

استخدام برنامج Ansys Electronics و Ansys في الحساب التحليلي والحراري للمحرك التحريضي ثلاثي الطور

د. م. عزت حسن *

د. م. زيد بدر **

م. همام زيتي ***

(تاريخ الإيداع 9 / 8 / 2021 . قُبِلَ للنشر في 19 / 10 / 2021)

□ ملخص □

نظراً لما تقدّمه البارامترات التشغيلية للمحرك التحريضي من معلومات هامة حول أدائه وكفاءته، ونظراً لارتباط عمل المحرك بارتفاع حرارته نتيجة الضياعات المختلفة. سنقدّم في هذا البحث دراسة شاملة للمحرك التحريضي ثلاثي الطور حيث تم تصميم المحرك باستخدام برنامج Ansys Electronics وذلك بعد حساب أبعاده وبارامترات التصميم الأساسية اعتماداً على طريقة التصميم الكهرومغناطيسي واستخراج القيم الأساسية اللازمة لاعتمادها كمدخلات للبرنامج. ليتم بعدها الحساب التصميمي للمحرك واستخراج بارامتراته التشغيلية باستخدام مكتبة Rmxpert ثم الانتقال إلى الحزمة Maxwell 2D لتحليل كثافة الفيض المغناطيسي واستخدام مخرجات عملية التحليل الكهرومغناطيسي كمدخلات لبرنامج Ansys لإجراء عملية التحليل الحراري ومقارنة نتائج المحاكاة مع الاختبارات التجريبية، حيث أجريت التجارب في مخبر الآلات الكهربائية في جامعة تشرين، وبمقارنة النتائج الحاصلة مع نتائج المحاكاة تبين أن النتائج التجريبية قريبة ومطابقة في بعض الأحيان لنتائج المحاكاة، باستثناء وجود بعض النقاط الشاذة.

كلمات مفتاحية: محرك تحريضي، Ansys Electronics ، تصميم كهرومغناطيسي، تحليل حراري.

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

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

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

Using Ansys Electronics and Ansys software in the analytical and thermal calculation of a three-phase induction motor

Dr .Eng .Izzat Hasan *
Dr .Eng .Zaid Badr**
Engineer Homam Zaity***

(Received 9 / 8 / 2021 . Accepted 19 / 10 / 2021)

□ ABSTRACT □

Due to the important information provided by the induction motor operating parameters as its performance and efficiency, and because of the motor operating is related to its temperature rise as a result of various losses. In this research, we will present a comprehensive study of the three-phase induction motor, where the motor was designed using Ansys Electronics program. The dimensions and basic design parameters based was calculated using the electromagnetic design method and use it as input to the program which can calculate the motor and extract its operational parameters using the RMxpert library. By using Maxwell 2D package we could to analyze the magnetic flux density and use the outputs of the electromagnetic analysis process as inputs to the Ansys program to conduct the thermal analysis process and compare the simulation results with experimental tests. The experiments were conducted in the electrical machines laboratory at Tishreen University by. Comparing the results obtained with the simulation results, it was found that the experimental results are close to the simulation results, and sometimes identical to it. except for the presence of some anomalies.

Keyword: Induction Motor, Ansys Electronics, Electromagnetic design, thermal analyse.

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

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

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

1. المقدمة:

تستخدم الآلات التحريضية بشكل أساس كمحركات كهربائية وفي بعض الأحيان كمولدات و تعدّ من أكثر أنواع الآلات الكهربائية انتشاراً واستخداماً في أيامنا هذه، فعند عملها في نظام التحريك تقوم الآلة بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية، ونظراً لانتشارها الواسع فإنها تستهلك حوالي نصف الطاقة الكهربائية المنتجة في العالم، ويرجع ذلك إلى بساطة تكوينها ورخص ثمنها وخفة وزنها و وثوقيتها العالية في العمل وسهولة قيادتها والتحكم بأدائها وعدم احتوائها على أجزاء سهلة العطب أو سريعة الاهتراء كالمجمع وحلقات الانزلاق بالمقارنة مع آلات التيار المستمر والآلات التزامنية[1].

لقد سميت الآلة التحريضية بهذا الاسم لأن جهد الدوار (القوة المحركة الكهربائية التي تولّد تيار الدائر والساحة المغناطيسية في الدائر) ينشأ في هذا الدوار بالتحريض ولا يأتي من منبع خارجي. كذلك يطلق على هذه الآلات اسم الآلات غير المتوافقة (اللاتزامنية)، لأن سرعة دوران الدائر لا تساوي سرعة دوران الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية[2].

ترتبط عمليات الطاقة التي تحدث في الآلة التحريضية بالتوتر المطبق على الثابت (U_1) وتردده (f_1) وبالانزلاق (S).

إن علاقة القيم التي تصف عمليات الطاقة مثل: ($\cos \varphi_1, I_1, \dot{I}_2, T, \dots$) بالانزلاق عند توتر ثابت مطبق على ملفات الثابت و كذلك عند تردد ثابت ($f_1 = const, U_1 = const$) تدعى بالميزات الكهروميكانيكية[2].

حسابياً: يتم الحصول على المعادلات التي تحسب هذه القيم بواسطة الدارة المكافئة للمحرك.

برمجياً: يتم استخدام العديد من البرامج مثل MATLAB و Ansys Electronics لتصميم وتحليل العمليات الكهروميكانيكية في الآلة التحريضية، و بعد ذلك يتم استخدام هذه النتائج كمدخلات لعملية التحليل الحراري باستخدام برامج أخرى مثل : Ansys و MotorCAD.

مخبرياً: يتم دراسة أداء المحرك وتتبع بارامتراته الأساسية والحصول على معظمها كقيم مقاسة، ثم يتم الحصول على باقي القيم غير المقاسة حسابياً، ولمعرفة درجة حرارة النقاط الهامة من المحرك يتم تثبيت مجسات موصولة إلى جهاز قياس تتم مراقبة درجة الحرارة من خلاله.

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.

تم سابقاً وضع نماذج تمثيلية باستخدام MATLAB للتجهيزات المخبرية في مخبر الآلات الكهربائية في جامعة تشرين و دراسة إمكانية انشاء مخبر حاسوبي خاص لهذه الغاية. حيث تمت مقارنة النموذج التمثيلي مع العناصر الناتجة من التجربة الفعلية [3]. في دراسة أخرى و باستخدام Matlab-Simulink أيضاً تم بناء نموذج لنظام قيادة كهربائي يستخدم محرك تحريضي ثلاثي الطور ذي قفص سنجابي باستخدام الحقل الموجه

وذلك للتحكم بكل من السرعة و الفيض والتيار، لإتمام عملية التحكم دون قياس فيض الدائر تم بناء نموذج للفيض انطلاقاً من القيم المقاسة لكل من تيار الثابت وسرعة الدائر التي يمكن قياسها بشكل مباشر وتم التحقق من النموذج بنتائج تم الحصول عليها باستخدام بيئة Matlab-Simulink [4].

تم استخدام برنامج Maxwell لنمذجة ومحاكاة محرك تحريضي ذو دائر مقصور $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{24}{22}$ والحصول على توزع الفيض وكثافة الفيض في الحزمة 3D , 2D من البرنامج بالإضافة إلى بعض المميزات التشغيلية في المحرك [5]. كما تم استخدام برنامج Maxwell لدراسة ومحاكاة المحرك التحريضي المستخدم في السيارات الكهربائية حيث تم إجراء التصميم الكهرومغناطيسي للمحرك وفقاً لمعايير التصميم المحددة. ثم التحقق من التصميم التحليلي باستخدام طريقة العناصر المنتهية. اعتماداً على النتائج التي تم الحصول عليها في التحليلات الكهرومغناطيسية. عدّل 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 [6].

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 وتصميم دارة القيادة باستخدام Ansys-Simplorer بينما أنجز 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 الكهرومغناطيسي [7].

في هذا البحث قمنا بدراسة محرك تحريضي باستطاعة 550 W في مخبر الآلات الكهربائية في جامعة تشرين وتحليل وقياس بارامتراته الأساسية ودرجة حرارة كل من القسم الفعال لملفات الثابت والقسم الجبهوي وأسنان الثابت عند تغذيته بتوتر جيبي متغير ثلاثي الطور من الصفر حتى التوتر الاسمي وتسجيل القيم المقاسة، ثم حساب باقي القيم اللازمة للحصول على مميزات المحرك.

من أجل نفس المحرك، وانطلاقاً من الحسابات الكهرومغناطيسية، يتم التصميم الكهرومغناطيسي للمحرك واستخدام بارامترات التصميم كمدخلات لبرنامج Ansys Electronics لحساب مميزات التشغيلية واستخدام مخرجاته لاحقاً كمدخلات لبرنامج Ansys الذي يتيح إمكانية إجراء التحليل الحراري للمحرك ومعرفة درجة الحرارة في كل نقطة منه ومقارنة النتائج التحليلية مع النتائج المخبرية.

2. أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في مقارنته بين الطريقة التجريبية (في مخبر الآلات الكهربائية) والطريقة التحليلية باستخدام برنامج Ansys Electronics لحساب مميزات المحرك التحريضي وإجراء التحليل الحراري باستخدام برنامج Ansys ومقارنة النتائج بهدف معرفة دقة التصميم الكهرومغناطيسي والتحليل الحاسوبي في حساب مميزات عمل المحرك التحريضي وعملية التحليل الحراري.

3. طرائق البحث ومواده:

تمت دراسة محرك باستطاعة 550 W في مخبر الآلات الكهربائية في جامعة تشرين وتحليل وقياس بارامتراته الأساسية عند تغذيته بتوتر جيبي متغير ثلاثي الطور وتحميله بحمولته الاسمية وتسجيل القيم المقاسة، ثم حساب باقي القيم للحصول على القيم اللازمة لدراسة بارامترات المحرك. ثم تمت عملية التصميم الكهرومغناطيسي للمحرك اعتماداً على بارامتراته التصميمية واستخدام بارامترات التصميم كمدخلات لبرنامج Ansys Electronics وبعد تصميم المحرك باستخدام البرنامج تم اجراء تحليل مميزاته التشغيلية واستخدام مخرجاته كمدخلات لبرنامج Ansys لإجراء التحليل الحراري للمحرك ومعرفة درجة الحرارة في كل نقطة منه ومقارنة النتائج التحليلية مع النتائج المخبرية.

4. منهجية البحث:

لقد تم الاعتماد على المنهجين التجريبي والتحليلي في إعداد هذا البحث، حيث شملت منهجية البحث المراحل التالية:

4-1 مواصفات المحرك:

قبل البدء في تصميم المحرك، يجب تحديد بارامترات التصميم مثل الاستطاعة، عدد الأطوار، جهد التغذية المراد 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.

تم حساب الأبعاد والضياعات الكهرومغناطيسية للآلة أثناء عملية التصميم الكهرومغناطيسي، واستخدمت خواص المواد الداخلة في التصميم وموصلاتها 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 التجربة والمحاكاة على محرك تحريضي ثلاثي الطور أحادي الطبقة ذو قفص سنجابي مغلق مزود بمروحة تبريد TEFC استطاعته 550 W مواصفاته مبينة بالجدول (1) [8 ، 1].

الجدول (1) مواصفات المحرك التحريضي المدروس الناتجة من عملية التصميم الكهرومغناطيسي

P= 550	الاستطاعة الاسمية- W
$n_{syn}=1500$	سرعة الدوران - r.p.m
U=220	جهد الخط- V
m=3	عدد الأطوار
P=2	عدد الأقطاب
$f = \frac{n_{syn}}{60} P$ $f = 50$	التردد
$\omega = 2 \pi f$ $\omega = 314.1593$	السرعة الزاوية
$\eta=0.708$	المردود

يبين الجدول (2) الأبعاد الأساسية للمحرك الناتجة من عملية التصميم الكهرومغناطيسي والتي استخدمت لاحقاً كمدخلات لبرنامج Ansys Electronics:

الجدول (2) أبعاد المحرك التحريضي المدروس الناتجة من عملية التصميم الكهرومغناطيسي

الجزء	الرمز	الوحدة	القيمة
طول الثابت	l	m	0.116
نصف القطر الخارجي للثابت	r_1	m	0.073
نصف القطر الداخلي للثابت	r_2	m	0.013
عدد مجاري الثابت	Z_1	عدد	24
عدد مجاري الدائر	Z_2	عدد	22
مساحة مقطع الناقل في مجرى الثابت	S_c	m^2	$1.9066 \cdot 10^{-4}$
نصف القطر الخارجي للدائر	r_3	m	0.0725
نصف القطر الداخلي للدائر	r_4	m	0.0266

4-2 تصميم المحرك باستخدام Ansys Electronics:

يمكن تلخيص خطوات تصميم الآلة الكهربائية على النحو التالي [1 ، 8].

- 1- **التصميم الكهربائي والمغناطيسي:** يتم تحديد أبعاد الجزء الثابت والدوار وقيمة الثغرة الهوائية ونوع اللف وأرقام اللف ومعاملات الملف وطريقة توصيل الملفات اعتماداً على قوانين التصميم الكهرومغناطيسي. بينما يتم تصميم أسنان وقلب الجزء الثابت والدوار واعتماداً على كثافة التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية وتشبع القلب وكثافة تدفق الهواء.
- 2- **اختيار العزل:** يتم تنفيذ تصميم عزل المحرك اعتماداً على معايير التصميم المعتمدة لتوفير السلامة الكهربائية حيث يتم اختيار نوع العازل بحيث تناسب درجة حرارة تشغيل المحرك، ويوضح الجدول (3) أنواع العوازل المستخدمة ودرجات الحرارة المسموح بها لكل عازل وفق IEC60089 , IEC60034-1.

الجدول (3) أنواع العوازل المستخدمة ودرجات الحرارة المسموح بها لكل عازل وفق IEC60089 , IEC60034-1.

نوع العازل	Y	A	E	B	F	H	C
درجة الحرارة المسموح بها	90	105	120	130	155	180	أكبر من 180

- 3- **التصميم الحراري:** نظراً لأن مقاومة الملف تزداد عند زيادة درجة الحرارة حسب العلاقة:

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_0)] \quad (7)$$

حيث:

ρ_t - المقاومة النوعية للملف عند درجة حرارة التشغيل.

ρ_0 - المقاومة النوعية للمعدن المصنوع منها الملف (النحاس).

α - معامل التمدد الحراري.

θ_2 - درجة الحرارة النهائية.

θ_0 - درجة حرارة الوسط المحيط.

لذلك يتم تنفيذ التصميم الحراري لإبقاء المحرك في درجة حرارة التشغيل المطلوبة حيث يتم تحديد نوع التبريد ومعدل تدفق وسيط التبريد وقنوات التهوية.

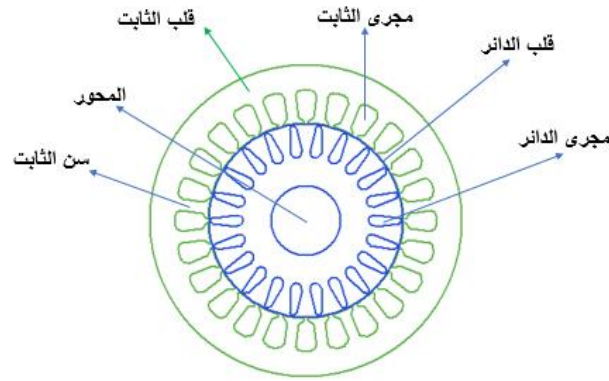
4- **التصميم الميكانيكي:** يشمل التصميم الميكانيكي للآلة الكهربائية تنفيذ وتصميم المحور وقوس النهاية والهيكل الخارجي للمحرك مع الأخذ بعين الاعتبار سرعة العمل الحرجة والضوضاء واهتزازات الآلة الكهربائية وقوى الشد التي تؤثر على المحور ولحظة القصور الذاتي وما إلى ذلك.

بأخذ الخطوات السابقة بعين الاعتبار وانطلاقاً من القيم الواردة في الجدولين (2) و (3) يمكن البدء بتصميم المحرك في Ansys Electronics وبعد التأكد من سلامة النموذج نبدأ بعملية حساب المحرك.

7. النتائج:

1.7 مميزات المحرك باستخدام حزمة Ansoft Maxwell RMxprt:

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



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

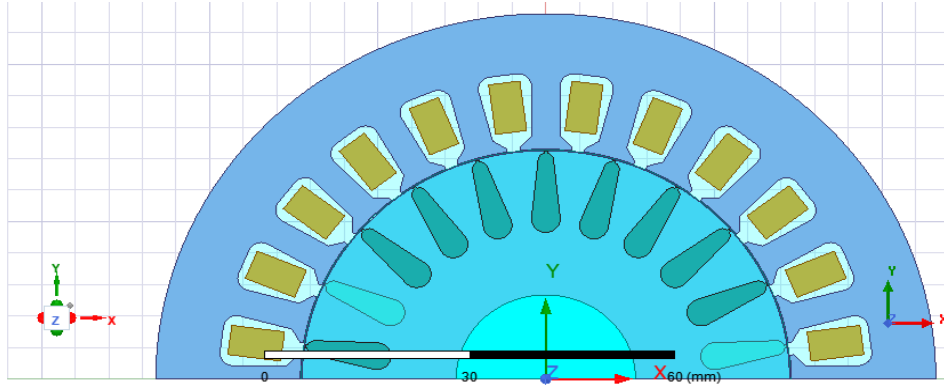
يمثل الشكل (1) الصيغة المبدئية للمحرك المدروس باستخدام حزمة Ansoft RMxprt من برنامج Ansys Electronics ، حيث يمكننا إجراء حساب تحليلي للمحرك لمعرفة كفاءة المحرك وبارامتراته الأساسية كما يوضح الشكل (2).

7	Output Power	549947	mW
8	Input Power	785271	mW
9	Efficiency	70.0327	%
10	Power Factor	0.661793	
11	Rated Torque	3.83187	NewtonMeter
12	Rated Speed	1370.51	rpm
13	Rated Slip	0.0863294	

الشكل (2) البارامترات الأساسية للمحرك المحسوبة باستخدام حزمة Ansoft RMxprt

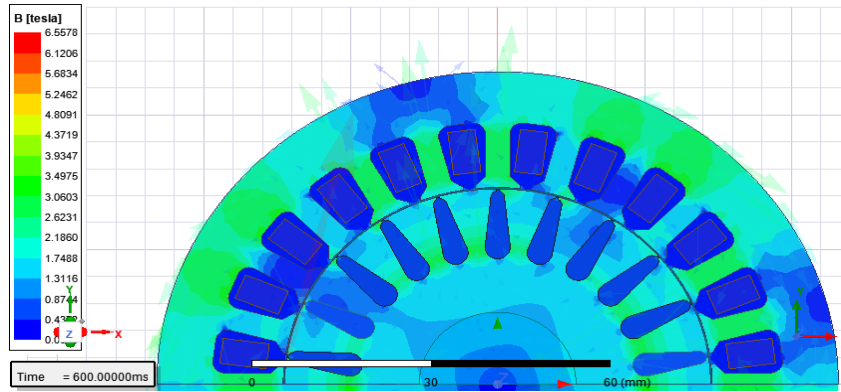
بعد ذلك ننتقل إلى الحزمة Maxwell 2D التي تتيح إجراء الاختبارات المغناطيسية للمحرك كما يوضح الشكل

(3).



الشكل (3) المحرك التحريضي باستخدام الحزمة Maxwell 2D

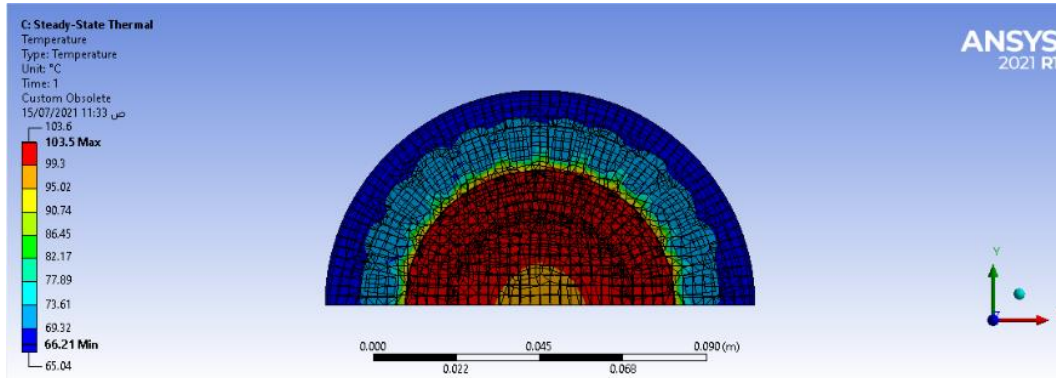
تتيح الحزمة Maxwell 2D إمكانية الحصول على توزيع كثافة الفيض المغناطيسي، يظهر الشكل (4) أن أكبر قيمة لكثافة الفيض تكون في أسنان الثابت وهذا يتوافق مع المبدأ الأساسي لعمل الآلات التحريضية من الناحية المغناطيسية.



الشكل (4) توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المغناطيسي في أجزاء المحرك باستخدام الحزمة Maxwell 2D

بعد التأكد من سلامة النموذج المصمم وجاهزيته للعمل يتم الانتقال إلى برنامج ANSYS و إجراء التحليل

الحراري كما يوضح الشكل (5):



الشكل (5) نتائج عملية التحليل الحراري للمحرك التحريضي باستخدام ANSYS

حيث 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 الحزمة Maxwell 2D من برنامج Ansys Electronics حيث يتم استخدام هذه النتائج كمدخلات لبرنامج التحليل الحراري ANSYS. يبين الشكل (5) نتائج عملية التحليل الحراري للمحرك التحريضي ذو المواصفات المذكورة في الجدولين (2) و (3) حيث يتبين من الشكل أن أكبر قيمة لدرجة الحرارة تساوي $103.5^{\circ}C$ درجة مئوية في الجزء الدائر وهي قيمة مقبولة تبعاً لكون العازل المستخدم في المحرك من النوع E. كما يبين الشكل أن درجة حرارة القسم الفعال للملفات يساوي تقريباً $77^{\circ}C$ درجة مئوية وهي قيمة قريبة من القيمة المقاسة في المخبر.

2.7 الحساب المخبري لمميزات العمل الاسمي للمحرك:

من أجل التحقق من صحة النتائج البرمجية للمحرك المصمم تم استخدام محرك بنفس المواصفات السابقة في مخبر الآلات الكهربائية في جامعة تشرين، حيث تم إجراء كل من اختبائي العمل على فراغ والعمل على قصر. من أجل اختبار مميزات المحرك تحت الحمولة، تم تحميله بشكل غير مباشر وذلك بربط محوره إلى مولدة تيار مستمر تفرعية، ثم تم اقلاع المحرك من منبع جهد متغير حتى الوصول إلى الجهد الاسمي و (سرعة العمل على فراغ). من أجل العمل عند الحمولة الاسمية للمحرك تم تحميل المولدة التفرعية بحمولة أومية متغيرة وبزيادة حمولة المولدة يزداد حمل المحرك القائد حتى الوصول إلى التيار الاسمي. أثناء الزيادة التدريجية للحمولة يتم تسجيل كامل البارامترات المقاسة والتي تصف حالة المحرك في كل نقطة بدءاً من نقطة العمل على فراغ حتى نقطة العمل الاسمي. لأجل دراسة كامل مميزات المحرك يتم حساب بعض القيم اللازمة اعتماداً على القيم المقاسة، جميع هذه القيم مبينة في الجدول (4).

الجدول (4) المميزات الأساسية المقاسة والمحسوبة للمحرك المدروس مخبرياً

قيم مقاسة				قيم محسوبة			
التيار	عامل الاستطاعة	السرعة	العزم	الاستطاعة P1	الاستطاعة P2	المردود	الانزلاق
2.04	0.18	1470	0	141	0	0	0.02
2.26	0.51	1444	1.6	422	242	0.57	0.037
2.72	0.71	1413	3.1	689	458.67	0.65	0.058
2.92	0.74	1383	3.6	802	550	0.68	0.078
3.2	0.78	1365	4.2	900	457.38	0.5	0.09

وبمقارنة القيم الواردة في الجدول (4) مع البارامترات الأساسية للمحرك المحسوبة باستخدام حزمة Ansoft RMxprt والمبينة في الشكل (2) نلاحظ أن قيم البارامترات الأساسية متقاربة بنسبة 90%. قبل تشغيل المحرك تم تثبيت مجسات لقياس درجة حرارة كل من القلب والأسنان وملفات الثابت بهدف مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج التحليلية والتحقق منها، تم قياس درجة حرارة النقط المذكورة سابقاً عند العمل الاسمي للمحرك بدءاً من لحظة التشغيل وحتى استقرار درجة الحرارة بعد 25 دقيقة وكانت النتائج كما هو موضح في الجدول (5):

الجدول (5) درجة الحرارة المقاسة لنقاط المحرك في فترات تشغيل مختلفة

لحظة القياس	ملفات الثابت	سن الثابت	قلب الثابت
بدء التشغيل	46	43	45
20 دقيقة بعد بدء التشغيل	63	55	60
25 دقيقة بعد بدء التشغيل	75	66	71

8. مناقشة النتائج:

تم في هذا البحث تصميم المحرك التحريضي الثلاثي الطور حسابياً ومحاكاته حاسوبياً والتأكد من النتائج مخبرياً:

❖ إن تصميم المحرك باستخدام Ansys Electronics أتاح إمكانية إجراء تحليل حراري للمحرك باستخدام برنامج Ansys الذي يستخدم طريقة العناصر المنتهية في عملية التحليل الحراري وبالمقارنة بين نتائج القياسات التجريبية نجد أن النتائج متقاربة وهي قيمة مقبولة تبعاً لكون العازل المستخدم في المحرك من النوع E.

❖ قبل البدء بإجراء الاختبارات تم تأمين محرك يحمل المواصفات المستخدمة في عملية المحاكاة، حيث تم حساب باقي القيم اللازمة اعتماداً على قوانين التصميم الكهرومغناطيسي، وإجراء التجارب عليه تبين أن النتائج متقاربة مع كل من النتائج الحسابية ونتائج المحاكاة، وهذا يتوافق مع النتائج المنشورة سابقاً في هذا المجال.

❖ تمثل هذه الورقة البحثية مرحلة من بحث متكامل سيتم فيه إجراء تعديل تصميمي على المحرك المدروس بهدف تخفيف الأثر الحراري للضياعات في ملف الثابت على عازلية الملفات، ودراسة أثر التقنية المستخدمة لتخفيف الحرارة (تجريبياً وتحليلياً) على البارامترات الطاقية للمحرك، وسيتم نشر نتائج هذه الدراسة تبعاً.

9. الاستنتاجات:

تم في هذا البحث استخدام طريقتين لحساب وتحليل المحرك التحريضي الثلاثي الطور، وكانت النتائج مقبولة ومقارنة، غير أن تصميم المحرك حسابياً معقّد وطويل بالمقارنة مع التحليل باستخدام برنامج Ansys Electronics، كما أنه يعطينا تصوّر واضح عن أداء المحرك ومميزاته، ناهيك عن أنه يحلّ كثافة الفيض ويبين توزّع خطوط الفيض المغناطيسي داخل المحرك وهذا لا توفره الطريقة الحسابية. كما أن البرنامج يبدي مرونة لإمكانية استخدام مخرجاته كمدخلات لبرنامج Ansys مما يتيح للباحث استكمال الدراسة الحرارية عليه واختيار نوعية العازل تبعاً للاجهاد الحراري الذي يتعرض له، وإجراء باقي الاختبارات المتعلقة بإمكانية تحسين عملية التبادل الحراري باستخدام تقنية مناسبة.

10. التوصيات

- يوصى بإجراء عملية التحليل الحراري للمحرك باستخدام برنامج آخر مثل Motor-CAD ومقارنتها مع كل من النتائج التي حصلنا عليها في Ansys والنتائج التجريبية بهدف معرفة أي الطريقتين أكثر دقة.
- يوصى بدراسة إمكانية ادخال برنامج Ansys Electronics في الخطة التدريسية لطلاب الهندسة الكهربائية بمختلف الاختصاصات.

11. المراجع

- [1] Pyrhonen, J, Jokinen, T and Hrabovcova, V , 2008 “*Design of Rotating Electrical Machine*” ©John Wiley & Sons, Ltd. ISBN, PP668.
- [2] حسن، عزت 2003 "الآلات التحريضية" منشورات جامعة تشرين، 600.
- [3] محمود، علي. 2006 "نمذجة الآلات الكهربائية باستخدام Matlab and Simulink" مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية – سلسلة العلوم الهندسية المجلد 28 العدد 1، 65 – 81.
- [4] مرهج، محمد، 2015 "نمذجة نظام قيادة لمحرك تحريضي ثلاثي الطور باستخدام الحقل الموجه" مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية – سلسلة العلوم الهندسية المجلد 73 العدد 2، 91 – 107.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] حسن، عزت، 1995 "تصميم الآلات الكهربائية" منشورات جامعة تشرين، 494.