°C ، 115°C] بنسبة تصل إلى 2.531% ، وعند إضافة طبقة نحاس بسماكة 25% ازداد مجال التشغيل عن المجال الأصلي إلى [−50°C ، 118°C] بنسبة 6.3291% ، وعند إضافة طبقة نحاس بسماكة 50% ازداد مجال التشغيل عن المجال الأصلي إلى [−52°C ، 120°C] بنسبة 8.8607%

هذه النتائج تظهر مدى تأثير آليات الإدارة الحرارية وخاصة السلبية Passive في تحسين المجال التشغيلي للدارات الإلكترونية في البيئات التي تعاني من قيم متطرفة لدرجات الحرارة، حيث وصلت نسبة التحسين إلى 8.8607% وفق السيناريوهات المعتمدة، بناءً على ذلك نوصي باستخدام آليات الإدارة الحرارية السلبية Passive والعمل على تطويرها لكونها لا تستهلك أي طاقة كهربائية، وذات تكلفة منخفضة ووثوقية عالية مقارنة بآليات الإدارة الحرارية الفعالة Active التي تستهلك الطاقة الكهربائية بنسبة كبيرة علاوةً على التعقيد الكبير والتكلفة العالية وبالتالي انخفاضاً في وثوقية الدارة بشكل عام (SMITH, 2011).

5- قائمة المراجع

[1] MORISON, J. A. 2002, "*Thermal Management of Microelectronic Equipment*"، Springer.

[2] ALGHAMDI & ALOTAIBI, M. 2021, "*Reliability Analysis of Electronic Systems in Harsh Environments: A Review*". "IEEE Access".

[3] RAMESH & KUMAR، A. 2020 "*Thermal Modeling and Reliability Assessment of Electronic Components in Spacecraft Systems*". "Journal of Spacecraft and Rockets"، 57"(4)، P(789–801).

[4] YI-GAO LV، YAO-TING WANG، TONG MENG، QIU-WANG WANG، WEN-XIAO CHU. 2024. "*Review on thermal management technologies for electronics in spacecraft environment. Energy Storage and Saving*"، Volume 3، Issue 3، P (153-189).

[5] SUN، GUO، ZHANG، WHITEHOUSE، ZHOU، XU، & WANG، C. 2023."*Experimental study of battery passive thermal management system using copper foam-based phase change materials. International Journal of Thermofluids*".

[6] LIU، Y.، ZHANG، H.، & WANG، J. 2023. "*Thermal Acceleration Modeling of PCB Solder Joint Fatigue Using Modified Arrhenius Equation*". "Microelectronics Reliability".

[7] PEABODY، H. 2022. "*Thermal Design for Spaceflight. NASA Goddard Space Flight Center، Spacecraft Thermal Engineering Course*"، P (79-82).

[8] OHADI، M.، & QI، J، 2005. "*Thermal Management of Harsh-Environment Electronics. In: Microscale Heat Transfer Fundamentals and Applications. NATO Science Series II: Mathematics، Physics and Chemistry*"، vol 193. Springer، Dordrecht.

[9] COSTANTINO، N 2013 ،"*Design and Testing of Electronic Devices for Harsh Environments*"، p(3-15)،

[10] SHTERN Y. I. SHERCHENKOV ، A. A. ROGACHEV ، M. S. and BABICH A. V، 2018 "*Investigation of Thermoelectric Properties and Thermal Stability of Semiconductor Materials for the Application in Middle Temperature Thermoelectric Generators*،" IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)، P.61.

[11] NEFF، CLAYTON، 2018 "*Analysis of Printed Electronic Adhesion، Electrical، Mechanical، and Thermal Performance for Resilient Hybrid Electronics*"، P.20.

[12] BERGMAN، T. L.، LAVINE، A. S.، INCROPERA، F. P.، & DEWITT، D. P 2018."*Fundamentals of Heat and Mass Transfer (8th ed.)*".

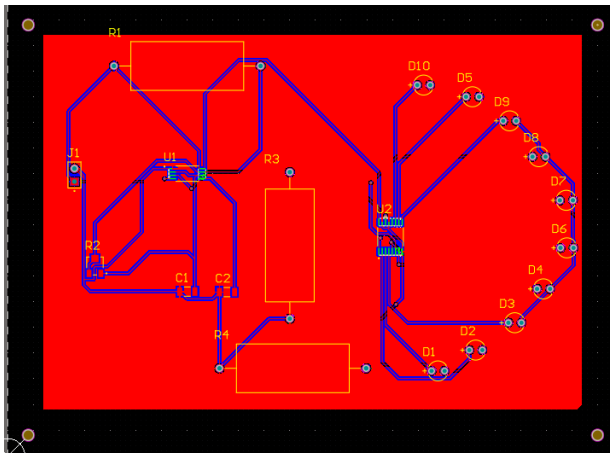
[13] JAMNIA، A، 2025 "*Third Edition Practical Guide to the Packaging of Electronics Thermal and Mechanical Design and Analysis*" P(34-48)،

[14] ALTIUM. ALTIUM DESIGNER DOCUMENTATION [User manual]. 2025. https://www.altium.com/documentation

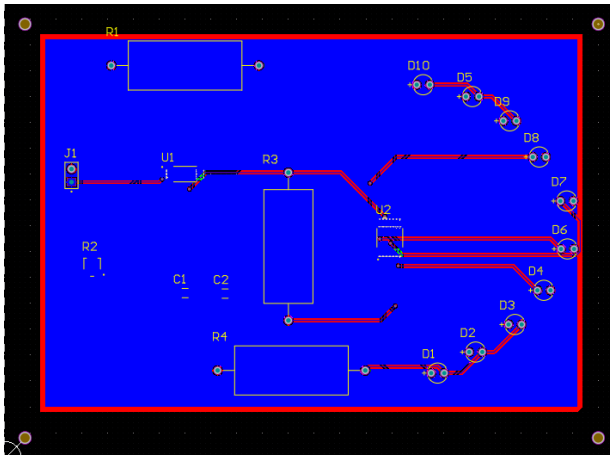
[15] ALTAIR. POLLEX UPE user guide [User manual]. 2023. https://2023.help.altair.com/2023.1/pollex/topics/chapter_heads/pollex_upe_r.htm
[16] TEXAS INSTRUMENTS. 2026. Xx555 Precision Timers (Rev. K) [Data sheet]. https://edgeworker.ti.com/lit/gpn/ne555
[17] TEXAS INSTRUMENTS. 2004. CD4017B, CD4022B TYPES (Rev. C) [Data sheet]. https://edgeworker.ti.com/lit/gpn/cd4017b
[18] ROHM. 2012. Standards nominal resistance values, etc. (Rev. B) [Application note]. https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/applinote/passive/resistor/common/resistance_value.pdf
[19] MULTICOMP, 2013. Ceramic Disc Capacitor (V1.0) [Data sheet]. https://www.farnell.com/datasheets/1729039.pdf
[20] PANASONIC. 2016. Aluminum Electrolytic Capacitors [Technical guide]. https://docs.rs-online.com/3570/0900766b815c4ec7.pdf
[21] KINGBRIGHTt. 2006. L-53ID-5V [Data sheet]. Retrieved from https://elcodis.com/parts/2741315/L-53ID-5V.html
[22] SMITH, J. 2011. "*Fundamentals of active vs. passive thermal management*". EDN Network.

ملحق الأشكال

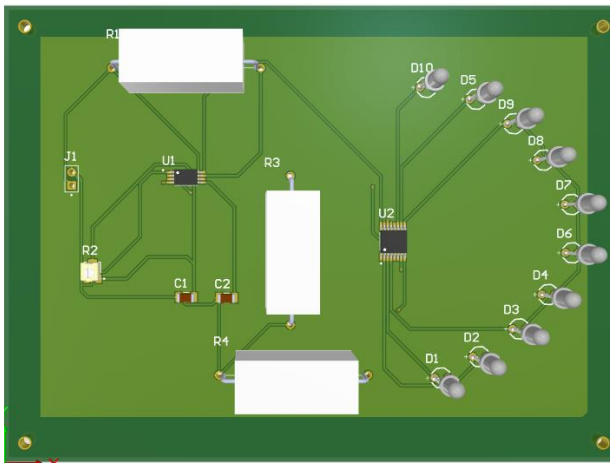
1- تم تصميم الدارة الإلكترونية باستخدام برنامج Altium Designer ثم تم تصميم الدارة المطبوعة PCB من طبقتين, يظهر الشكل (1) الطبقة العليا من الدارة المطبوعة PCB بينما يظهر الشكل (2) الطبقة السفلى من دارة PCB, ويظهر في الشكل (3) الدارة المطبوعة بتقنية 3D.



الشكل (1) الطبقة العليا من شريحة PCB لدارة LED Chaser



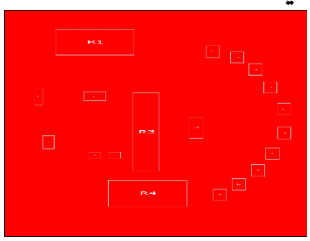
الشكل (2) الطبقة السفلى من شريحة PCB لدارة LED Chaser



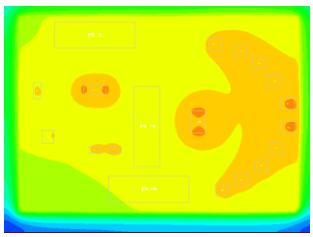
الشكل (3) شريحة PCB بتقنية 3D

2- تم تنفيذ المحاكاة الحرارية للدارة المدروسة باستخدام برنامج Altair PollEX وحصلنا منها على خرائط حرارية وعلى قيم درجة الحرارة لمكونات الدارة المدروسة ككل وفق عدة سيناريوهات. تظهر في الأشكال التالية الخرائط الحرارية الناتجة عن عمليات المحاكاة.

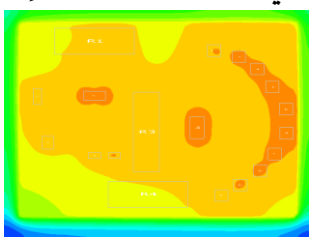
2-1- الخرائط الحرارية للدارة المدروسة عند إجراء محاكاة دون تطبيق تقنية إدارة حرارية:



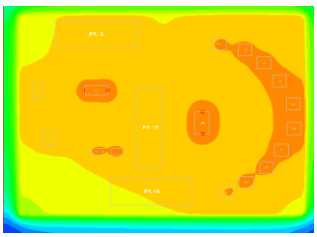
−50°C



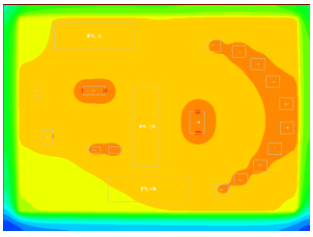
−44°C



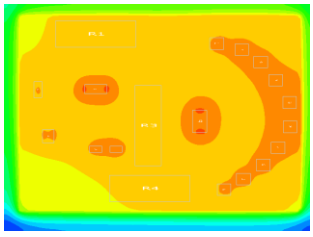
−30°C



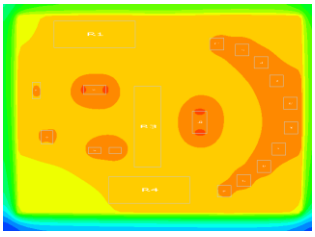
−20°C



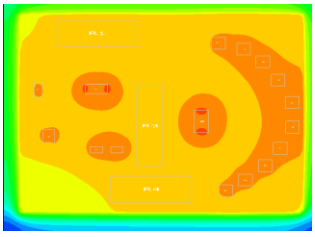
−10°C



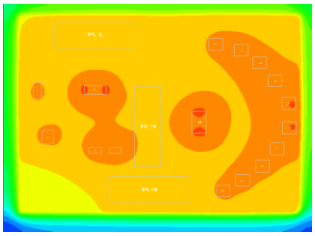
0°C

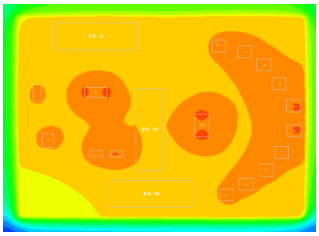


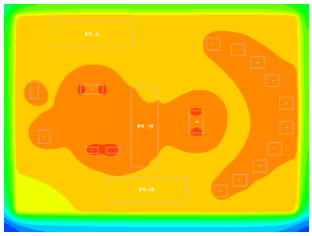
10°C

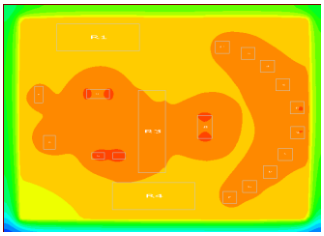


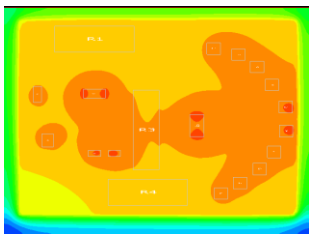
20°C

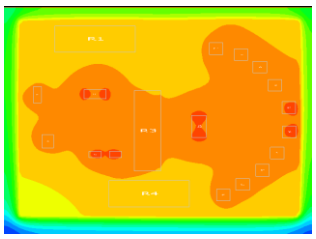

30°C

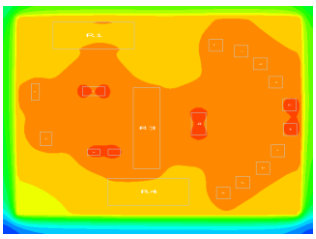

40°C

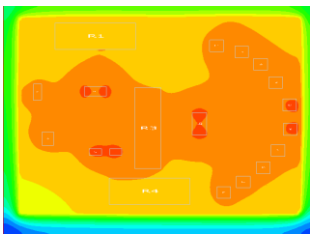

50°C

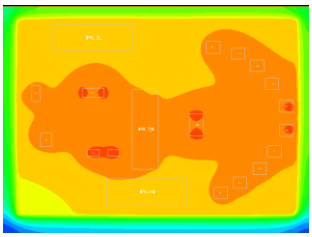

60°C

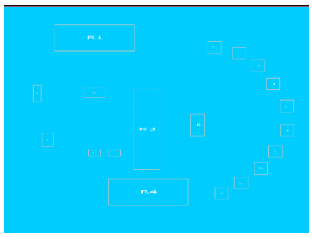

70°C

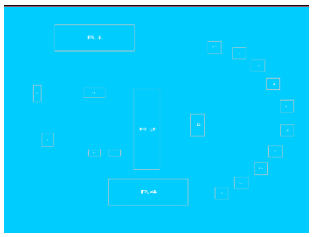

80°C

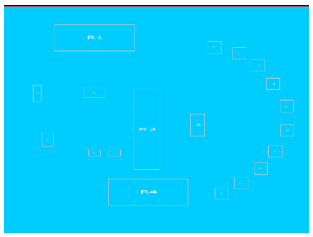

90°C


100°C

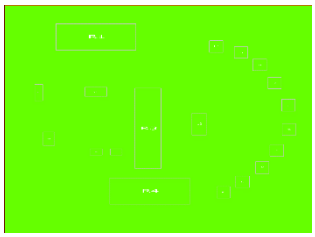

114°C

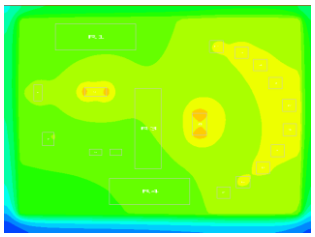

120°C

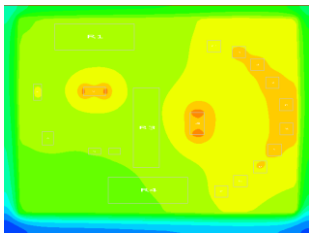

130°C

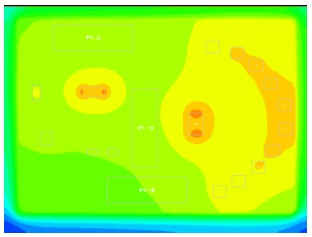

140°C

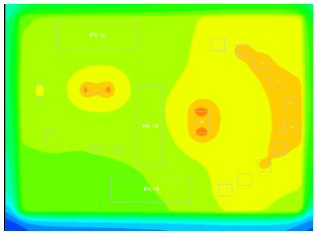
2-2- الخرائط الحرارية للدارة المدروسة عند إجراء المحاكاة مع إضافة طبقة نحاس سماكتها 5%:

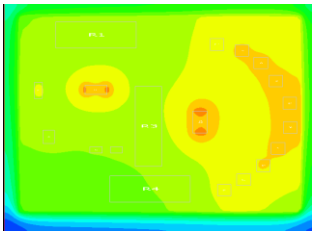

−50°C

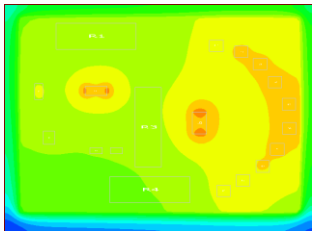

−47°C

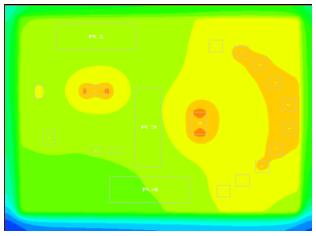

−40°C

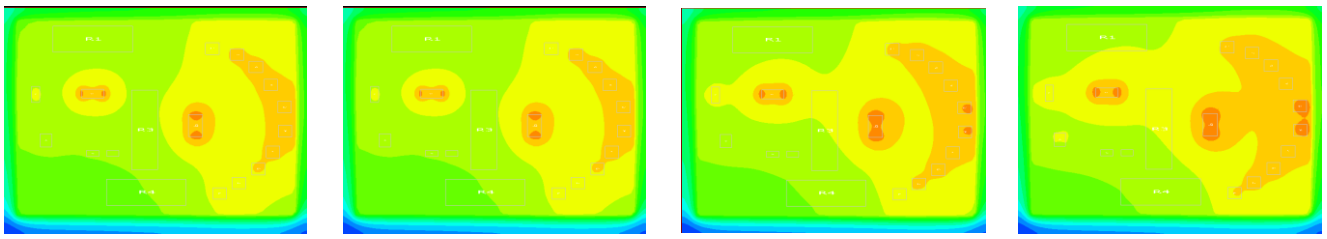

−30°C


−20°C

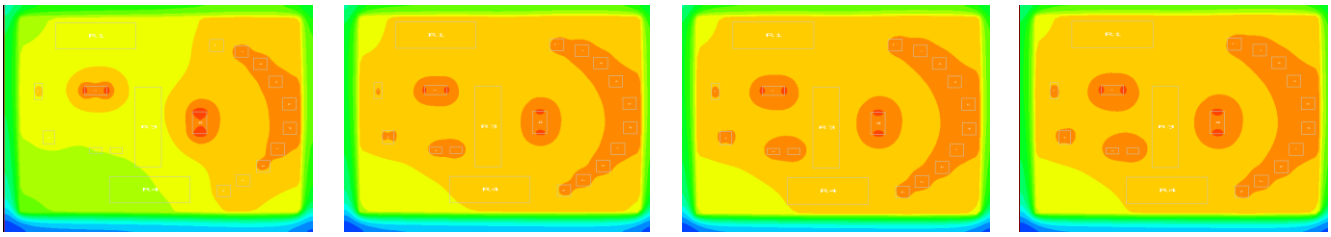

−10°C


0°C

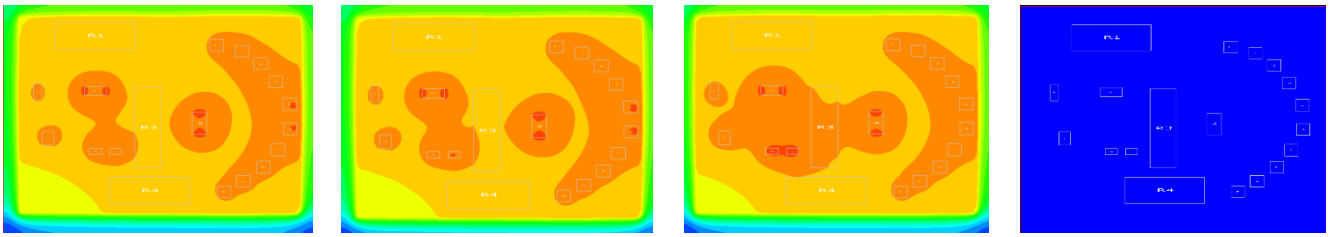

10°C



20°C 30°C 40°C 50°C

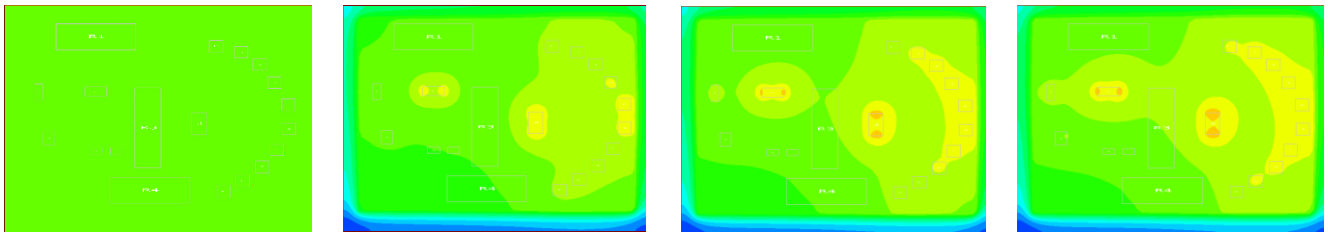


60°C 70°C 80°C 90°C

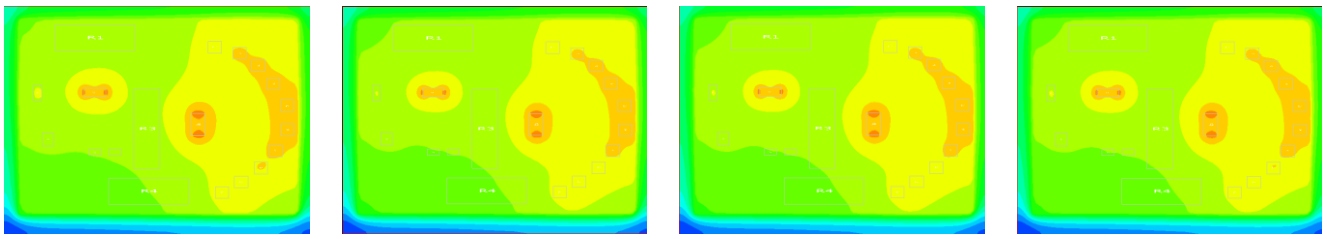


100°C 110°C 115°C 120°C

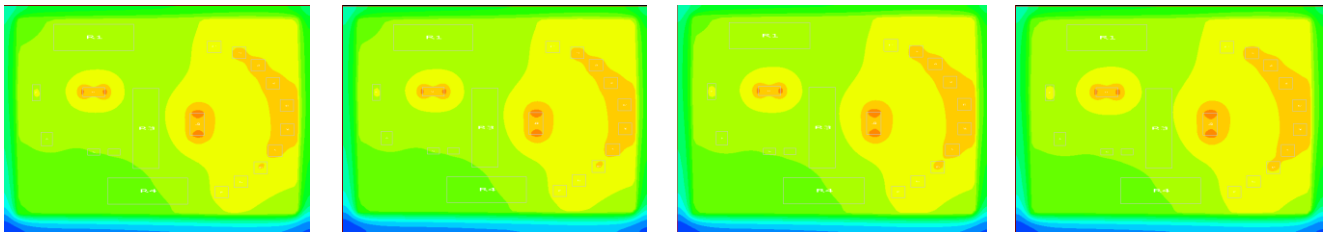
2=3- الخرائط الحرارية للدارة المدروسة عند إجراء المحاكاة مع إضافة طبقة نحاس سماكتها 25%:



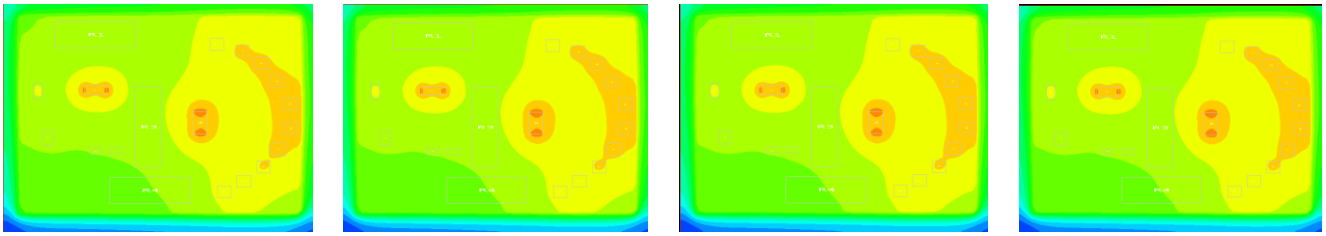
-60°C -50°C -40°C -30°C



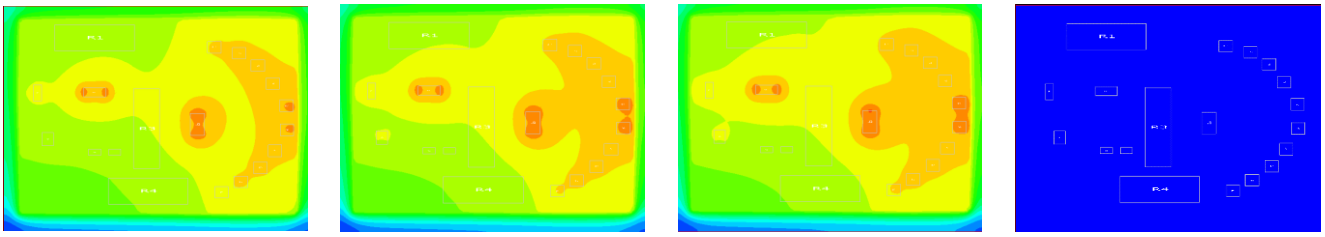
−20°C −10°C 0°C 10°C



20°C 30°C 40°C 50°C

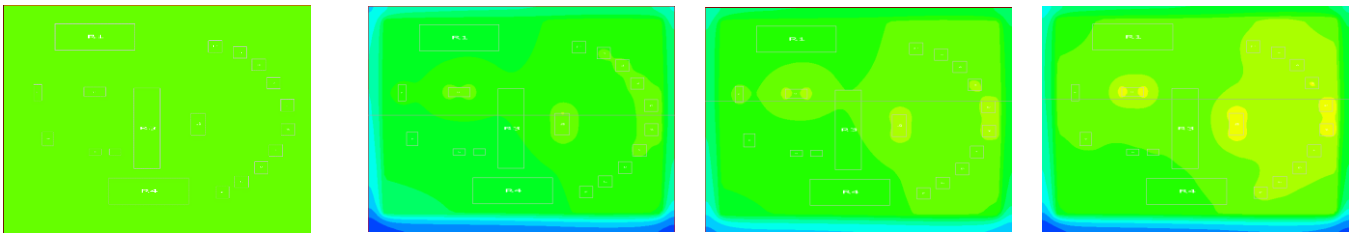


60°C 70°C 80°C 90°C

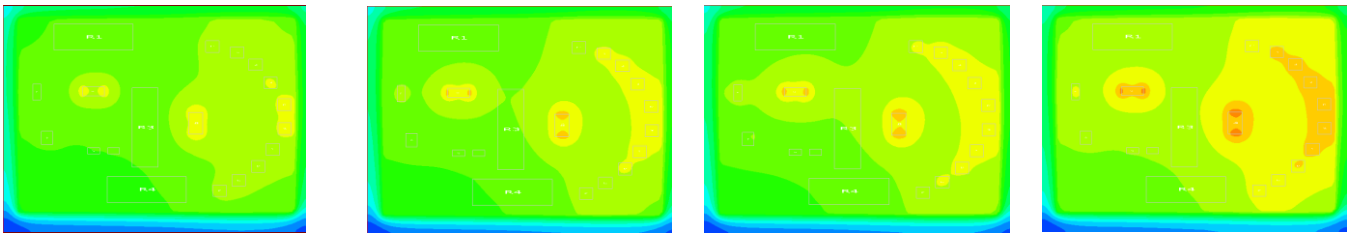


100°C 110°C 118°C 120°C

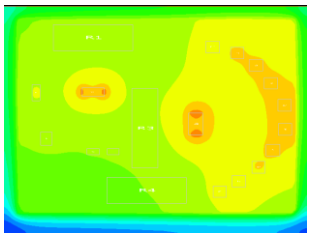
4-2- الخرائط الحرارية للدارة المدروسة عند إجراء المحاكاة مع إضافة طبقة نحاس سماكتها 50%:



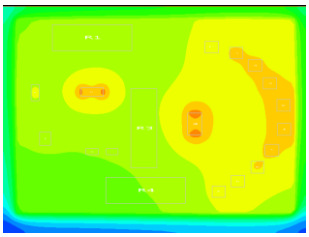
−60°C −52°C −40°C −30°C



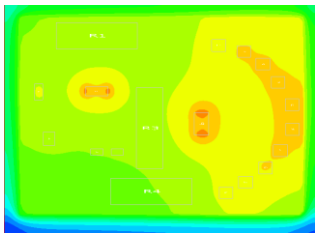
−20°C −10°C 0°C 10°C



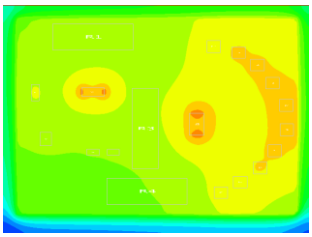
20°C



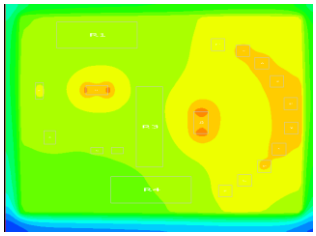
30°C



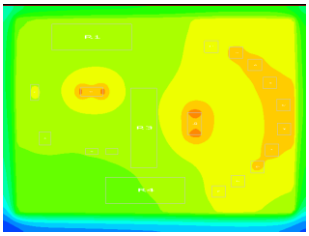
40°C



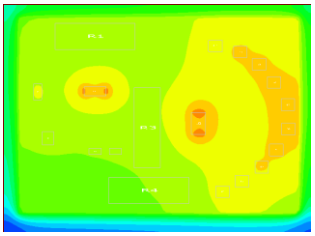
50°C



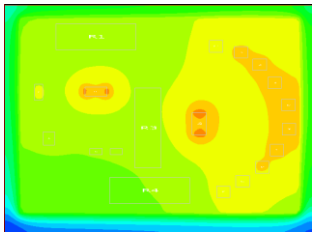
60°C



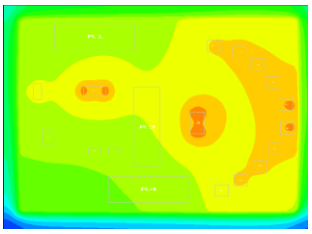
70°C



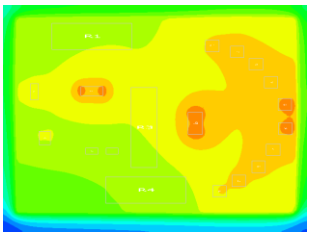
80°C



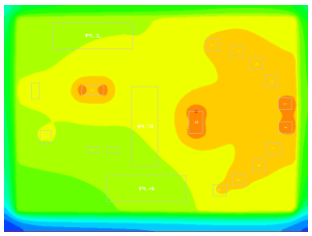
90°C



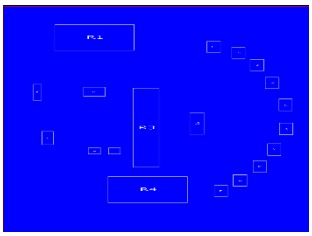
100°C



110°C



120°C



130°C