

التحليل الحراري للمحرك التحريضي ثلاثي الطور

د. عزت حسن*

د. زيد بدر**

همام زيتي***

(تاريخ الإيداع 14 / 1 / 2021. قَبِلَ للنشر في 21 / 2 / 2021)

□ ملخص □

يقدم هذا البحث شرحاً لاثنتين من الطرق التحليلية المستخدمة في التحليل الحراري للمحرك التحريضي. حيث تم إجراء عملية التحليل الحراري على محرك تحريضي ثلاثي الطور مغلق ومزود بمروحة تبريد وفق طريقة البارامترات المجمعّة التي تفترض أن البارامتر أيّاً كان في أي جسم يمكن أن يدرس على نقطة واحدة من هذا الجسم تمثل نقطة البارامتر المتوسطة، حيث تمت نمذجة المعادلات الحرارية للمحرك باستخدام برنامج MATLAB. ومن أجل استخدام برنامج ANSYS الذي يعتمد طريقة العناصر المنتهية في عملية التحليل الحراري تم تصميم المحرك باستخدام برنامج Maxwell حيث تم اجراء حساب تحليلي للمحرك باستخدام حزمة Ansoft RMXprt لمعرفة كفاءته وبارامتراته الأساسية ثم الانتقال إلى الحزمة Maxwell 2D التي تتيح استخدام برنامج ANSYS لاجراء عملية التحليل الحراري للمحرك. وبمقارنة نتائج التحليل الحراري لكلا الطريقتين تبين أن استخدام طريقة العناصر المنتهية (برنامج ANSYS) يعطي نتائج أكثر دقة في التحليل الحراري وذلك بسبب اهمال تدفق الحرارة في الاتجاه المحيطي لصغره عند الدراسة باستخدام النموذج البارامترى المجمع.

الكلمات المفتاحية: محرك تحريضي، تحليل حراري، ANSYS, Maxwell, MATLAB.

* أستاذ- قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

** أستاذ- قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

*** طالب دراسات عليا(دكتوراه)- قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Thermal Analysis Of Three Phase Induction Motor

Dr .Izzat Hasan^{*}
Dr .Zaid Badr^{**}
Homam Zaity^{***}

(Received 14 / 1 / 2021. Accepted 21 / 2 / 2021)

□ ABSTRACT □

This paper provides an explanation of two of the analytical methods used in thermal analysis of the induction motor. The thermodynamic analysis is performed on a three phase Totally Enclosed Fan-Cooled (TEFC) induction motor according to the combined parameter method, which assumes that whatever parameter in any object can be studied on one point of this object that represents to the mean parameter point. The thermal equations are modeled using MATLAB. In order to use the ANSYS program that adopts the finite element method in the thermal analysis process Then the motor is designed using MAXWEL software. An analytical calculation of the motor is performed using Ansoft RMxprt package to find out its efficiency and basic parameters, and moving Maxwell 2D package that allows to use ANSYS software in order to perform thermal analysis of the motor. By comparing the thermal analysis results for both methods, it was found that the finite element method (ANSYS) gives more accurate results in thermal analysis due to the circumferential heat flow is ignored when the combined parameter method is used.

Keywords: Induction Motor, Thermal Analysis, ANSYS, Maxwell, MATLAB

^{*} Professor, Department of Electric Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

^{**} Professor, Department of Electric Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

^{***} Postgraduate Student, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تعدّ الآلات التحريضية التي تستخدم بشكل أساس كمحركات كهربائية وفي بعض الأحيان كمولدات من أكثر أنواع الآلات الكهربائية انتشاراً واستخداماً في أيامنا، ويرجع ذلك إلى بساطة تكوينها ورخص ثمنها وخفة وزنها ووثوقيتها العالية في العمل وسهولة قيادتها والتحكم بأدائها وعدم احتوائها على أجزاء سهلة العطب أو سريعة الإهتراء كالمجمع بالمقارنة مع آلات التيار المستمر والآلات التزامنية.

يرافق عملية تحويل الطاقة في الآلات الكهربائية بشكل عام ضياعات مختلفة ومهدورة (غير قابلة للعكس). هذه الطاقة الضائعة تتحول إلى حرارة بفعل جول، والتي يؤدي انتشارها في الآلة إلى تسخين الأقسام الفعالة والتصميمية لها، وبالتالي ارتفاع درجة حرارتها. تنتشر الحرارة في أقسام الآلة بشكل غير متجانس حيث تكون على الغالب الأقسام الفعالة لها درجة حرارة أعظمية والسطح الخارجي للآلة أقل درجة حرارة. ويؤدي هذا إلى تدفق الحرارة من الأقسام الفعالة إلى الأجزاء أو الأقسام التصميمية للآلة ومنه إلى الوسط الخارجي المحيط بها، وبالتالي تعتبر الآلة الكهربائية ليس فقط نظام كهروميكانيكي بل أيضاً وحدة حرارية [1].

بسبب البنية التصميمية للآلة التحريضية التي يدخل فيها مواد ذات موصلية حرارية مختلفة عن بعضها، فإن الآلة الكهربائية تعتبر كتلة غير متجانسة حرارياً، أي أنه لا يمكن اعتبار جميع أقسام الآلة تملك نفس الفعالية في عملية نقل الحرارة وتبديدها، لذا عند تصميم أي آلة كهربائية يجب أن يؤخذ ذلك بالحسبان، وكلما كان المصمم قادراً على تحسين عملية انتقال الحرارة من منابع الحرارة إلى الوسط الخارجي كلما تحسنت مؤشرات الطاقة للآلة وتحسنت مواصفات عملها وزادت موثوقيتها وزمن استئثارها [3 , 2]، وهو ما نسعى إليه في هذا البحث.

تتعدد طرق التحليل الحراري للآلات الكهربائية، منها ما يعطي نتائج مباشرة ودقيقة للنقاط الأكثر أهمية في الآلة مثل برنامج MOTOR-CAD الذي أطلقته شركة Motor design limited، والذي يؤمن سهولة وسرعة في الحساب، حيث تحدد العقد الحرارية تلقائياً في النقاط الأكثر أهمية من المحرك، ويعتمد على الضياعات بمختلف أنواعها بشكل أساسي في عملية التحليل الحراري، بحيث تشمل النتائج إمكانية مراقبة درجات الحرارة أثناء دورة العمل ومراقبة درجة حرارة وسيط التبريد إن وجد بشكل مستمر. بإضافة السعات الحرارية يمكن إجراء تحليل الحالة العابرة أيضاً. غير أنه يُفصح للمستخدم مجال محدود للعمل بحيث يجب التقيد بالبناء الهندسي للمحرك المدخل مسبقاً للبرنامج. ومنها ما يعطي نتائج مقبولة الدقة ويعطي للمصمم مرونة في تحديد المعطيات الأساسية للبنية التصميمية للمحرك وإدخال التعديلات التي يراها المصمم أو الباحث ضرورية لتحسين أداء المحرك مثل:

❖ طريقة العناصر المنتهية (FEA) Finite Element Analysis.

❖ وطريقة ديناميكا الموائع الحسابية: Computational Fluid Dynamics (CFD).

❖ بالإضافة لطريقة البارامترات المجمعة Lumped-parameter Thermal Model.

وسنجري عملية التحليل الحراري للمحرك التحريضي في هذا البحث باستخدام كل من طريقة البارامترات المجمعة وطريقة العناصر المنتهية [11 , 6].

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في مقارنته بين طريقتين هامتين للتحليل الحراري للمحرك التحريضي، هما طريقة العناصر المنتهية والنموذج البارامتري المجمع، ومعرفة مدى تأثير اهمال تدفق الحرارة في الاتجاه المحيطي عند الدراسة بطريقة البارامترات المجمعّة على النتائج.

طرائق البحث ومواده:

تمّ نمذجة المعادلات الحرارية للمحرك التحريضي باستخدام برنامج (MATLAB) على الحاسب الشخصي، وبعد الحصول على النتائج تم مقارنة درجات الحرارة في النقاط الأساسية مع نتائج طريقة العناصر المنتهية باستخدام الحزم البرمجية: Ansoft RMxprt , Maxwell 2D , ANSYS. **الدراسة المرجعية:**

يربط المرجع [5] الدراسة الحرارية بالدراسة الكهرومغناطيسية، حيث تم تحديد قيمة الضياعات (النحاسية والحديدية) بناء على التحليل الكهرومغناطيسي الذي يتم خلال دورة عمل واحدة، أما التحليل الحراري فيحتاج أكثر من دورة عمل واحدة. وذلك لأن زمن الاستجابة الكهرومغناطيسي أقل من زمن الاستجابة الحراري. واستخدمت قيم الضياعات المحسوبة كمداخلات للتحليل الحراري.

لاحظ الباحث ارتفاع قيمة الضياعات النحاسية بشكل كبير مع ارتفاع درجة الحرارة. وانخفاض قيمة الضياعات الحديدية في الدائر مع ارتفاع درجة الحرارة. كما استنتج انخفاض قيمة عزم الدوران بنسبة 4% عند ارتفاع درجة الحرارة من 20 إلى 172 درجة مئوية.

تم حساب درجات الحرارة في نقاط مختلفة من المحرك باستخدام طريقة العناصر المنتهية **Finite Element Method (FEM)**، وللتحقق قام الباحث بمقارنة نتائج هذه الطريقة في التحليل الحراري مع النتائج التي يعطيها برنامج **MOTOR-CAD**، حيث تبين له أن نتائج الطريقتين متساوية تقريباً، ماعدا درجة حرارة أسنان الثابت، وهذا بسبب مواجهة الأسنان للثغرة الهوائية. ويعود ذلك إلى احتواء **MOTOR-CAD** على معطيات مفصلة تجعل نتائجها أكثر دقة في عملية التحليل الحراري.

يبين المرجع [6] دراسة أجريت بطريقة البارامترات المجمعّة حيث تم تصميم نموذج حراري لمحرك تحريضي مغلق TEFC، وتمت نمذجة المعادلات الحرارية للمحرك عند نقطة العمل الاسمية للحصول على درجات الحرارة في نقاط المحرك، ومن ثم إجراء تحليل الحساسية بتغيير معاملات الحمل الحراري في المحرك بنسبة $\pm 50\%$ وتبين الأثر الكبير لهذا التغيير على درجات الحرارة في المحرك.

حيث انخفضت درجة حرارة العقدة بنسبة 16% عند زيادة معامل الحمل الحراري داخل المحرك بنسبة 50%، وارتفعت درجة حرارة العقدة بنسبة 50% عند تقليل معامل الحمل الحراري داخل المحرك 50%، وشمل تحليل الحساسية تغيير معامل التوصيل الحراري الخاص بعملية انتقال الحرارة من الوجه الداخلي للهيكل إلى الوجه الخارجي وتبين أن زيادة هذا المعامل بنسبة 30% تخفّض درجة الحرارة بمقدار 11% .

تم استخدام برنامج Maxwell لنمذجة ومحاكاة محرك تحريضي ذو دائر مقصور $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{24}{22}$ والحصول على توزيع الفيض وكثافة الفيض في الحزمة 3D , 2D من البرنامج بالإضافة إلى بعض المميزات التشغيلية في المحرك [7].

كما تم استخدام برنامج Maxwell لدراسة ومحاكاة المحرك التحريضي المستخدم في السيارات الكهربائية حيث تم إجراء التصميم الكهرومغناطيسي للمحرك وفقاً لمعايير التصميم المحددة. ثم تم التحقق من التصميم التحليلي باستخدام طريقة العناصر المنتهية. اعتماداً على النتائج التي تم الحصول عليها في التحليلات الكهرومغناطيسية. عدل التصميم السابق للمحرك التحريضي بما يلائم شروط استخدامه في السيارات الكهربائية ثم تم إجراء التحليل الكهرومغناطيسي والحراري للمحرك المصمم باستخدام برنامجي Maxwell® و ANSYS على التوالي. حيث تم اختبار المحرك المصمم عند أقصى درجة حرارة مسموح بها وفقاً لنوع مادة العزل المستخدمة. وأظهرت نتائج التحليلات أن المحرك المصمم يفي بمعايير التصميم [8].

تمت محاكاة عمل نظام متكامل يحتوي على محرك تحريضي ودارة قيادة ومخطط تحكم في بيئات نمذجة مختلفة لكل جزء من النظام، حيث تم تصميم المحرك باستخدام Ansys-Maxwell وتم تصميم دارة القيادة باستخدام Ansys-Simplorer بينما تم إنجاز مخطط التحكم في بيئة MATLAB-Simulink، تمت دراسة النظام في حالتين هما حالة وجود عطل في دارة القيادة وكانت الحالة الثانية هي حالة وجود قصر بين طورين من أطوار الثابت، أبدى النموذج مرونة لجهة إمكانية اكتشاف العطل وذلك من خلال مراقبة كل من التيار والعزم الكهربي [9].

أما في المرجع [3] فقد تم فيه وضع مخطط حراري مكافئ للمحرك التحريضي ثلاثي الطور عند درجات حماية ميكانيكية وأنظمة تبريد مختلفة ووضعت المعادلات الجبرية الخاصة لهذا المخطط. أظهر النموذج كفاءة في إمكانية معرفة درجات الحرارة في أي جزء من أجزاء المحرك، وبناء على ذلك تم تحسين أداء المحرك عن طريق تحسين عمليات التبادل الحراري (عن طريق التغيير في قيمة الناقلية الحرارية λ).

يلاحظ من الدراسات السابقة جميعها أن بعض عمليات البحث تركز على دراسة أثر ارتفاع درجة الحرارة على أداء المحرك، وإمكانية تحسين عمليات التبادل الحراري عن طريق تحسين معاملات الموصلية الحرارية، فيما يدرس بعضها الآخر تأثير وجود التوافقيات العليا، وزيادة درجة الحرارة المرافق لتواجد هذه التوافقيات واقتراح تحسين التهوية للمحركات التي تعمل في هذه الظروف.

نقدم في هذا البحث مقارنة بين طريقتين لتبيان جودة ومرونة كل طريقة في عملية التحليل الحراري حيث تمت الدراسة على محرك تحريضي ثلاثي الطور مغلق ومزود بمروحة تبريد TEFC.

1. الضياعات في المحرك التحريضي:

إن دراسة الضياعات بمختلف أشكالها أمر بالغ الأهمية قبل البدء بالدراسة الحرارية، لكونها المنابع الحرارية التي تشكل المدخل للمعادلات الحرارية في المحرك. لذلك يجب معرفة توزع الضياعات في جميع أجزاء المحرك. تقسم الضياعات في المحرك التحريضي إلى ضياعات أساسية وإضافية، وتتكون الضياعات الأساسية من الضياع الكهربائي الناتج عن مرور التيار في الملفات وتسمى ضياعات نحاسية، ومن الضياعات الحديدية في الدارة المغناطيسية للمحرك نتيجة تيارات فوكو الإحصارية والتعويق المغناطيسي. أما الضياعات الإضافية فتشمل الضياعات السطحية والترددية (النبضية) والضياعات في كل من الملفات والدارة المغناطيسية الناتجة عن الفيض المتسرب وتشوه الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية عند الحموله، على شكل نسبة: 30% من الضياعات الإضافية تحدث في أسنان الثابت و 40% منها يحدث في الملفات في المجاري و 30% منها يحدث في حديد الدائر. يتم تجاهل الضياعات في الرولمانات ويمكن تضمينها كمنبع حراري في المحور. وبسبب التناظر يتم دراسة نصف المحرك فقط وبالتالي يتم أخذ نصف الضياعات في النموذج الحراري [12 , 6].

2. دراسة المحرك باستخدام Maxwell:

قبل البدء في تصميم المحرك، يتم تحديد بارامترات التصميم مثل الاستطاعة، عدد الأطوار، التردد، جهد التغذية، المردود المتوقع، عامل الاستطاعة، كثافة التيار في الناقل وكثافة التدفق في الثغرة الهوائية. بعد ذلك تبدأ عملية التصميم، ويتم إجراء المراجعات المنهجية عن طريق تعديل بارامترات التصميم على نموذج المحرك حتى يتم استيفاء معايير التصميم الأخرى كالتصميم الحراري و الميكانيكي واختبار العزل [12 ، 2].

1-2 مواصفات المحرك:

تم حساب الأبعاد والضيعات الكهرومغناطيسية للآلة أثناء عملية التصميم الكهرومغناطيسي، واستخدمت خواص المواد الداخلة في التصميم وموصلياتها الحرارية وطريقة التبريد كقيم مدخلة، وتم تحديد معاملات الحمل الحراري داخل المحرك تبعاً لشروط الجريان والحركة الدورانية العشوائية للهواء الداخلي أثناء عمل المحرك مع الأخذ بالاعتبار أن مراوح التبريد تعمل، حيث تم إجراء التحليل الحراري على محرك تحريضي ثلاثي الطور ثنائي الطبقة ذو قفص سنجابي مغلق مزود بمروحة تبريد TEFC استطاعته 30 KW مواصفاته وأبعاده مبينة بالجدول بالجدولين (1 ، 2) [2].

الجدول (1) مواصفات المحرك التحريضي الذي أجريت عليه عملية النمذجة

$P=30.10^3$	الاستطاعة الاسمية - W
$n_{syn}=1500$	سرعة الدوران - r.p.m
U=690	جهد الخط - V
$U_{sph} = \frac{U}{\sqrt{3}} = 398.3717$	جهد الطور - V
m=3	عدد الأطوار
P=2	عدد الأقطاب
$f = \frac{n_{syn}}{60} P \quad f = 50$	التردد
$\omega = 2 \pi f \quad \omega = 314.1593$	السرعة الزاوية
$\cos \varphi_n = 0.84$	عامل الاستطاعة
$\eta=0.927$	المردود
$\sigma_{Cu20^\circ C} = 57 \cdot 10^6$	الموصلية الكهربائية للنحاس عند الدرجة 20°C
$\sigma_{Al20^\circ C} = 37 \cdot 10^6$	الموصلية الكهربائية للألمنيوم عند الدرجة 20°C
$P_{1.5}=6.6$	الضيعات الحديدية في واحدة الكتلة من المادة المصقحة (الضياع النوعي): W/kg, 1.5T, 50 Hz

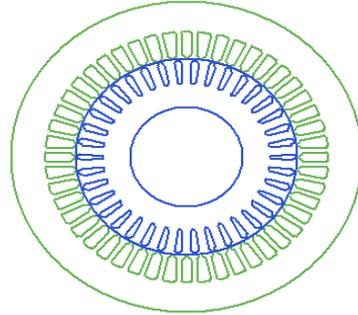
الجدول (2) أبعاد المحرك - m:

الجزء	الرمز	القيمة ب m
طول الثابت	l	0.2066
نصف القطر الخارجي للثابت	r_1	0.169

0.1351	r_2	نصف القطر الخارجي للسفن
0.0106	τ_u	الخطوة السنية
48	n	عدد المجاري
0.1075	r_3	نصف القطر الداخلي للسفن
0.006812	b_{ds}	عرض سن الثابت
$8.5718 \cdot 10^{-3}$	r_4	نصف قطر اللفة
0.0005	d_i	سماكة العازلية
$1.9066 \cdot 10^{-4}$	S_c	مساحة المقطع المكافئ للنحاس في المجرى
0.2134	r_5	نصف القطر الخارجي للدوائر
0.1213	r_t	نصف قطر حلقة القسم الجبهوي

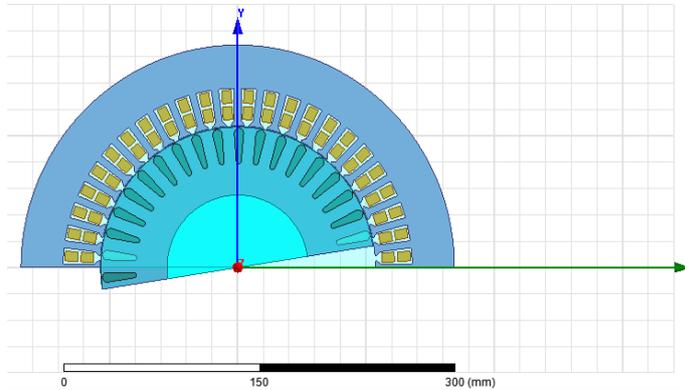
2-2 تصميم المحرك باستخدام حزمة Maxwell 2D و Ansoft RMxpert

بعد معرفة جميع بارامترات وأبعاد المحرك كما هو وارد في الجدول (2) و الجدول (3) نبدأ بتصميم المحرك باستخدام برنامج Maxwell حيث تستخدم القيم السابقة كمدخلات للبرنامج فنحصل على الشكل التالي:



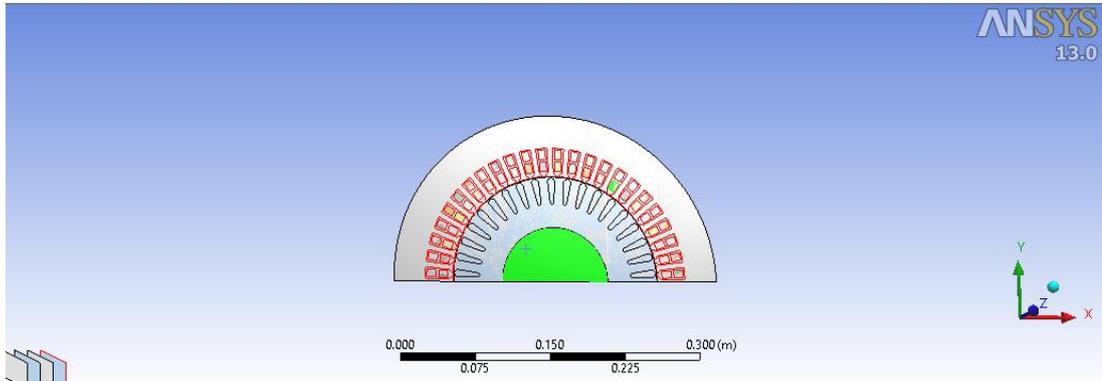
الشكل (1) الصيغة المبدئية للمحرك المدروس باستخدام حزمة Ansoft RMxpert

يمثل الشكل (1) الصيغة المبدئية للمحرك المدروس باستخدام حزمة Ansoft RMxpert ، حيث يمكننا إجراء حساب تحليلي للمحرك لمعرفة كفاءة المحرك وبارامتراته الأساسية. بعد ذلك ننتقل إلى الحزمة Maxwell 2D لإجراء الاختبارات المغناطيسية كما هو مبين في الشكل (2) :



الشكل (2) الصيغة المبدئية للمحرك المدروس باستخدام حزمة Maxwell 2D

بعد التأكد من سلامة النموذج المصمم وجاهزيته للعمل يتم الانتقال إلى برنامج ANSYS 13 و إجراء التحليل الحراري كما يوضح الشكل (3):

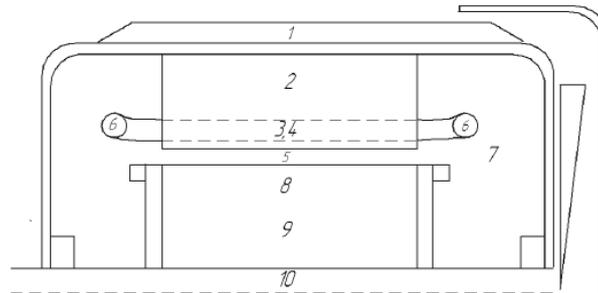


الشكل (3) المحرك التحريضي في ANSYS 13

3 . النموذج الحراري البارامتري المجمع LPTM :

يعتبر النموذج الحراري البارامتري المجمع واحداً من النماذج التي تدرس العمليات الحرارية في المحرك التحريضي مثل الحساب التحليلي الدقيق (نموذج الضياع الموزع) والتحليل العددي أو الطريقة العقدية (نموذج الضياع المركز) ويعتبر هذا النموذج بسيطاً إلى حد ما، ومعقداً إذا أردنا تحديد درجات الحرارة في معظم عناصر الآلة. بشكل عام، النموذج البارامتري المجمع هو طريقة لتبسيط عمل الأنظمة الموزعة مكانياً في حيز يتألف من عناصر متلاصقة تقرّبنا من فهم سلوك أو عمل النظام الموزع تحت افتراضات معينة. تعتمد هذه الطريقة في حل المشاكل الحرارية على وضع دارات حرارية بالتناظر مع الدارات الكهربائية، التي يكون فيها التحليل الرياضي أبسط بكثير من حل معادلات ماكسويل من أجل النظام الفيزيائي الحقيقي.

تقسم الآلة الكهربائية هندسياً إلى عدد من الأجزاء (العناصر) المجموعة شكل (4)، وكل جزء يعتبر منبع حراري ويرتبط مع الأجزاء المجاورة بمقاومة حرارية، حيث تم تمثيل مصادر الضياعات النحاسية والحديدية والإضافية كمنابع حرارية. مع الأخذ بالاعتبار أن التوليد الحراري يتركز في نقطة واحدة منه تمثل متوسط درجة الحرارة للجزء، وتتصل الأجزاء المتجاورة مع بعضها البعض من خلال مقاومات حرارية.



الشكل (4) الأجزاء الرئيسية للمحرك التحريضي

10 المحور	7 الهواء الداخلي	4 ملفات الثابت	1 الهيكل
8 ملفات الدائر	5 الشفرة الهوائية	2 قلب الثابت	
9 قلب الدائر	6 القسم الجبهوي	3 أسنان الثابت	

تأخذ المكونات الصلبة لكل من الهيكل (1)، والثابت (2،3)، والملفات (4،6) والدائر (8،9) والمحور (10) شكلاً اسطوانياً، واستناداً لشكلها الاسطواني صممت شبكة المقاومات الحرارية الخاصة بها. يوجد مكونان آخرين يمثلان الثغرة الهوائية (5) والهواء الداخلي (7). وتتصل الأجزاء العشر مع بعضها مباشرة، أو عبر مقاومات حرارية إضافية [10].

4. الدراسة الحرارية باستخدام LPTM:

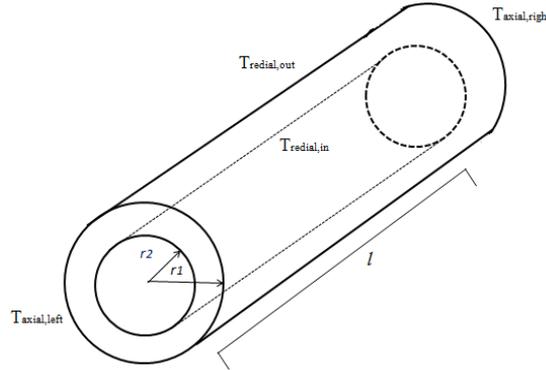
يعطي توزيع درجة الحرارة في المحرك معلومات قيمة للمصمم حيث أن درجة الحرارة المرتفعة تتبّه المصمم إلى ضرورة تقليل الضياعات، وزيادة الزعانف على الهيكل الخارجي واقتراح نوع تبريد جديد أو تحسين المحرك. تطرح الحرارة المكتسبة في التجهيزات الكهربائية والنتيجة عن الضياعات المختلفة فيها في الحالة المستقرة، أي عند الوصول إلى درجة الحرارة النهائية، إلى الوسط الخارجي عبر انتقال الحرارة بأشكال مختلفة: توصيل، حمل وإشعاع [4، 10].

1.4 انتقال الحرارة بالتوصيل:

تنتقل الحرارة بين أجزاء المحرك المتلاصقة بالتوصيل، وتعطى المقاومة الحرارية التي تصف انتقال الحرارة بالتوصيل بالعلاقة (1) [10]:

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot S} \quad (1)$$

حيث أن: l - طول الجسم ويقاس بـ m ، λ - معامل التوصيل الحراري وتقاس بـ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ، S - مساحة المقطع وتقاس بـ m^2 . من المعروف أن الأجزاء الرئيسية للآلة مصممة بحيث تأخذ شكلاً اسطوانياً كما هو مبين في الشكل (5)



الشكل (5) الشكل العام للجسم الاسطواني ببديه الشعاعي والمحوري ودرجات الحرارة المرتبطة بكل منهما

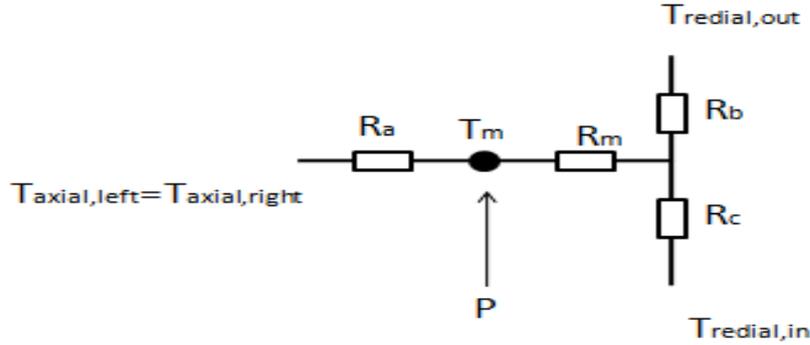
r_1 نصف قطر الأسطوانة الخارجية	r_2 نصف قطر الأسطوانة الداخلية
$T_{axial,right}$ انتقال الحرارة محورياً إلى يمين الأسطوانة	$T_{axial,left}$ انتقال الحرارة محورياً إلى يسار الأسطوانة
$T_{radial,out}$ انتقال الحرارة شعاعياً إلى خارج للأسطوانة	$T_{radial,in}$ انتقال الحرارة شعاعياً إلى داخل الأسطوانة

لشرح انتقال الحرارة في جسم أسطواني نفترض مايلي:

- تتدفق الحرارة في الاتجاهين المحوري والشعاعي بشكل مستقل.
- عقدة الحرارة الوسطية هي التي تحدد التدفق الحراري في كلا الاتجاهين الشعاعي والمحوري.
- تتوزع الحرارة المتولدة بشكل منتظم.

بالإضافة إلى الافتراضات السابقة، فإن تأثير التدفق الحراري بالاتجاه المحيبي قليل في معظم نقاط الآلة ولذلك لن يعتمد الانتقال بالاتجاه المحيبي بشكل رئيسي كما الشعاعي والمحوري، إنما سيحسب فقط في النقاط التي يكون فيه ذو أهمية أثناء عملية التحليل الحراري.

عند أخذ الافتراضات السابقة بعين الاعتبار، نحصل على شبكتين منفصلتين ثلاثيتي الأطراف. تمثل إحداها انتقال الحرارة في الاتجاه المحوري والأخرى بالاتجاه الشعاعي. وبما أن المحرك متناظر بالنسبة لمحوره الشاقولي، تختصر الشبكة الحرارية الخاصة بانتقال الحرارة بالاتجاه المحوري إلى مقاومة حرارية مضاعفة تمثل الانتقال الحراري في هذا الاتجاه، كما هو مبين بالشكل (6).



الشكل (6) الشبكة الحرارية للجسم الاسطواني بالاتجاهين الشعاعي والمحوري

$T_{axial, right}$ انتقال الحرارة محورياً إلى يمين الأسطوانة $T_{axial, left}$ انتقال الحرارة محورياً إلى يسار الأسطوانة
 $T_{radial, out}$ انتقال الحرارة شعاعياً إلى خارج للأسطوانة $T_{radial, in}$ انتقال الحرارة شعاعياً إلى داخل الأسطوانة

تتكون هذه الشبكة من عقدتين داخليتين وأربع مقاومات حرارية R_a, R_m, R_b, R_c ، تعطى على الترتيب بالعلاقات [10]:

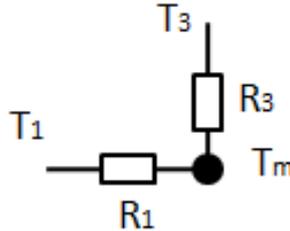
$$R_a = \frac{l}{6\pi\lambda_a(r_1^2 - r_2^2)} \quad (2)$$

$$R_b = 2R_{1r} = \frac{1}{2\pi\lambda_r l} \cdot \left[1 - \frac{2r_2^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)} \right] \quad (3)$$

$$R_c = \frac{1}{2\pi\lambda_r l} \cdot \left[\frac{2r_1^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)} - 1 \right] \quad (4)$$

$$R_m = \frac{-1}{4\pi(r_1^2 - r_2^2)\lambda_r l} \cdot \left[r_1^2 + r_2^2 - \frac{4r_1^2 r_2^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)} \right] \quad (5)$$

تطبق العلاقات السابقة على الأجزاء الاسطوانية في المحرك، وبالنسبة لكل من ملفات الثابت والقسم الجبهوي والمحور تمثل وفق الحالة الخاصة حيث $r_2=0$ ، حيث تأخذ شكل قضبان اسطوانية توضح دارتها في الشكل (7).



الشكل (7) الشبكة الحرارية بالاتجاهين الشعاعي والمحوري عندما $r_2=0$

وعندها تحسب المقاومتين R_3 و R_1 بالمعادلتين [10]:

$$R_1 = \frac{l}{6\pi\lambda_a r_1^2} \quad (6)$$

$$R_3 = \frac{1}{4\pi\lambda_r l} \quad (7)$$

2.4 انتقال الحرارة بالحمل:

يحدث الحمل الحراري عندما تنتقل الحرارة بين جسم صلب ومائع متحرك (غاز أو سائل)، وبالعكس على الحد الفاصل بين المادتين. وحسب نوع القوة المسببة لجريان أو حركة المائع على سطح الجسم الصلب يمكن أن نميز نوعين من الحمل الحراري هما الحمل الحراري الحر أو الطبيعي والحمل القسري (عند وجود مروحة تبريد مثلاً). وسواء كانت حركة المائع طبيعية أم قسرية فإننا سنميز نوعين من الجريان ولكل منهما قوانينه الخاصة، فإذا تحركت جزيئات المائع بشكل منتظم يكون الجريان صفحي، أما إذا تحركت جزيئات المائع بشكل عشوائي يكون الجريان مضطرب حيث كل جزيئة تمتاز بسرعة مختلفة بالقيمة والاتجاه. وتعطى المقاومة الحرارية R_{th} التي تصف انتقال الحرارة بالحمل بالعلاقة (8) [10]:

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda_c S} \quad (8)$$

حيث أن: S - مساحة سطح التبادل الحراري بـ m^2 ، λ_c - هي معامل الحمل الحراري $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$. ونظراً لاختلاف نوع الجريان في الآلات الكهربائية في الحالة الساكنة عنه في الحالة الدورانية فإن معامل الحمل الحراري λ_c يأخذ قيم مختلفة تبعاً للنقطة التي يتم فيها الحمل الحراري وتبعاً لوجود نظام تهوية أو عدم وجوده (مروحة). وبالتالي يشار لمعامل الحمل الحراري λ_c برمز λ_r في الحالة الدورانية ورمز λ_s للحالة الساكنة (المراوح غير فعالة)، وتبعاً لمكان الحمل الحراري نميز ثلاث قيم لهذا المعامل في كل حالة:

- $\lambda_{1r}, \lambda_{1s}$ - انتقال الحرارة بين الهيكل والهواء الخارجي
- $\lambda_{2r}, \lambda_{2s}$ - انتقال الحرارة بين الثابت والدائر عن طريق الثغرة الهوائية
- $\lambda_{3r}, \lambda_{3s}$ - انتقال الحرارة بين حديد الثابت والدائر والملفات الطرفية أو الأغشية الخارجية وهواء الأغشية الخارجية .

3.4 تحليل النموذج الحراري للمحرك التحريضي باستخدام LPTM:

الهدف من هذا البحث هو إيجاد متوسط درجات الحرارة لعناصر النموذج الحراري، يتألف النموذج الحراري للمحرك التحريضي ذو التصميم المغلق TEFC من 10 عقد (نقاط) حرارية كما في الشكل (8)، لكل عقدة منها شبكتها الحرارية الخاصة، ويجمع هذه الشبكات الحرارية مع بعضها ينتج المخطط الحراري الكلي للمحرك التحريضي الموضح بالشكل (8).

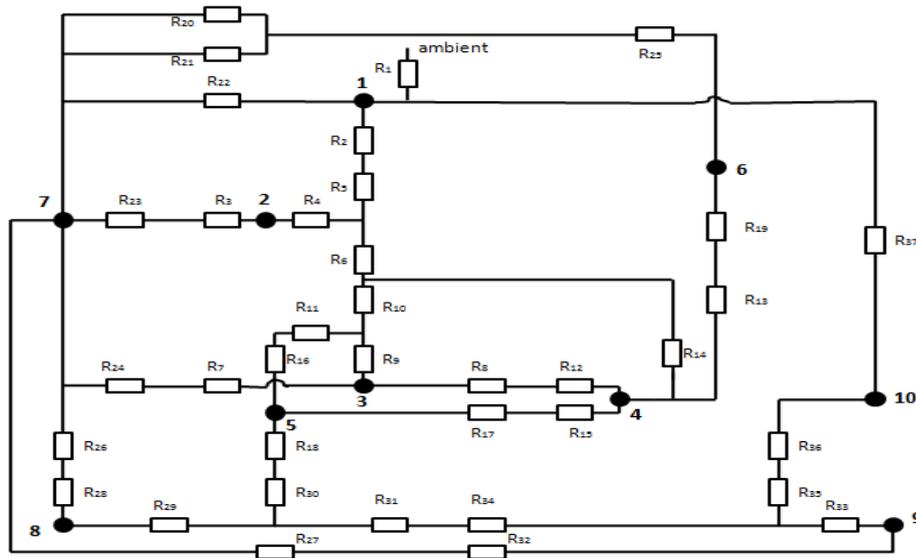
من أجل تحليل الحالة المستقرة نحسب ارتفاع درجة حرارة العقد من المعادلة المصفوفية:

$$\Delta T = G^{-1}P \quad (9)$$

حيث أن: P - مجموع الضياعات في كل عقدة، ΔT - ارتفاع درجة الحرارة. تستخدم مقاومات عناصر الشبكة الحرارية للحصول على مصفوفة ناقلية حرارية أبعادها $n * n$ ، حيث n عدد العقد في النموذج. ويتم تعريف مصفوفة الناقلية الحرارية بالشكل:

$$G = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{1,i}} & -\frac{1}{R_{1,2}} \dots & -\frac{1}{R_{1,n}} \\ -\frac{1}{R_{2,1}} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{2,i}} \dots & -\frac{1}{R_{2,n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{R_{n,1}} & -\frac{1}{R_{n,2}} \dots & \dots & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{n,i}} \end{bmatrix}$$

حيث العنصر القطري هو مجموع ناقلية الشبكة المتصلة بالعقدة n ، $G(i,j)$ الناقلية الحرارية الموصولة مع العقد i,j بإشارة سالبة. وبحل المعادلة (9) نحصل على حل الحالة المستقرة.



الشكل (8) المخطط الحراري الكلي للمحرك التبريضي

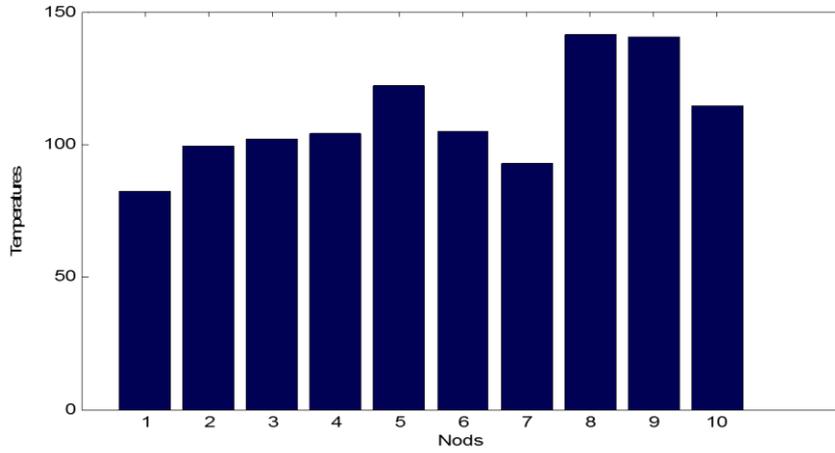
- | | | | |
|----------------|-------------------|------------------|-----------|
| 1 الهيكل | 4 ملفات الثابت | 7 الهواء الداخلي | 10 المحور |
| 2 قلب الثابت | 5 الثغرة الهوائية | 8 ملفات الدائر | |
| 3 أسنان الثابت | 6 القسم الجبهوي | 9 قلب الدائر | |

النتائج والمناقشة:

نتائج نمذجة المعادلات الحرارية للمحرك التبريضي باستخدام LPTM:

بعد وضع المخطط الحراري للمحرك كما في الشكل (8) يتم صياغة المعادلات التي تحسب قيم المقاومات الحرارية واعتماداً على قيم هذه المقاومات يتم حساب الناقلات الحرارية الذاتية والتبادلية، ويضرب مقلوب مصفوفة الناقلات الحرارية بمصفوفة الضياعات نحصل على تغيير درجة الحرارة ΔT في نقاط المحرك المدروسة عند نقطة التشغيل الاسمية، حيث تتألف مصفوفة الضياعات من عمود واحد ومن عدد أسطر يساوي عدد أعمدة مصفوفة الناقلات، وتعتبر أسطر مصفوفة الضياعات عن أجزاء المحرك بالترتيب المدروس سابقاً آخذين بالاعتبار الضياع الذي يحدث في هذا الجزء، وقد تم حساب درجة حرارة العقد عند نظام العمل الاسمي للآلة مع الاعتراف أن معدل درجة حرارة الوسط المحيط يساوي 25 درجة.

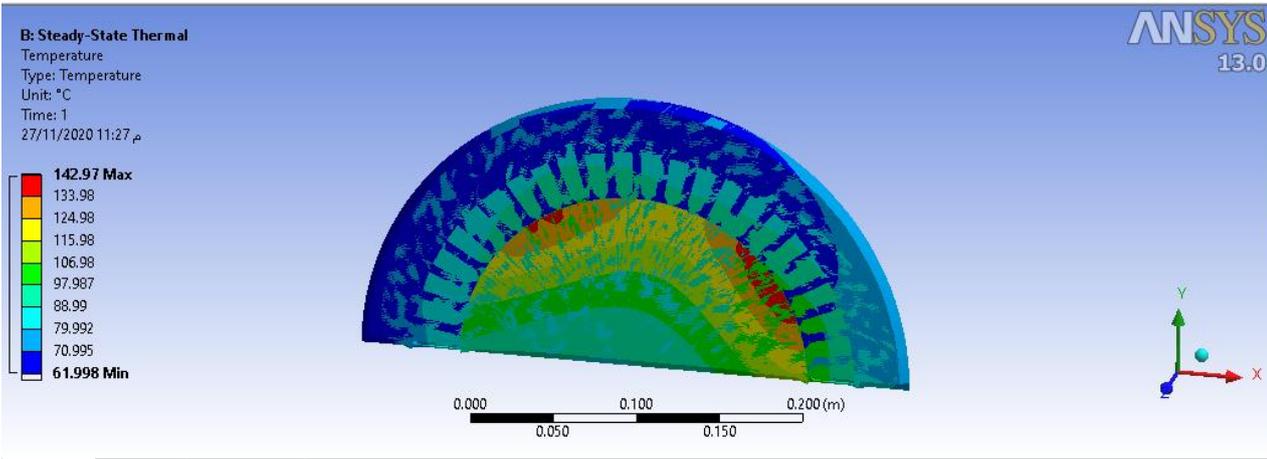
يظهر الشكل (9) درجات الحرارة في النقاط المدروسة من المحرك باستخدام LPTM. من الشكل نلاحظ أن أعلى درجة حرارة تساوي 140.75 درجة وهي في النقطة 9 من المحرك أي في قلب الدائر.



الشكل (9) درجات الحرارة في النقاط المدروسة من المحرك باستخدام LPTM

نتائج الدراسة الحرارية باستخدام ANSYS :

تم إجراء التحليل الحراري في الحالة المستقرة بما يحاكي عمل المحرك لفترة معينة من الوقت ريثما يحدث تغيير في درجة الحرارة. تم الحصول على الضياعات في الآلة من نتائج التحليل الكهرومغناطيسي في Maxwell 2D. حيث يتم استخدام هذه النتائج كمدخلات لبرنامج التحليل الحراري ANSYS. يبين الشكل (10) نتائج عملية التحليل الحراري للمحرك التحريضي ذو المواصفات المذكورة في الجدول (2) حيث يتبين من الشكل أن أكبر قيمة لدرجة الحرارة تساوي 142.97 درجة في الجزء الدائر وهي قيمة مقبولة تبعاً لكون العازل المستخدم في المحرك من النوع H.



الشكل (10) نتائج عملية التحليل الحراري للمحرك التحريضي باستخدام ANSYS

مناقشة النتائج:

تم فيما سبق إجراء التحليل الحراري للمحرك التحريضي باستخدام برنامجي ANSYS و MATLAB . حيث تم تصميم المحرك باستخدام برنامج Maxwell 2D ثم محاكاته حرارياً باستخدام ANSYS . ولأجل التحليل باستخدام MATLAB تمت نمذجة للمعادلات الخاصة بالمحرك بالاعتماد على النموذج البارامتري المجمع الذي يمكننا من معرفة درجات الحرارة في جميع النقاط الهامة من المحرك. أبدى النموذجين فعالية في تحديد درجات الحرارة في المحرك، ويمكن تلخيص النتائج بمايلي:

1- إن الدراسة باستخدام ANSYS و Maxwell 2D تعطينا درجة الحرارة في جميع نقاط المحرك، كما أن استخدام برنامج Maxwell 2D في عملية التصميم يتيح للمصمم اجراء دراسة كهترطيسية شاملة والحصول على جميع مميزات التشغيل للمحرك.

2- إن الدراسة باستخدام النموذج البارامتري المجمع وبرمجة معادلاته في MATLAB تقتصر على اجراء تحليل حراري لمعرفة درجة الحرارة في النقاط المدروسة ولانتيج دراسة الخواص الكهترطيسية ومميزات التشغيل للمحرك.

3- بمقارنة نتائج التحليل الحراري للنموذجين نجد أنها جاءت متقاربة، ويمكن ارجاع الفارق بينهما لجهة اهمال تدفق الحرارة في الاتجاه المحيطي أثناء الدراسة باستخدام النموذج البارامتري المجمع وذلك لصغره، وبالتالي فإن استخدام طريقة العناصر المنتهية و برنامج ANSYS يعطي نتائج أكثر دقة في التحليل الحراري.

4- إن بارامترات التصميم اقتضت استخدام عازل من النوع H ، وبمقارنة درجة الانهيار الحراري للعازل من النوع H مع أعلى درجة حرارة حصلنا عليها في النموذجين وهي 142.97 درجة مئوية، نجد أن هذه النتائج مقبولة ويمكن للمحرك أن يعمل بأمان.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

تم في هذا البحث استخدام طريقتين لدراسة وتحليل العمليات الحرارية في المحرك التحريضي الثلاثي الطور هما: طريقة النموذج الحراري البارامتري المجمع وطريقة العناصر المنتهية. إن طريقة العناصر المنتهية (برنامج ANSYS) أكثر سهولة في اجراء عملية التحليل الحراري، كما أنها تعطي نتائج أكثر دقة مقارنة بالنموذج البارامتري المجمع، كما أن استخدام الحزمة Maxwell 2D في عملية التصميم أثناء التحليل الحراري بطريقة العناصر المنتهية يتيح إمكانية محاكاة المحرك وبالتالي التأكد من صحة بارامترات التصميم قبل البدء بعملية التحليل الحراري ناهيك عن التعقيد الذي يصادفه الباحث أثناء صياغة وبرمجة المعادلات الحرارية عند استخدام النموذج البارامتري المجمع.

التوصيات:

إن أحد الأعمال المستقبلية كتنمة لهذا البحث يمكن أن يكون:

- اجراء التحليل الحراري للمحرك باستخدام حزمة MOTOR-CAD ومقارنة النتائج مع كل من نتائج LPTM وطريقة العناصر المنتهية .
- اجراء تجربة لمحرك بنفس المواصفات وقياس درجات الحرارة ومقارنتها مع نتائج البرمجة.

References:

- [1] Hassan, I, N " *Induction Machines*". Tishreen University, 2003, pp 600.
- [2] Hassan, I, N " *Design of Electrical Machines*". Tishreen University, 1995, pp 494.
- [3] Hasan. I, N., Sheikhouk, H and Suleiman, N. " *Thermal Calculation for Three-Phase Induction Motors, Using the Thermal Equivalent Modeling*" Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol. (27) No (1) 2005.
- [4] Housam Al-din, A, A and Zhirh, M. " *High Current Technical in power Supply Electrical Network*" , Lattakia, Syria, pp 342.
- [5] LOMBARD, J and MARION, F. " *Using analytical approach with finite element analysis for coupling magnetic and thermal analysis for motors*" Cedrat SA., chemin de Malacher-Inovallée, MEYLAN Cedex 2007, PP 38-56.
- [6] VTOROV, V., NERG, J., " *Cmmbanded Electromagnetic And Thermal Design Platform For Totally Enclosed Induction Machines*" Lappeenranta, May 20, 2010, PP 75.

- [7] Ahmet NUR, Zeki OMAÇ and Eyyüp ÖKSÜZTEPE " *Modelling and Analyzing of Induction Motor Using Three-Dimensional Finite Element Method*". Valencia -Spain, A. NUR et al./ ISITES,2015, pp 457-461.
- [8] Cenk Ulu, Oğuz Korman and Güven Kömürgöz " *Electromagnetic and Thermal Design/Analysis of an Induction Motor for Electric Vehicles*" *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* Vol. 8, No. 2, March 2019, pp 239-246.
- [9] Bensalem,Y and M, N, Abdelkrim " *Modeling and Simulation of Induction Motor based on Finite Element Analysis*" *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)* Vol. 7, No. 4, December 2016, pp. 1100~1109.
- [10] ROBERTS, D. " *The application of an induction motor thermal model to motor protection and other functions*". PhD thesis, University of Liverpool. 1986, PP 63-75.
- [11] CHIN, Y.K., D.A. STATON. " *Thermal Analysis Lumped-Circuit Model And Finite Element Analysis*" 2003, PP 103-112.
- [12] PYRHONEN, J., JOKINEN, T and HRABOVCOVA, V " *Design of Rotating Electrical Machine* "©John Wiley & Sons, Ltd. ISBN, 2008, PP668.