

مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية
والكهربائية والمعلوماتية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 47 . العدد 11

1447 هـ - 2025 م

الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص

المدير المسؤول عن المجلة

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الإنسانية	أ. د. وليد حمادة
رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية	د.نعيمة عجيب

عضو هيئة التحرير	د. محمد فراس رمضان
عضو هيئة التحرير	د. مضر سعود
عضو هيئة التحرير	د. ممدوح عبارة
عضو هيئة التحرير	د. موفق تلاوي
عضو هيئة التحرير	د. طلال رزوق
عضو هيئة التحرير	د. أحمد الجاعور
عضو هيئة التحرير	د. الياس خلف
عضو هيئة التحرير	د. روعة الفقس
عضو هيئة التحرير	د. محمد الجاسم
عضو هيئة التحرير	د. خليل الحسن
عضو هيئة التحرير	د. هيثم حسن
عضو هيئة التحرير	د. أحمد حاج موسى

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها

الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص

سورية . حمص . جامعة حمص . الإدارة المركزية . ص . ب (77)

. هاتف / فاكس : ++ 963 31 2138071

. موقع الإنترنت : www.homs-univ.edu.sy

. البريد الإلكتروني : journal.homs-univ.edu.sy

ISSN: 1022-467X

شروط النشر في مجلة جامعة حمص

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
 - طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
 - إذا كان الباحث طالب دراسات عليا:
يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقة على النشر في المجلة.
 - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:
يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.
 - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة البعث :
يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.
 - إذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :
يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.
 - يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):
عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1- مقدمة
 - 2- هدف البحث
 - 3- مواد وطرق البحث
 - 4- النتائج ومناقشتها .
 - 5- الاستنتاجات والتوصيات .
 - 6- المراجع.

- يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (الآداب - الاقتصاد - التربية - الحقوق - السياحة - التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):
- عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1. مقدمة.
- 2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
- 3. أهداف البحث و أسئلته.
- 4. فرضيات البحث و حدوده.
- 5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
- 6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
- 7. منهج البحث و إجراءاته.
- 8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
- 9. نتائج البحث.
- 10. مقترحات البحث إن وجدت.
- 11. قائمة المصادر والمراجع.
- 7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:
 - أ- قياس الورق 25×17.5 B5.
 - ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 - يمين 2.5- يسار 2.5 سم
 - ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8
 - ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20
- كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي - العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.
- ج. يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.
- 8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.
- 9- تقديم أي بحث للنشر في المجلة يدل ضمناً على عدم نشره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.

10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة
11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام ورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

تكتب جميع المراجع باللغة الانكليزية (الأحرف الرومانية) وفق التالي:

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة - الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة - سنة النشر - وتتبعها معترضة (-) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة - دار النشر وتتبعها فاصلة - الطبعة (ثانية . ثالثة) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة .
وفيما يلي مثال على ذلك:

-MAVRODEANUS, R1986- Flame Spectroscopy. Willy, New York, 373p.

ب . إذا كان المرجع بحثاً منشوراً في مجلة باللغة الأجنبية:

— بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة — المجلد والعدد (كتابة مختزلة) وبعدها فاصلة — أرقام الصفحات الخاصة بالبحث ضمن المجلة.
مثال على ذلك:

BUSSE,E 1980 Organic Brain Diseases Clinical Psychiatry News , Vol. 4. 20 – 60

ج . إذا كان المرجع أو البحث منشوراً باللغة العربية فيجب تحويله إلى اللغة الإنكليزية و التقيد بالبنود (أ و ب) ويكتب في نهاية المراجع العربية: (المراجع In Arabic)

رسوم النشر في مجلة جامعة حمص

1. دفع رسم نشر (50000) ل.س أربعون ألف ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.
2. دفع رسم نشر (200000) ل.س مئة ألف ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .
3. دفع رسم نشر (200) مننًا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .
4. دفع مبلغ (15000) ل.س ستة آلاف ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.

المحتوى

الصفحة	اسم الباحث	اسم البحث
42-11	د. عبد الرحمن الحبال	دور المحولات الذكية في عزل الأحمال عن مشاكل شبكات التوزيع
70-43	د. وحيد قسطنون	أتمتة عمل المنظومة الكهربائية السورية، وفق التَّقْنِيَّات الحديثة، بناءً على خوارزميات توقُّع مؤشِّرات الشبِّكة
104-71	د. معتز الحصريه	"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "
128-105	د. مي نهاد سعيد	دراسة تأثير درجة الحرارة ورقم رينولدز على نمو الطبقة الحدية في الأنايبب المتقاربة عند سرعات جريان منخفضة باستخدام CFD

دور المحولات الذكية في عزل الأحمال عن مشاكل شبكات التوزيع

اعداد : د. عبد الرحمن الحبال

ملخص

تعتبر المحولات الذكية من الحلول الواعدة للاستخدام في الشبكات الذكية مستقبلاً ولها عدد كبير من المزايا حيث يمكن أن تلعب دوراً حيوياً في التحكم بجريان الاستطاعة وتكامل منابع الطاقة المتجددة مع منظومات الطاقة الحالية كما يمكن أن تلعب دوراً هاماً في تلافي نتائج التقلبات التي من الممكن أن تحصل في جودة الطاقة الكهربائية Power Quality مثل تغيرات الجهد، كما يمكن لهذه المحولات أن تسهم في تحسين الموثوقية وذلك من خلال تقليل عدد الانقطاعات وزمنها وزيادة الكفاءة.

سنقوم في هذا البحث بتقديم نموذج لمحول ذكي يعتمد على المبدل متعدد المستويات من النوع MMC مع تقنيات التحكم اللازمة لقيادة كل مراحل المحول في بيئة Matlab/Simulink وتبيان الدور الهام للمحول الذكي القيام به في عزل الحمل عن أعطال شبكة التوزيع بالتالي أهمية المحول الذكي في زيادة الموثوقية.

كلمات مفتاحية: محول ذكي، مبدل متعدد المستويات من النوع MMC.

The Role of Smart Transformers in Decoupling Loads from Distribution Network Issues

Abstract

Smart transformers are considered to be one of the most promising solutions to be used within futuristic Smart Grids, and they have many advantages. ST can play a very vital role in bidirectional power flow control and renewable energy sources integration with power systems, also they can play a major role in avoiding power quality issues like voltage dips. ST can improve reliability by reducing the number of interruptions and their duration.

In this research a Modular Multilevel Converter based Smart Transformer is introduced accompanied by control techniques to control all stages Matlab/Simulink and its role in decoupling loads from distribution network issues, and the importance of smart transformers in increasing reliability.

Keywords: Smart Transformers, Modular Multilevel Converters

1. المقدمة

تعد المحولات أكثر أجزاء نظم القدرة أهمية، حيث تلعب دوراً رئيسياً في نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية [1]. وقد شكلت المحولات التقليدية موضوعاً بحثياً هاماً وتم تطويرها بحيث ترتفع كفاءتها وتكون عالية الموثوقية وذات مردود اقتصادي مرتفع كونها العمود الفقري لأنظمة توزيع الطاقة. إلا أن استخدامها لايزال يواجه بعض العوائق مثل ضياعات الطاقة وارتفاع درجة الحرارة بسبب وجود التوافقيات وإمكانية تأثير العطل على أحد أطرافها على الطرف الآخر وضعف التحكم بالجهد عند وصل الأحمال وحالات ارتفاع الجهد والتحميل الزائد. بالإضافة لما سبق نقص الحماية من الأعطال الداخلية التي تنشأ بسبب الانهيار الذي يحصل في القلب المغناطيسي وانتقال الخواص غير المرغوبة بين ملفات الأولي والثانوي مثل حالات هبوط الجهد التي من الممكن أن تحصل في طرف الخرج والجهود الحثية التي تبذل لتكامل منابع الطاقة المتجددة مع الشبكات الموجودة. بالإضافة للحجوم الكبيرة والأوزان الثقيلة التي تميز المحولات التقليدية فإنها تعاني أيضاً من نقصان إمكانية التحكم بها ولها آثار مضرّة بالبيئة نظراً للاستهلاك الكبير لزيوت المحولات [2]، والتي ساهمت بشكل أو بآخر بأزمات الطاقة التي نعيشها عالمياً في الوقت الحالي.

يجب التخلص من القيود التي تحدّد استخدام المحولات التقليدية لتمكين الشبكات الكهربائية من تلبية المتطلبات التكنولوجية المتنامية مثل التكامل مع منابع الطاقة المتجددة الموزعة، وتحديات استخدام التوليد الموزع، ومرافق تخزين الطاقة الموزعة، وتقنيات شحن المركبات الكهربائية وغيرها من التطبيقات الحديثة.

إن الاتجاه الحديث نحو التخلص من مركزية توليد الطاقة decentralization of power عن طريق تكامل منابع الطاقة المختلفة بسبب عدم التحكم بالجهد بالشكل المطلوب [3] ويؤدي لمشاكل تتعلق بجودة الطاقة [4,5] ويتسبب بحقق للتوافقيات [6] في نظم القدرة، تؤدي لغياب القدرة على التحكم بشكل يتوافق مع المقاييس العالمية. إن ما ذكر سابقاً يلقي الضوء على الحاجة الملحة

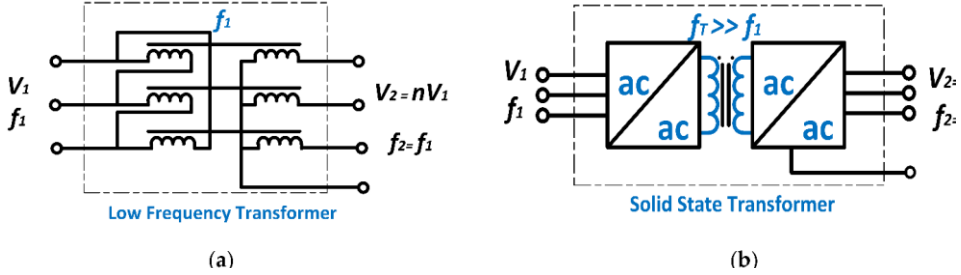
لاستخدام معدات ذكية تستخدم التقدم التكنولوجي للتغلب على حالات عدم التحكم بنظم الطاقة الكهربائية لتلبية الحاجة المتزايدة لها.

مع التقدم التكنولوجي الحاصل تزداد أهمية الاعتماد على المبدلات الإلكترونية ذات الاستطاعة العالية ودمجها ضمن نظم القدرة من خلال أبرز التطبيقات مثل تكامل منابع

الطاقات المتجددة مع شبكات الطاقة وإعطاء المبدلات الإلكترونية دوراً أكبر في حماية نظم نقل وتوزيع الطاقة [7,8]. إن استخدام إلكترونيات الحالة الثابتة Solid State electronics مكنت المبدلات الإلكترونية ذات الاستطاعات المرتفعة من التحكم بالطاقة الكهربائية وتحويلها، بالتالي أصبح من الأسهل دمج هذه المبدلات مع نظم القدرة كتقنيات ثورية في مجال الهندسة الكهربائية في العالم المعاصر.

في الآونة الأخيرة انتشر استخدام محولات الحالة الثابتة Solid-State Transformers والتي تدعى أيضاً بمحولات إلكترونيات القدرة أو المحولات ذات التردد العالي أو المحولات الذكية. وتعتبر البديل الأكثر ملاءمة للمحولات التقليدية للاستخدام في الشبكات الذكية المستقبلية وتمت دراستها بشكل كبير لاستخدامها في أنظمة النقل والتوزيع [9-15]. كونها ذات كفاءة طاقة مرتفعة يمكن اعتبارها تكنولوجية رائدة لمستقبل أنظمة الطاقة [16-18].

يبين الشكل (1a) محول تقليدي يعمل عند تردد f_i . يتغير الجهد عند الخرج إلا أن التردد يبقى ثابتاً، إلا أن المحول الذكي والمبين بالشكل (1b) يعمل عند تردد f_T أعلى بكثير من تردد عمل المحول التقليدي ولا يكون تردد الخرج بالضرورة مساوياً لتردد الدخل حيث من الممكن لتردد الخرج f_2^* حتى أن يساوي الصفر أي أن يكون الخرج تيار مستمر.



الشكل 1 بنية المحول التقليدي (b) بنية محول ذكي

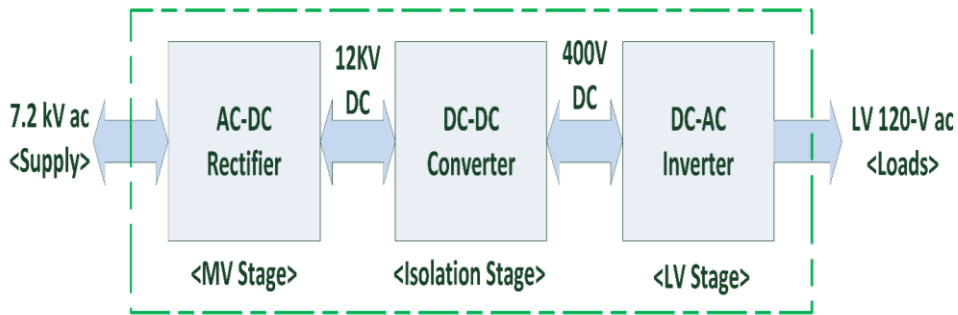
من الواضح من الشكل (1b) توافر عدة إمكانيات لوظائف يمكن أن تملكها المحولات الذكية لا تملكها المحولات التقليدية. حيث يسمح استخدام الربط عن طريق إلكترونيات القدرة بالعمل عند ترددات مرتفعة كما أن مرحلة التحويل الوسيطة DC-DC يمكن أن تقدم عدد كبير من الفوائد. لاستخدام المحولات الذكية عدد كبير من الفوائد مثل تعويض حالات هبوط الجهد والتحكم بجريان الاستطاعة وتعويض الاستطاعة الردية وعزل الأعطال والقدرة على توفير خرج تيار مستمر وغيرها. وقد توجهت العديد من المشاريع [9,12,16,19,20] لتحقيق تقدم في تكنولوجيا المحولات الذكية حيث تعتبر هذه المحولات حجر زاوية للشبكات الذكية المستقبلية. يسمح تطور المحولات الذكية بالجريان ثنائي الاتجاه للاستطاعة في شبكات التوزيع وتسمح بربط شبكات التيار المستمر وشبكات التيار المتناوب لتمكين تكامل منابع الطاقة المتجددة مثل المحطات الكهروضوئية وتسهيل التحكم بجريان الاستطاعة بين الشبكات الميكروية [11,21-24]. يؤدي تطور تكنولوجيا المحولات الذكية إلى اندماجها في سوق الطاقة لتلبية الطلب اللامتناهي للطاقة الكهربائية مستقبلاً حيث أنها تسهل تأمين التغذية الكهربائية بشكل فعال ومتحكم به بين الشبكات الرئيسية والشبكات الميكروية. مع تنامي دور الشبكات الميكروية كمساهم كبير لتلبية الطلب على الطاقة وفي دورة التغذية ستزداد حالات عدم ضبط الجهد وستظهر بشكل أكبر ظاهرة التخلص من مركزية توليد الطاقة في المستقبل [25]. سيكون من الضروري لضبط جريان الاستطاعة استخدام الأجهزة الذكية مثل المحولات الذكية.

كما أنه ستكون أكثر ملاءمة لتطبيقات مثل شبكات التوزيع والنقل بالترددات المرتفعة، زرع الشبكات الميكروية في البحار [26,27,28] تطبيقات التنقيب [29] استخدام مبدأ الدفع الموزع في المركبات الجوية وفي تطبيقات الجر حيث يمكن التخلص من حدود الوزن والحجم لدرجة كبيرة. بالرغم من أن للمحولات الذكية محاسن كبيرة إلا أن لها حدود ومشاكل لا بد من التغلب عليها قبل الاستخدام الفعلي لها. لا تزال المحولات التقليدية أكثر كفاءة من المحولات الذكية وموثوقية أعلى وأكثر اقتصادية ومتوافقة بشكل كبير مع أنظمة التوليد والتوزيع الحالية. في الوقت الحالي ما يزال من المفضل استخدام المحولات ذات التردد المنخفض إلا أن الاهتمام المتزايد بالقضايا البيئية يدفعنا للاهتمام بشكل أكبر بتكنولوجيا المحولات الذكية كبديل ملائم صديق للبيئة.

يقدم هذا البحث دراسة عن الدور الديناميكي الهام للمحولات الذكية والتقنيات المصاحبة لها في عزل الأحمال أو شبكات التوزيع المحلية عن المشاكل التي من الممكن أن تحصل في شبكات التوزيع ذات الجهد المتوسط. وقد تم تنظيم البحث بالشكل التالي: الفقرة 2 تدرس أسس ومبادئ المحولات الذكية. تتناول الفقرة 3 نمذجة المحولات الذكية ذات ثلاث مراحل وميزاتها ووظائفها المختلفة واستراتيجيات التحكم الخاصة بها. تستكشف الفقرة 4 أهمية وقدرة المحولات الذكية على عزل الأحمال عن بعض المشاكل التي من الممكن أن تحدث في شبكات الجهد المتوسط.

2. أسس المحولات الذكية

تستخدم المحولات الذكية المبدلات الإلكترونية ويمكن تصنيف المحولات الذكية وفقاً لبنيتها لعدة أقسام. لتوضيح المفاهيم الأساسية للمحولات الذكية سنقوم بشرح البنية المبينة بالشكل (2) وهي بنية المحولات الذكية ذات ثلاثة مراحل حيث أن هذه البنية تبسط تصميم خوارزميات التحكم وتؤدي جميع الوظائف المرجوة من المحولات الذكية.



SOLID STATE TRANSFORMER

الشكل 2 مراحل تحويل الطاقة ضمن المحول ذي ثلاث مراحل

يتألف المحول الذكي ذو ثلاث مراحل من:

(1) مرحلة الجهد المتوسط: وتتعامل مع الجهود الأعلى بين 1 كيلو فولط حتى 100 كيلو فولط. تكون تغذية هذه المرحلة جهد ثلاثي الطور بتردد 50/60 هرتز يتم تحويلها لتيار مستمر بواسطة مبدل إلكتروني ويمكن تسمية هذه المرحلة بمرحلة التقويم حيث يتعامل المبدل الإلكتروني في هذه المرحلة مع جهود مرتفعة على الطرفين المستمر والمتناوب مقارنة بالمقومات التقليدية ذات الجهود المنخفضة. تتعامل المحولات الذكية مع سويات مرتفعة من الاستطاعة تبعاً للتطبيقات المستخدمة مثل تطبيقات الجر والوصل مع الشبكات الميكروية لذلك يجب أن تكون المكونات نصف الناقل المكونة لها قادرة على التعامل مع سويات مرتفعة للجهود والتيار. أما في التطبيقات التي لا يلعب الوزن والحجم أهمية كبرى فيمكن للمحولات

الذكية أن تلعب دوراً في ترشيح الموجات عن طريق تقويم التيار المتناوب باستخدام تقنيات التعديل العرضاني للنبضة والتي سيزداد الاعتماد عليها في الشبكات الذكية المستقبلية.

(2) *مرحلة العزل:* تقوم هذه المرحلة بعزل مرحلة الجهد المرتفع عن مرحلة الجهد المنخفض باستخدام محول تردد مرتفع. في هذه المرحلة يتم تحويل الجهد المستمر المقوم في المرحلة السابقة إلى جهد متناوب ذو تردد عالٍ بين 100 هرتز وعدد من الكيلوهرتز ومن ثم تخفيضه بواسطة محول التردد العالي ومن ثم تقويم موجة الجهد المنخفض مرة أخرى. يسمح عمل المحول تحت ترددات مرتفعة بالاستخدام الكامل للخواص المغناطيسية للقلب [30].

يؤدي عمل محول العزل عند ترددات مرتفعة لتخفيض حجم ووزن المحول الذكي. عند نفس مستوى الاستطاعة المنقولة P ومع إبقاء كل من كثافة التيار J وكثافة الحقل المغناطيسي B_m عند قيم ثابتة فإن الحجم V كتابع للتردد f يعطى بالعلاقة (1)

$$A\omega \cdot Ac = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{P}{k_\omega B_m J f} \Rightarrow V \propto (A\omega \cdot Ac)^{\frac{3}{4}} \propto \frac{1}{f^{\frac{3}{4}}} \quad (1)$$

حيث k_ω معامل ملئ لف الثغرة الهوائية winding window filling factor، Ac مساحة المقطع العرضاني للقلب، $A\omega$ مساحة الثغرة الهوائية للف. من الواضح من العلاقة (1) أنه يمكن تقليل الأبعاد الفيزيائية للمحول بارتفاع التردد. إن عمل المحولات الذكية عند ترددات مرتفعة يجعلها ملائمة لتطبيقات خاصة مثل الجر حيث أن الحجم والوزن يعيق الوصول لكفاءات أعلى. وقد جذبت ميزة انخفاض حجم ووزن المحولات الذكية اهتمام المصنعين لأنها تمكنهم من تحسين أداء أدوات الجر [11,31-37]. بالإضافة لميزة الوزن والحجم فإن الخواص الأخرى للمحولات الذكية مثل القدرة على نقل الاستطاعة بكلا الاتجاهين وتعويض الاستطاعة الردية ووجود وصلة تيار مستمر DC link يجعلها مفضلة في العديد من التطبيقات. لذا

يتم اعتبار المحولات الذكية مكون حاسم لنظم الطاقة المستقبلية. يعتمد المحول الذكي على مبدلات القدرة للقيام بالعديد من الوظائف ويجب أن تعمل هذه المبدلات تحت ترددات إبدال مرتفعة. لذا مع ازدياد تردد العمل تزداد ضياعات الإبدال وهذا يعتبر أحد المعوقات الرئيسية لتحسين الكفاءة أثناء عملية التصميم.

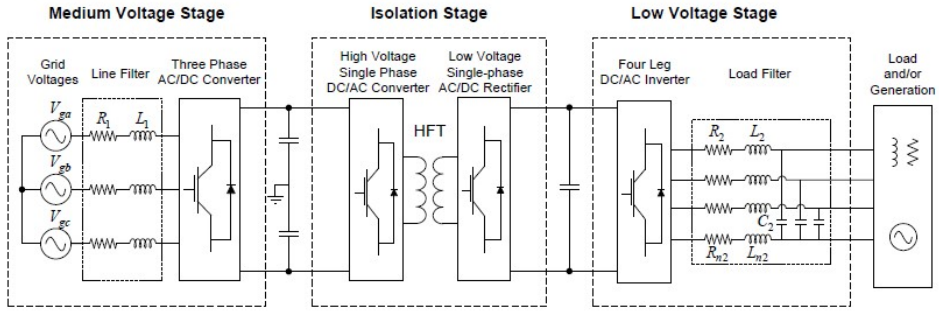
(3) مرحلة الجهد المنخفض: تعمل مرحلة الجهد المنخفض تحت جهود تتراوح بين 50 حتى 1000 فولط في هذه المرحلة يتم تحويل الجهد المستمر من خرج المرحلة السابقة لجهد متناوب لذا تدعى هذه المرحلة بمرحلة التعرّيج. ويكون تردد جهد هذه المرحلة 50/60 هرتز عادة. بعكس المحولات التقليدية تقدم المحولات الذكية إمكانية التحكم. حيث تسمح بالتحكم بجهود وتيارات الدخل والخرج والتحكم بجريان الاستطاعة خلال مبدلات القدرة ومحولات التردد العالي التي تكون المحول الذكي. كما أنها تسمح بالتحكم بتردد الخرج حيث من الممكن الحصول على أي قيمة مرغوبة للتردد في مرحلة التعرّيج. بالرغم من أن ميزة انخفاض الحجم والوزن تعطي المحولات الذكية أفضلية كبيرة، إلا أنه من الضروري الأخذ بعين الاعتبار المكونات الأخرى مثل مبدلات القدرة ودارات التبريد ودارات التحكم لأنها ضرورية لتخفيض الحجم الكلي. تعتمد كفاءة المحولات الذكية وقدرتها على التحكم بجريان الاستطاعة على بنى ودارات المبدلات المستخدمة وعلى عدد مراحلها المختلفة.

3. نمذجة محول ذكي يعتمد على المبدل متعدد المستويات MMC

في الآونة الأخيرة لفت المبدل متعدد المستويات من النوع MMC الانتباه للاستخدام في تطبيقات الجهد المتوسط. يمكن استخدام هذه المبدلات كدارة فعالة في طرف الجهد المتوسط للمحول الذكي بسبب ميزاته مثل البنية المؤلفة من وحدات منفصلة قابلة للاستبدال وإمكانية تطبيقه عند عدة مستويات جهد وذلك بالإضافة أو حتى تحييد عمل بعض الوحدات الأساسية. بالإضافة لذلك يمكن لدارة هذا المبدل أن تولد إشارات جهد وتيار بجودة عالية وكفاءة مرتفعة مع تخفيض حجم المرشحات غير الفعالة. هدف البحث الأساسي هو تنفيذ نموذج لمحول ذكي ذي ثلاث مراحل

يعتمد في عمله على المبدل متعدد المستويات من النوع MMC يعمل بكفاءة تحت شروط التشغيل المختلفة. يبين الشكل (3) مخطط محول ذكي ذي ثلاث مراحل: مرحلة الجهد المتوسط ومرحلة العزل ومرحلة الجهد المنخفض.

في المرحلة الأولى يتم تقويم الجهد المتوسط المتناوب للشبكة بواسطة مبدل قدرة ثلاثي الطور. في مرحلة العزل يتم تحويل الجهد المتوسط المقوم في المرحلة السابقة إلى جهد متوسط بتردد عالٍ



الشكل 3 مخطط تفصيلي لبنية محول ذكي ذي ثلاث مراحل

1kHz عن طريق مبدل قدرة أحادي الطور يتم تطبيقه على أولي محول تردد عالي يقوم بتخفيض الجهد المتوسط إلى جهد منخفض بتردد عالٍ ليقيم مقوم جسري يعتمد على التعديل العرضاني للنبضة بتقويم الجهد عالي التردد. في المرحلة الأخيرة يتم تحويل الجهد المستمر الناتج عن مرحلة العزل لجهد منخفض متناوب بالتردد المطلوب عن طريق مبدل قدرة ثلاثي الطور. يتم وصل طرف الجهد المتوسط والذي يمكن اعتباره دخل المحول مع شبكة توزيع ثلاثية الطور بينما يتم وصل مبدل الجهد المنخفض مع شبكة محلية يمكن أن تعتبر خرج المحول.

في هذا البحث سنستخدم مبدل متعدد المستويات من النوع MMC بخلايا نصف جسرية لمرحلة الدخل وسنقوم بتطبيق استراتيجية التحكم الموجه عن طريق الجهد (Voltage Oriented Control) لتوليد الإشارات المرجعية اللازمة كما سنستخدم تقنية التعديل العرضاني للنبضة ذات الانزياح الطوري لتوليد نبضات قذح ترانزستورات المبدل.

في مرحلة العزل سنستخدم دائرة جسر ثنائي فعال Dual Active Bridge مع مبدل متعدد المستويات أحادي الطور من النوع MMC مكون من خلايا من النوع T-Cell لتوليد جهد بتردد عالٍ 1kHz مقادة بواسطة التعديل العرضاني الهجين. ومبدل جسري يعتمد على التعديل العرضاني للنبضة لتقويم الجهد المنخفض عالي التردد وسنقوم بقيادة هذا المبدل عن طريق متحكم تناسبي رنيني PR controller.

سنستخدم مبدل ثنائي المستويات ثلاثي الطور ذي أربع سيقان لتوليد موجة الجهد المنخفض المتناوب عند خرج المحول وسنستخدم استراتيجية التحكم الموجه عن طريق الجهد (Voltage Oriented Control) لتوليد الإشارات المرجعية وتقنية التعديل الشعاعي الفضائي ثلاثي الأبعاد 3D-SVPWM لقيادة ترانزستورات هذا المبدل.

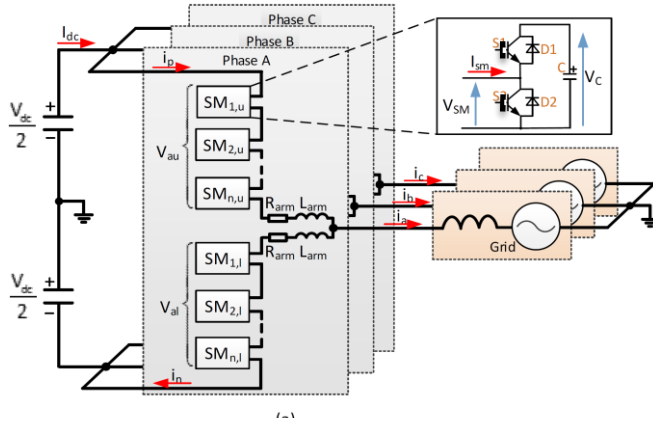
3. 1. مرحلة تقويم الجهد المتوسط:

تعد المبدلات متعددة المستويات من النوع (Modular Multilevel Converter) من الحلول الواعدة للتطبيقات الصناعية عالية الاستطاعة ذات الجهود المرتفعة. في هذه الفقرة سنقوم بشرح بنية المبدل، ومبدأ العمل.

- بنية المبدل متعدد المستويات ثلاثي الطور من النوع MMC:

يبين الشكل (4) البنية العامة للمبدل متعدد المستويات MMC. حيث يشار عادة لطرف التيار المستمر بالمصطلح (DC-link) وهو الطرف الموصول مع البارات الموجبة والسالبة لكل ساق (leg) من المبدل. الأطوار الثلاثة للطرف المتناوب للمبدل موصولة مع النقطة الوسطى لكل ساق (A,B,C) حيث تمثل كل ساق أحد الأطوار الثلاثة. كل ساق تتألف من ذراعين (arm)، يشار عادة للذراع الموصولة مع البار الموجب للطرف المستمر بالذراع العلوية بينما تسمى الذراع الموصولة مع البار السالب بالذراع السفلية. كل ذراع تحوي على عدد من الوحدات الفرعية (Sub-module) وملف (L). ويكون ملف الذراع موصول على التسلسل مع كل مجموعة من الوحدات لتحديد قيمة التيار الناتج عن فرق الجهد الآتي الحاصل بين الذراعين.

• التحكم بمرحلة تقويم الجهد المتوسط:

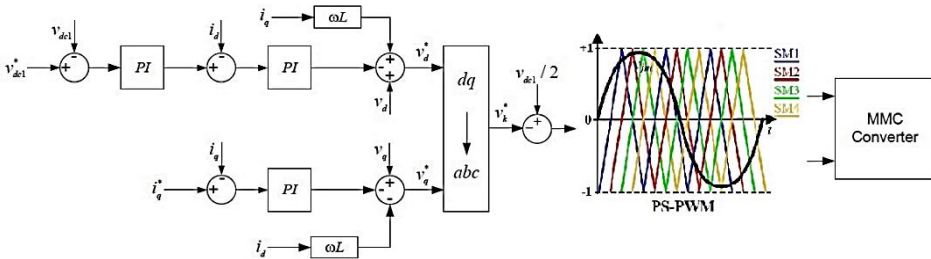


الشكل 4 بنية المبدل متعدد المستويات MMC

قمنا باختيار استراتيجية التحكم الموجه عن طريق الجهد لتوليد الإشارة المرجعية اللازمة لتقنية التعديل حيث قمنا باستخدام حلقة تحديد الطور (Phase-locked loop PLL) للحصول على النبض الخاص لجهد الشبكة وذلك لمزامنة نبضات قرح ترانزستورات المبدل متعدد المستويات من

النوع MMC ثلاثي الطور بحيث تتكون ذراع المبدل من أربع وحدات نصف جسرية، يمكن استخدامه كمقوم للجهد المتوسط بحسب.

يبين الشكل (5) مخطط عام لتقنية التحكم الموجه عن طريق الجهد التي تقوم بتوليد إشارة جهد مرجعية ثلاثية الطور متزامنة مع شبكة الجهد المتوسط وذلك لاستخدام هذه الإشارة مع تقنية



الشكل 5 المخطط العام للتحكم بمرحلة تقويم الجهد المتوسط

التعديل العرضاني للنبضة ذي الانزياح الطوري.

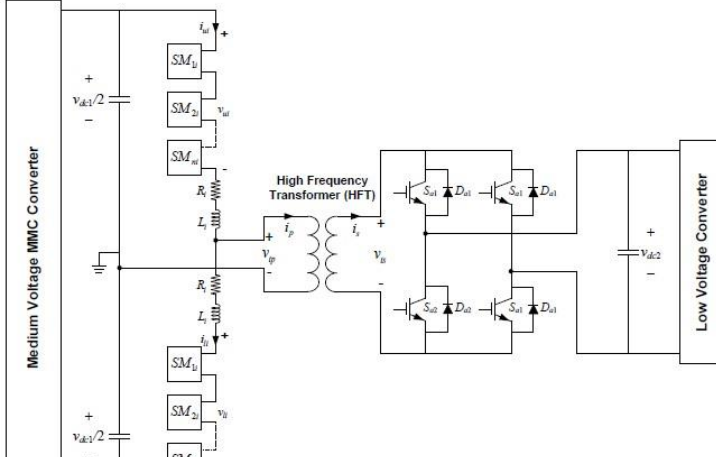
2.3. مرحلة العزل

يتألف نموذج مرحلة العزل المستخدم في هذا البحث من ثلاث أجزاء رئيسية كما يبين الشكل (6) وهي:

(1) مبدل متعدد المستويات أحادي الطور من النوع MMC يقوم بتحويل الجهد المقوم المتوسط الجهد في مرحلة التقويم لموجة جهد ذات تردد عالي بتردد 1kHz يتألف ذراع المبدل من وحدتين من النوع T-Cell

(2) محول تردد عال تمت نمذجته كمحول مثالي موصول على التسلسل مع ممانعة تسريب

(3) مقوم جسر مقداد عن طريق التعديل العرضاني للنبضة يتم التحكم به عن طريق متحكم تناسبي رنيني يقوم بتحويل الجهد المتناوب المنخفض ذي التردد العالي.



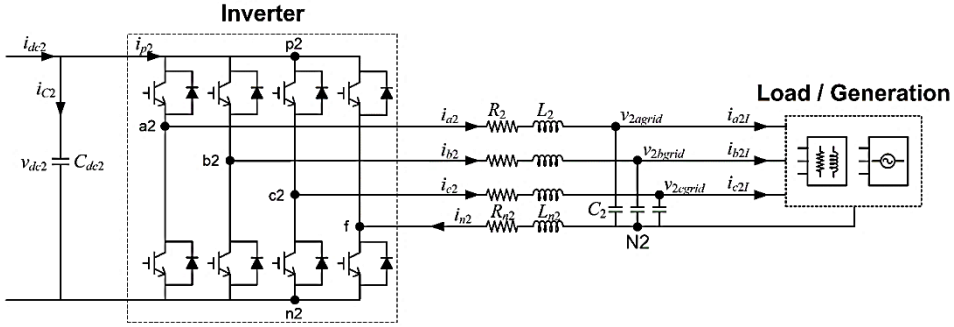
الشكل 6 مرحلة العزل ضمن بنية المحول الذكي

يقوم المحول عالي التردد بالعزل العلفاني بين طرف الجهد المتوسط وطرف الجهد المنخفض ويعتبر استخدام هذا المحول ضمن بنية المحول الذكي السبب الرئيسي في تخفيض الحجم والوزن مقارنة بالمحولات التقليدية لذا لتحقيق هذا الهدف بالشكل الأمثل يجب أن تصمم مبدلات القدرة على طرفي المحول بحيث تكون بحجم صغير قدر الإمكان مع تحقيق أفضل كفاءة وأعلى كثافة طاقة ممكنة.

3.3. مرحلة تعريج الجهد المنخفض:

يعتبر التعامل مع قيم مرتفعة للتيار وتصميم مرشحات التشويه الكهروضويسي من أهم التحديات التي تواجه المصمم عند تصميم المبدل المناسب للمرحلة الثالثة من المحول الذكي. كما أن إحدى المتطلبات الرئيسية لهذا المبدل هي توافر ناقل حيادي حيث من المحتمل أن يتم وصل هذه المرحلة مع أحمال غير خطية وأحمال غير متوازنة الأمر الذي يؤدي إلى نشوء تيارات تعاقب صفري يجب التعامل معها بشكل ملائم من قبل المبدل. لذا من الضروري استخدام مبدل ثلاثي الطور ذو أربع سيقان (ثلاثة سيقان للأطوار الثلاثة مع ساق إضافية للحيادي) وذلك لتأمين تحكم كامل بجهود الأطوار والحصول على جهود ذات نوعية جيدة.

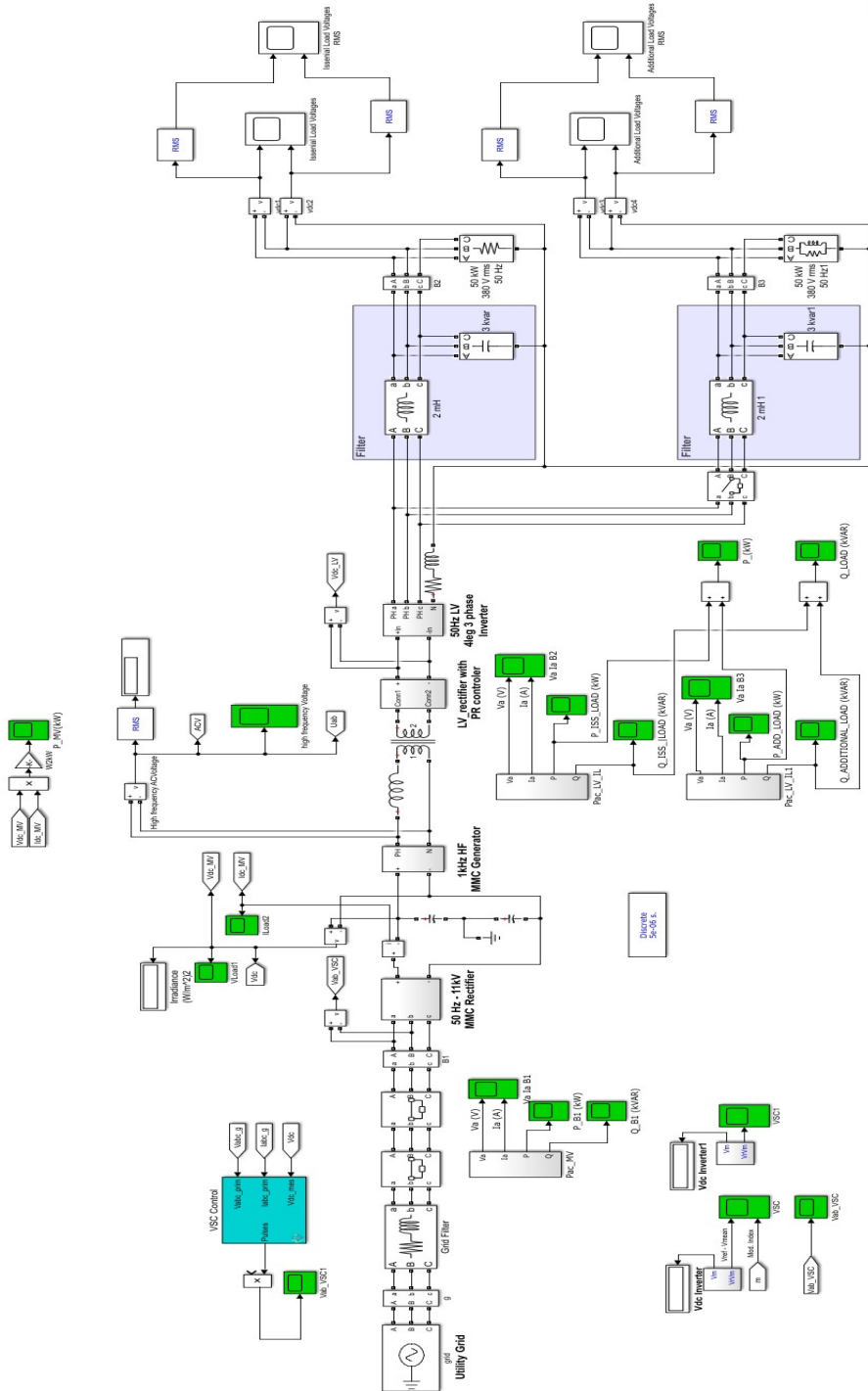
يبين الشكل (7) دارة المبدل ثنائي المستوى ثلاثي الطور ذو أربع سيقان والتي تعتبر خياراً فعالاً للتطبيقات التي تتطلب تحكم دقيق بتيار الحيادي حيث يؤدي إضافة ساق للمبدل إعطاء الدارة قدرة على التحكم بشكل أفضل مقارنة مع المبدلات التقليدية ذات ثلاث سيقان 3 legs [5-6].



الشكل 7 بنية المبدل ثلاثي الطور ذو أربع سيقان ضمن المرحلة الثالثة للمحول الذكي تناولت العديد من الدراسات تقنية 2D SVPWM لقيادة المبدلات ذات منبع الجهد ثلاثية الطور ذات ثلاث سيقان، وقد قامت هذه الدراسات بشرح هذه التقنية بشكل دقيق. إلا أن أهمية تغذية الأحمال غير المتوازنة والأحمال غير الخطية في تطبيقات مثل مرشحات القدرة الفعالة التسلسلية والتفرعية تتطلب تقنية SVPWM مطورة قادرة على التحكم بالتتالي الصفري المرافق لها وجريان التيار في سلك الحيادي. لذلك قمنا في هذا البحث باستخدام تقنية 3D SVPWM للمبدل ذي أربع أسلاك.

يبين الشكل (8) النموذج العام (المستوى الأعلى) للمحول الذكي المستخدم في هذا البحث المؤلف من ثلاث مراحل والذي يعتمد بشكل أساسي على المبدل متعدد المستويات المؤلف من وحدات قابلة للاستبدال من النوع MMC في بيئة Matlab/Simulink.

دور المحولات الذكية في عزل الأحمال عن مشاكل شبكات التوزيع



الشكل 8 النموذج العام للمحول ذي ثلاث مراحل في بيئة Matlab/Simulink

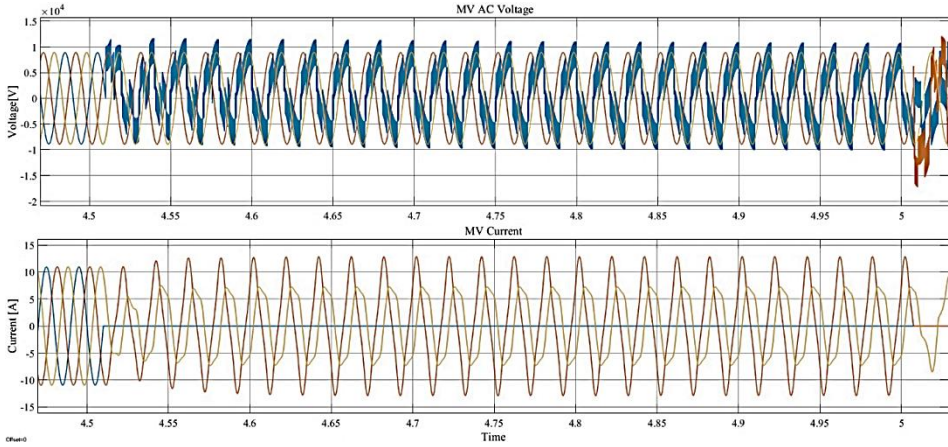
4. نتائج النمذجة

قمنا بصنع نموذج لمحول ذكي بثلاث مراحل في بيئة Matlab/Simulink مع الأخذ بالاعتبار البارامترات الموجودة بالجدول التالي سنقوم بتقييم أداء نموذج المحول الذكي تحت التغيرات الديناميكية التي من الممكن أن تحصل في الشبكة.

البارامتر	القيمة
القيمة الفعالة للجهد بين طورين لشبكة الجهد المتوسط	11kV
مقاومة مرشح الشبكة R1	0.1Ω
محارضة مرشح الشبكة L1	10mH
عدد وحدات ذراع مقوم الجهد المتوسط MMC1	4
اتساعية مكثف الوحدة الفرعية للمبدل MMC1	0.4mF
مقاومة ذراع مقوم الجهد المتوسط MMC1	0.2Ω
ذاتية ملف ذراع مقوم الجهد المتوسط MMC1	5mH
تردد إبدال ترانزستورات مقوم الجهد المتوسط MMC1	10kHz
اتساعية مكثف وصلة التيار المستمر ذات الجهد المتوسط	1mF
مقاومة ذراع مولد الجهد ذو التردد العالي MMC2	0.001Ω
ذاتية ملف مولد الجهد ذو التردد العالي MMC2	0.1mH
تردد إبدال ترانزستورات مولد الجهد ذو التردد العالي MMC2	10kHz
تردد عمل المحول ذي التردد المرتفع	1kHz
مكثف وصلة التيار المستمر ذو الجهد المنخفض	3mF
مقاومة مرشح طرف الجهد المنخفض	0.01Ω
ذاتية ملف مرشح طرف الجهد المنخفض	0.9mH
مكثف مرشح طرف الجهد المنخفض	200μF
مقاومة الحيادي	0.01Ω
ذاتية ملف الحيادي	0.3mH

1.4 : حالة انقطاع أحد أطوار الشبكة

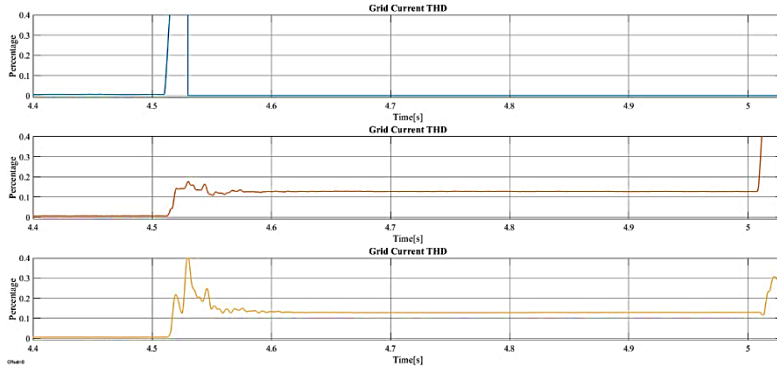
لدراسة هذه الحالة قمنا بقطع أحد أطوار الشبكة في اللحظة 4.5 وبيين الشكل (9) تيارات وجهود الشبكة لحظة انقطاع أحد أطوار الشبكة حيث من الملاحظ انعدام تيار الطور المقطوع واختلال



تياري الطورين الآخرين.

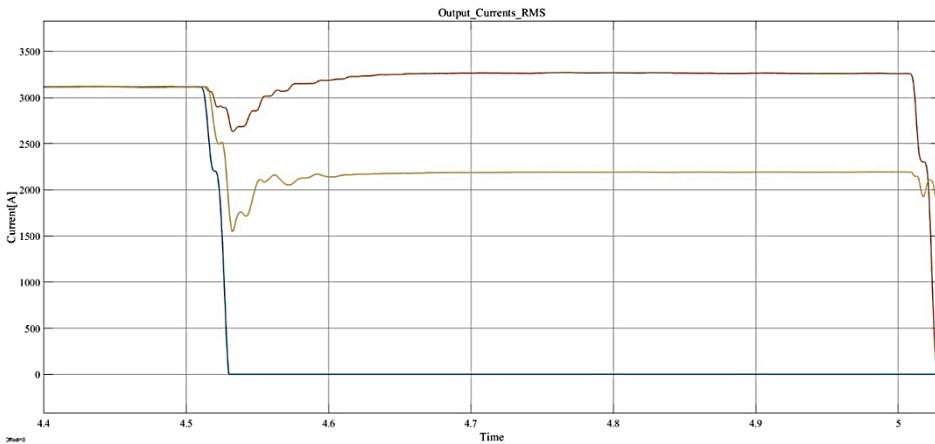
الشكل 9 تيارات وجهود الشبكة لحظة انقطاع أحد أطوار الشبكة

الأمر الذي يظهر بوضوح في الشكل (10) الذي يبين القيم الفعالة لتيارات أطوار الشبكة.



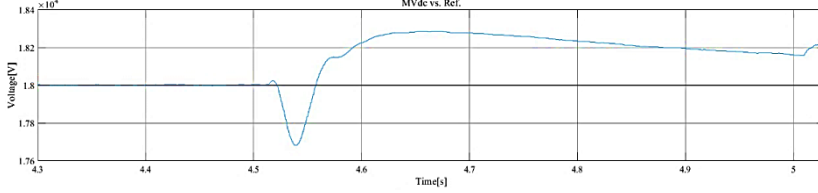
الشكل 10 القيم الفعالة لتيارات الشبكة

يبين الشكل (11) التشوه التوافقي لتيارات أطوار الشبكة حيث ترتفع نسبة التوافقيات لنسبة تفوق 10% بعد انقطاع الطور.



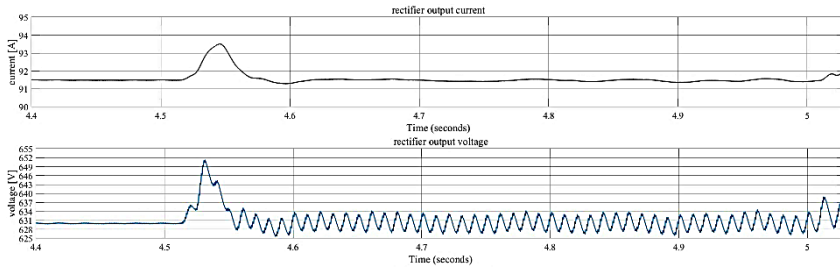
الشكل 11 التشوه التوافقي لتيارات أطوار الشبكة

يبين الشكل (12) جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المتوسط بعد انقطاع أحد أطوار الشبكة الذي أدى لابتعاد الجهد عن النقطة الهدف إلا أن الملاحظ أن استراتيجية التحكم تعمل على إرجاع الجهد للنقطة الهدف.



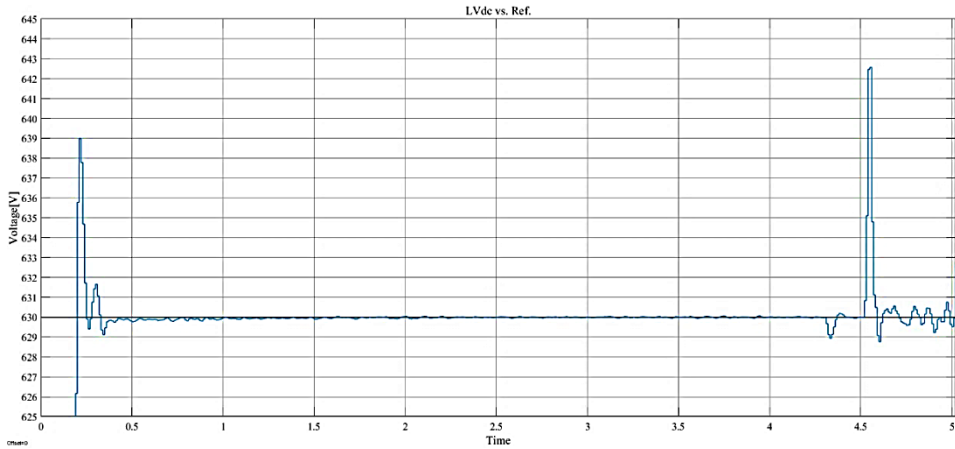
الشكل 12 جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المتوسط بعد انقطاع أحد أطوار الشبكة

يبين الشكل (13) جهد وتيار وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض حيث من الواضح زيادة تذبذب جهد الوصلة عند انقطاع أحد أطوار الشبكة بمقدار 6 V وبنسبة أقل من 1% من جهد الوصلة.



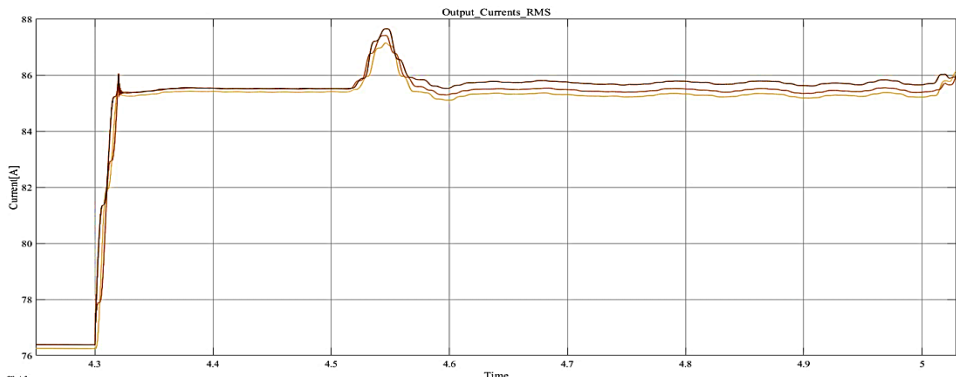
الشكل 13 جهد وتيار وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض

يبين الشكل (14) ملاحقة جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض لنقطة الهدف حيث من الملاحظ اضطراب هذا الجهد بحوالي 15V إلا أن تقنية التحكم المستخدمة أعادت الجهد لنقطة الهدف خلال فترة 0.1s



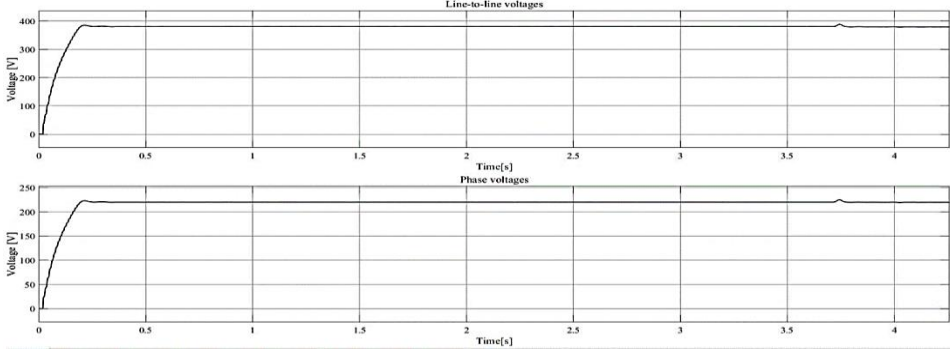
الشكل 14 ملاحقة جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض لنقطة الهدف

يبين الشكل (15) القيم الفعالة للجهد بين طورين والجهد الطوري للحمل حيث من الواضح حدوث اضطراب صغير ولفترة محدودة عند انقطاع أحد أطوار الشبكة



الشكل 15 القيم الفعالة للجهد بين طورين والجهد الطوري للحمل

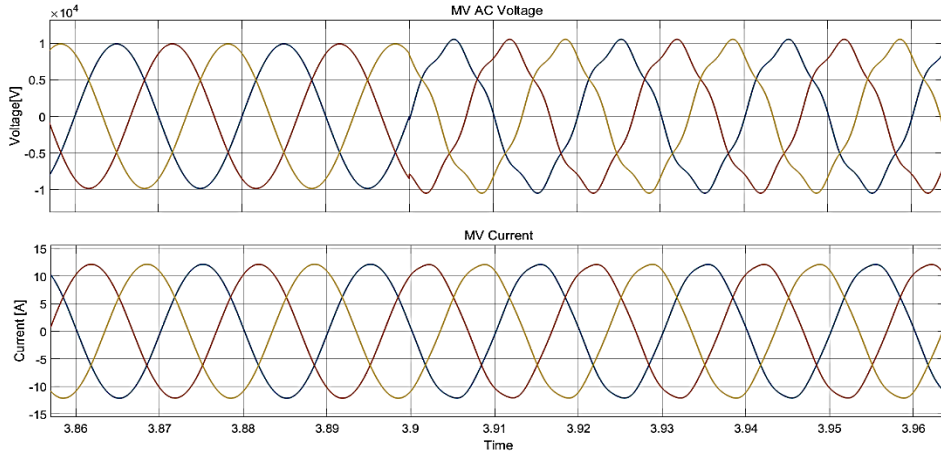
يبين الشكل (16) القيم الفعالة لتيارات أطوار الحمل حيث من الملاحظ اختلال التوازن بنسبة طفيفة بعد لحظة انقطاع أحد أطوار الشبكة بالرغم من توازن الأطوار قبل الانقطاع.



الشكل 16 القيم الفعالة لتيارات أطوار الحمل

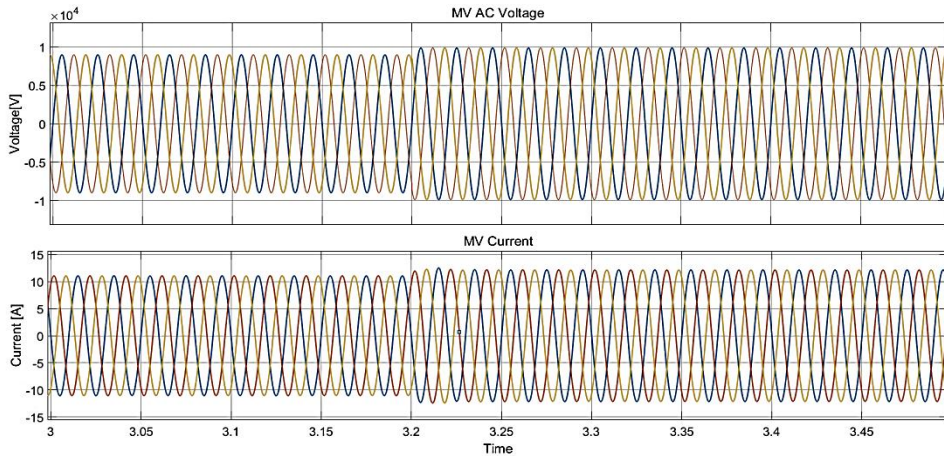
2.4 حالة الارتفاع المفاجئ لجهد الشبكة مع ظهور توافقيات

لدراسة هذه الحالة قمنا بالتنسب بارتفاع مفاجئ لجهد الشبكة في اللحظة 3.2 ثانية بنسبة 10% ويبين الشكل (17) تيارات وجهود الشبكة لحظة ارتفاع الجهد حيث من الملاحظ انعدام تيار الطور المقطوع واختلال تباري الطورين الآخرين.



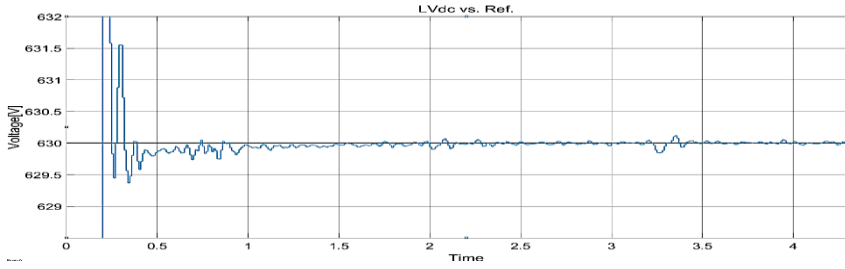
الشكل 17 جهود وتيارات الشبكة لحظة الارتفاع المفاجئ للجهود

قمنا بحقن توافقيات في جهد الشبكة عند اللحظة 3.9 ثانية كما يبين الشكل (18).

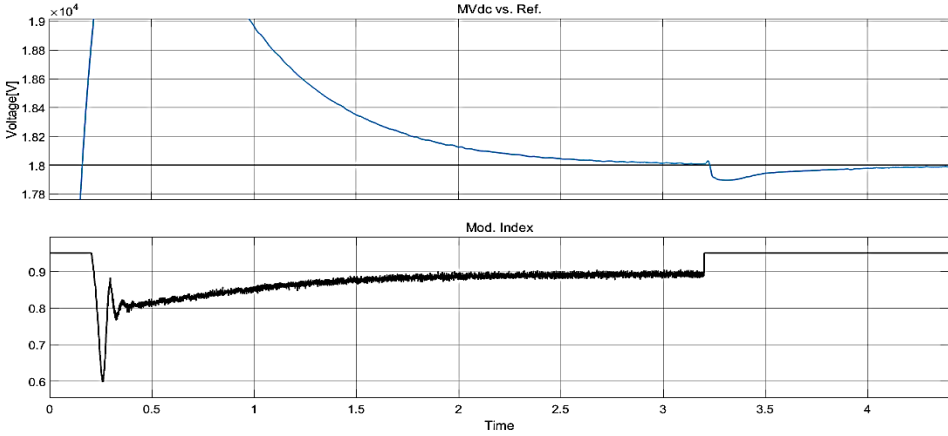


الشكل 18 جهود وتيارات الشبكة لحظة حقن التوافقيات في موجة جهد الشبكة

يبين الشكل (19) جهد وصلة التيار المستمر DC-Link ذات الجهد العالي حيث من الملاحظ ابتعاد الجهد عن نقطة الهدف بحوالي 100 فولط فقط أي حوالي 0.5% ولمدة لا تتجاوز 0.2 ثانية قامت بعدها خوارزمية التحكم المرفقة بإعادة جهد الوصلة بشكل تدريجي بدون أي تأثير يذكر لحقن التوافقيات عند اللحظة 3.9 ثانية.



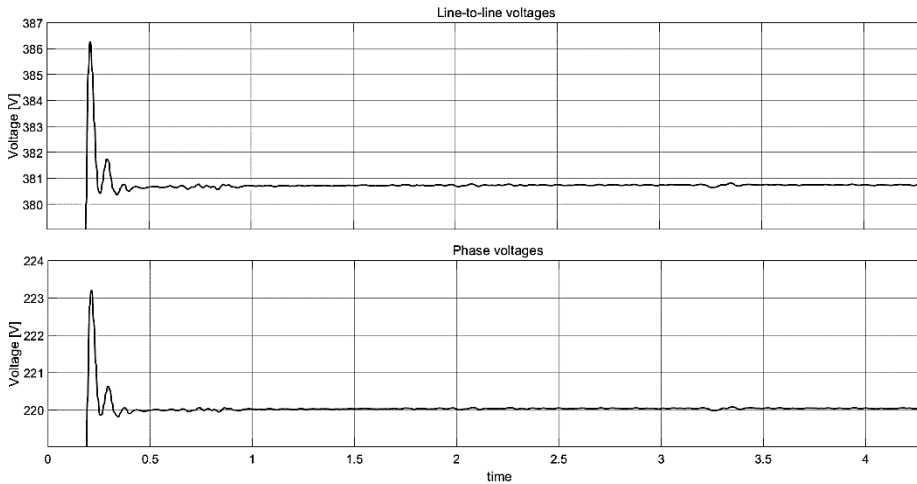
الشكل 19 جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد العالي مع تغيرات دليل تعديل المبدل من النوع MMC



الشكل 20 جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض

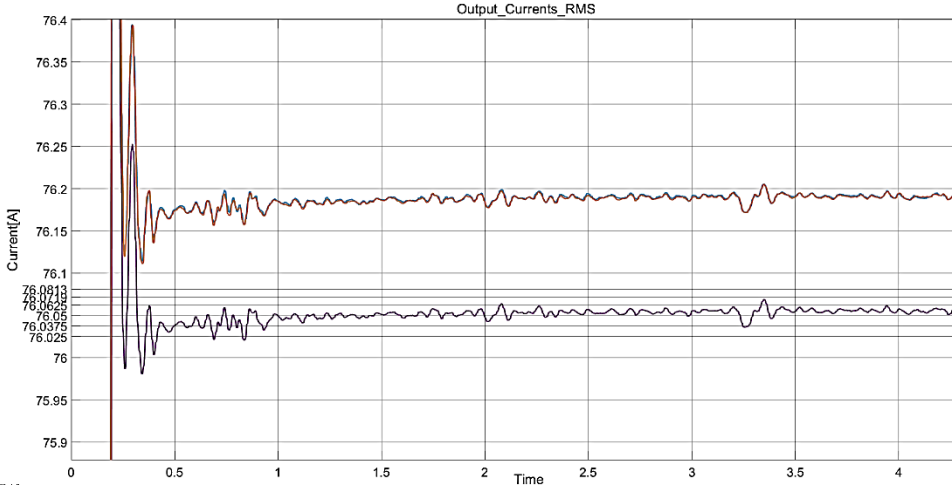
يبين الشكل (20) جهد وصلة التيار المستمر DC-Link ذات الجهد المنخفض حيث من الملاحظ أن الارتفاع المفاجئ لجهد الشبكة عند اللحظة 3.2 ثانية لم سبب ابتعاد الجهد عن نقطة الهدف بحوالي 0.3 فولت فقط أي بما لا يتجاوز 0.05% ولمدة لا تتجاوز 0.2 ثانية قامت بعدها خوارزمية التحكم المرفقة بإعادة جهد الوصلة بشكل تدريجي بدون أي تأثير يذكر لحقن التوافقيات عند اللحظة 3.9 ثانية.

يبين الشكل (21) القيم الفعالة للجهد بين طورين والجهد الطوري للحمل حيث من الواضح نجاح المحول الذكي بعزل الحمل عن الإضرابات الحاصلة على طرف الجهد العالي سواء الارتفاع المفاجئ للجهد عند اللحظة 3.2 ثانية أو حقن التوافقيات عند اللحظة 3.9 ثانية.



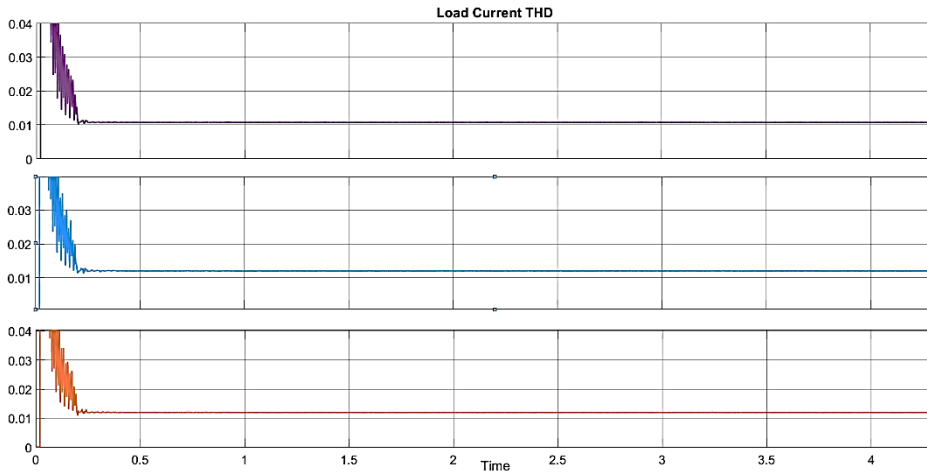
الشكل 21 القيم الفعالة للجهد بين طورين والجهد الطوري للحمل

يبين الشكل (22) القيم الفعالة لتيارات أطوار الحمل حيث من الملاحظ عدم تأثر تيار الحمل



باطرابات الشبكة.

الشكل 22 القيم الفعالة لتيار الحمل



الشكل 23 التشوه التوافقي لتيار الحمل

يبين الشكل (23) التشوه التوافقي لتيارات أطوار الحمل حيث لم تتجاوز نسبة التوافقيات 1.1% خلال طيلة فترة النمذجة بغض النظر عن اضطرابات الشبكة.

3.4 مناقشة النتائج

1. بالنظر للحالة المدروسة يمكن للمحول الذكي عزل الأعطال والاضطرابات الحاصلة في طرف الشبكة من الانتقال لطرف الحمل بالتالي تأمين استمرارية عمل الأحمال الهامة عند حدوث حالة طارئة في شبكة التوزيع ولو لفترة كافية لاتخاذ الإجراء اللازم لتحديد العطل وتأمين استمرار تغذية الحمل.
2. نلاحظ أن المحول الذكي حافظ بشكل مقبول على جهود وصلتي التيار المستمر وأبدى استجابة سريعة لأي تغير يحدث وعمل بسرعة على إعادة جهدي الوصلتين للقيم المرغوبة الأمر الذي يجعله حل فعال لمكاملة مرافق التخزين ومنابع الطاقات المتجددة عند وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض ويعطي امكانية لاستعمال وصلة التيار المستمر ذات الجهد المتوسط في تطبيقات نقل التيار المستمر ذو الجهد العالي.
3. أدى انقطاع أحد أطوار الشبكة لارتفاع جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المتوسط لفترة طويلة نسبياً، إلا أن الاضطراب المرافق الذي حصل في طرف الجهد المنخفض كان شبه آني واستمر لفترة قصيرة (حوالي 0.1s)، بينما أدى الارتفاع المفاجئ لجهد الشبكة لاضطراب محدود في جهد وصلة التيار المستمر لم يتجاوز 0.5% من نقطة الهدف ولفترة لم تتجاوز 0.2 ثانية بالتالي استطاع المحول الذكي في كلا الحالتين بالاستمرار بتغذية الحمل.

المراجع

- [1] Saniya Khan, Khaliqur Rahman, Mohd Tariq, Salman Hameed, Basem Alamri. Solid-State Transformers: Fundamentals, Topologies, Applications, and Future Challenges. *Mdpi/Sustainability* 2021, 14, 319
- [2] Brooks, J.L. Solid state transformer concept development. In *Naval Material Command; Civil Eng. Lab., Naval Construction Battalion Center: Port Hueneme, CA, USA*, 1980.
- [3] McMurray, W. Multipurpose power converter circuits. U.S. Patent 3 487 289, 30 December 1969.
- [4] McMurray, W. The thyristor electronic transformer: A power converter using a high-frequency link. *IEEE Trans. Ind. Gen. Appl.* 1971, IGA-7, 451–457. [CrossRef]
- [5] McMurray, W. Fast response stepped-wave switching power converter circuit. U.S. Patent 3 581 212, 25 May 1971.
- [6] Chen, H.; Prasai, A.; Divan, D. Dyna-C: A Minimal Topology for Bidirectional Solid-State Transformers. *IEEE Trans. Power Electron.* 2017, 32, 995–1005. [CrossRef]
- [7] Masoum, A.S.; Hashemnia, N.; Abu-Siada, A.; Masoum, M.A.S.; Islam, S.M. Online Transformer Internal Fault Detection Based on Instantaneous Voltage and Current Measurements Considering Impact of Harmonics. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2017, 32, 587–598. [CrossRef]
- [8] Sabahi, M.; Hosseini, S.H.; Sharifian, M.B.; Goharrizi, A.Y.; Gharehpetian, G.B. Bi-directional power electronic transformer with maximum power-point tracking capability for induction heating applications. *IET Power Electron.* 2010, 3, 724–731. [CrossRef]
- [9] Chen, H.; Divan, D. Soft-switching solid state transformer (S4T). *IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE)* 2017, 33, 2933–2947.
- [10] Liu, Y.; Liu, Y.; Ge, B.; Abu-Rub, H. Interactive grid interfacing system by matrix-converter based solid state transformer with model predictive control. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2017, 16, 2533–2541. [CrossRef]

- [11] Sun, X.; Wang, H.; Qi, L.; Liu, F. Research on Single-Stage High-Frequency-Link SST Topology and Its Optimization Control. *IEEE Trans. Power Electron.* 2020, 35, 8701–8711. [CrossRef]
- [12] Sabahi, M.; Hosseini, S.H.; Sharifian, M.B.; Goharrizi, A.Y.; Gharehpetian, G.B. Zero-voltage switching bi-directional power electronic transformer. *IET Power Electron.* 2010, 3, 818–828. [CrossRef]
- [13] Mostafa, M.A.; Abdou, A.F.; El-Gawad, A.F.A.; El-kholy, E.E. Comparison of multi-carrier and SHE-PWM for a nine levels cascaded H bridge inverter. In *Proceedings of the 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, Egypt, 19–21 December 2017; pp. 1483–1491.
- [14] Falcones, S.; Mao, X.; Ayyanar, R. Topology comparison for Solid State Transformer implementation. In *Proceedings of the IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA, 25–29 July 2010*; pp. 1–8.
- [15] Qin, H.; Kimball, J.W. A comparative efficiency study of silicon-based solid state transformers. In *Proceedings of the 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, USA, 12–16 September 2010*; pp. 1458–1463.
- [16] Zhang, J.; Wang, Z.; Shao, S. A three-phase modular multilevel DC–DC converter for power electronic transformer applications. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2017, 5, 140–150. [CrossRef]
- [17] Zhang, C.; Wang, H.; Peng, J.; Yu, J. Control of Three-Stage AC-AC Solid State Transformer for Power Exchange Between Grids. In *Proceedings of the 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Macao, China, 1–4 December 2019; pp. 1–5. [CrossRef]
- [18] Abu-Siada, A.; Budiri, J.; Abdou, A.F. Solid State Transformers Topologies, Controllers, and Applications: State-of-the-Art Literature Review. *Electronics* 2018, 7, 298. [CrossRef]
- [19] Zhang, J.; Liu, J.; Zhong, S.; Yang, J.; Zhao, N.; Zheng, T.Q. A Power Electronic Traction Transformer Configuration with Low-Voltage IGBTs for Onboard Traction Application. *IEEE Trans. Power Electron.* 2019, 34, 8453–8467. [CrossRef]

- [20] Pacheco, J.D.O.; Honório, D.D.A.; Oliveira, D.D.S. An AC–DC Isolated MMC-Based Structure Suitable for MV SST Traction Applications. *IEEE Access* 2019, 7, 106395–106406. [CrossRef]
- [21] Frutos, P.; Briz, F.; Sánchez, A.; Guerrero, J.M. Quad-Active-Bridge as the basic cell of a MMC Based SST for DER and DESS Integration. In *Proceedings of the 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vancouver, BC, Canada, 12–14 June 2019; pp. 2349–2355. [CrossRef]
- [22] Madhusoodhanan, S.; Tripathi, A.; Mainali, K.; Patel, D.; Kadavelugu, A.; Bhattacharya, S. Distributed Energy Storage Device integration with three phase distribution grid using a Transformerless Intelligent Power Substation. In *Proceedings of the 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Charlotte, NC, USA, 15–19 March 2015; pp. 670–677.
- [23] Tudorache, T.; Marinescu, A.; Dumbrava, I. On-road Charging System Demonstrator for EVs. In *Proceedings of the 2019 Electric Vehicles International Conference (EV)*, Bucharest, Romania, 3–4 October 2019; pp. 1–4. [CrossRef]
- [24] Verma, N.; Singh, N.; Yadav, S.; Gupta, S. Reactive Power Compensation of Solid State Transformer for WECS. In *Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech)*, Kolkata, India, 4–5 May 2018; pp. 1–6. [CrossRef]
- [25] She, X.; Huang, A.Q.; Wang, F.; Burgos, R. Wind Energy System with Integrated Functions of Active Power Transfer, Reactive Power Compensation, and Voltage Conversion. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013, 60, 4512–4524. [CrossRef]
- [26] Gorla, N.B.Y.; Kolluri, S.; Chauhan, P.J.; Panda, S.K. A fault tolerant control approach for a three-stage cascaded multi-level solid state transformer. In *Proceedings of the 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Stanford, CA, USA, 9–12 July 2017; pp. 1–6. [CrossRef]

- [27] Maharjan, M.; Tamrakar, U.; Bajagain, S.; Hansen, T.M.; Tonkoski, R. A steady-state equivalent model of solid state transformers for voltage regulation studies. In Proceedings of the 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, USA, 16–20 July 2017; pp. 1–5. [CrossRef]
- [28] Liu, X.; Liu, Y.; Liu, J.; Zhang, X. Coordinating voltage regulation for an AC–DC hybrid distribution network with multiple SSTs. *J. Eng.* 2019, 2019, 1368–1372. [CrossRef]
- [29] Zhao, H.; Yang, B. A Novel Conception for HVDC Transmission Capacity Expansion and Its Control Strategy. In Proceedings of the 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Shenzhen, China, 4–7 November 2018; pp. 1–6. [CrossRef]
- [30] Kimura, N.; Morizane, T.; Iyoda, I.; Nakao, K.; Yokoyama, T. Application of Solid-State Transformer for HVDC Transmission from Offshore Windfarm. In Proceedings of the 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris, France, 14–17 October 2018; pp. 902–907. [CrossRef]
- [31]

أتمتة عمل المنظومة الكهربائية السورية، وفق التقنيات الحديثة، بناءً على خوارزميات توقُّع مؤشرات الشبكة

*د. وحيد قسطون

ملخص

البحث هو استكمال لعمل سابق يهدف إلى استخدام خوارزمية مطوّرة مكوّنة من ثلاث خوارزميات جزئية مرتبطة مع بعضها بهدف تطوير آليات تشغيل وحماية، وصيانة المنظومات الكهربائية، عن طريق توقُّع مؤشرات الشبكة لفترة زمنية مستقبلية قادمة محدودة، عن طريق حلّ مسألة سريان الاستطاعة الأمثل OPF، لقيم الحمل الكهربائي المتنبأ بها، وهذا التحديد يفرضه تغيير قيمة الحمل بين فترات النهار والليل في اليوم الواحد، واختلاف طبيعة العمل في اليوم بين يوم عطلة، ويوم دوام في الأسبوع الواحد، وحتىّ التغيرات المناخية خلال الفترات الأكثر من ذلك، ووُجد عالمياً أنّ الأنسب أن يكون هذا التوقُّع لعدّة ساعات قادمة فقط خلال اليوم، وعلى الأكثر ليوم واحد أي 24 ساعة.

تمّ الاستفادة من هذا البحث لدراسة تطوير المنظومة الكهربائية السورية الأساسية، أي 230KV، و400KV، عن طريق توقُّع قيم الجهود والاستطاعات عند العقد والاستطاعات السارية في الخطوط، والمفاقيد، وكذلك التّحميل الأمثل لمحطّات توليد الطّاقة العاملة في المنظومة على أساس الكلفة الأدنى لإجمالي كلفة، وكميّة الوقود المستهلك فيها.

تمّ قبل دراسة المنظومة الكهربائية السورية، استخدام البرنامج الحاسوبي المعدّ في البحث، لدراسة الأنظمة المعيارية العالمية IEEE 118-Bus & IEEE 57-Bus ومقارنة النتائج مع نتائج دراسات مماثلة تمّ إجراؤها باستخدام برامج كهربائية عالمية معروفة مثل MATPOWER V5، وكانت النتائج على درجة عالية من الدقّة، والباحث جاهز لإثبات دقّته، وأهمّيته، عند استخدامه.

كلمات مفتاحية: أتمتة عمل نظام القدرة الكهربائي - توقُّع مؤشرات الشبكة .

Automation of the Syrian Electrical System Operation, according to modern smart technics, based on Network Parameters Prediction Algorithms.

*Dr. Wahid Kastoun

Abstract

This research is a completion to a previous effort aimed to use a developed algorithm consisted of three partial algorithms joined for improving mechanisms of operating ,protecting ,and getting maintenance of electrical systems, by electrical network parameters prediction for a limited period ,by solving optimal power flow problem OPF ,for forecasted electrical load ,this limitation is imposed by load value between day ,and night in one day ,and differences between holyday ,and work day ,in one week ,even climate changes during longer periods ,and found that several hours a day ,as a maximum one day (24 hours) ,are proper for this prediction.

This research has been utilized to study of basic Syrian electrical power system ,means 230KV ,400KV ,by forecasting of values of voltages ,and powers ,at nodes ,powers flow in lines ,and losses ,by the same time the optimal loading for electrical power stations ,according to the minimum cost ,and quantity ,of fuel consumed in them. Before studying of Syrian electrical power system ,the program prepared in the research ,was used to study ,and resolve the global standard systems of IEEE 118-Bus & IEEE 57-Bus and comparing of the results to the results of similar studies had been carried out by using known global electrical programs like MATPOWER V5 ,and others.

The results showed high accuracy of the program ,and the researcher is ready to prove accuracy ,and importance ,of the program ,when it will be used.

Keywords: Automation of operation of electrical power system, electrical network parameters forecasting.

1- مقدمة:

إنّ توفُّع قيم مؤشّرات المنظومة الكهربائيّة لفترة زمنيّة قصيرة قادمة، يتيح إعطاء فكرة فنيّة واقتصاديّة عن المنظومة الكهربائيّة المدروسة، ممّا يفسح المجال لاتخاذ التدابير والاحتياطات اللازمة للحصول على توفير اقتصادي هام عن طريق إيقاف وحدات التوليد التي لا نحتاج لتشغيلها، وبالتالي توفير كلفة الوقود المصروف، فيها وإطالة عمرها الفني، وتخفيض تكاليف الصيانة لها، وأيضاً تتيح لنا الفكرة الفنيّة الحصول على توفير اقتصادي، عن طريق تخفيض فاقد الاستطاعة الفعلية في المنظومة عن طريق ضبط قيم التوتّر ولاسيما المنخفضة منها عند العقد عن طريق مثلاً زيادة تهييج المولدات التوافقية، أو تغيير وضعيات معدّلات التحكم بالجهد للمحولات التي تكون مزوّدة بتلك الميّزة، والتي تدعى محولات التنظيم Regulation Transformers.

يعرض المرجع الأجنبي [1] تطويراً لطريقة تقليدية لحل مسألة OPF في المنظومات الكهربائيّة، هي طريقة النقطة الداخلية Interior Point التي تقدّم حلولاً جيدة للمسائل التي تحتوي على مجموعة من المعادلات اللا خطيّة Nonlinear Programming، حيث اقترح الباحث طريقة، يجري فيها خلال العملية التكرارية، دمج لاتجاهين هما القياس القريب Affine-Scaling، والمركزية Centralization، وقد أدّى هذا الدمج لزيادة موثوقية وسرعة الخوارزميّة، وتمّ تطبيق الخوارزمية المقترحة على النظام المعياري IEEE 118_bus، ولوحظ انخفاض عدد التكرارات اللازمة للوصول إلى الحل الأمثل من 19 إلى 14 عن الخوارزمية الأصليّة التي لا تتبّع هذا الدمج.

يدرس المرجع الأجنبي [2] حل مسألة سريان الاستطاعة الأمثل Optimal Power Flow (OPF) في المنظومات الكهربائيّة، عبر مقارنة بين طريقة تقليدية، وطريقة خوارزمية مستعمرة النحل Bee Colony Algorithm (BA)، وهي إحدى التقنيات الذكية Smart Techniques الحديثة لحل مسألة OPF، ودُعيت BA-OPF وطريقة ثالثة تمزج بين BA، والشبكات العصبيّة الصنّاعيّة، وتمّ تسميتها في البحث BA-ANNs، ولاحظ الباحث

أن أدقّ وأفضل النتائج قدمتها الطريقة BA-OPF، من حيث قيم الجهود عند العقد، ومفايد الاستطاعة الفعلية، والكلفة الكلية للتوليد.

يقدم المرجع الأجنبي [3] تقنية فعّالة للتوزيع الأمثل للاستطاعة في الشبكات الكهربائية، قائمة على أساس الخوارزمية الجينية Genetic Algorithm، بالتزامن مع حلّ مسألة الإرسالية الاقتصادية Economic Dispatch، بالاعتماد على ثلاثة مؤشرات مؤثرة: هي قيمة الجهد، وثبات أو استقرار الجهد، ومفايد النقل، وتمّ تطبيق الدراسة على النظام المعياري IEEE 30_bus، حيث تراوحت قيم الجهود عند العقد بين 0.95-1.05 وكانت قيم مفايد الشبكة، والكلفة الكلية للتوليد أقلّ ما يمكن.

في البحث تمّ حلّ مسألة سريان الاستطاعة بطريقة نيوتن-رافسون Newton-Raphson، مع تحقيق (إرضاء) القيود الفنية لجميع عناصر المنظومة المدروسة، وأضاف البحث شيئاً جديداً ومبتكراً يتمثل بإضافة خوارزمية جزئية للتنبؤ بالأحمال الكهربائية للمنظومة المدروسة بطريقة ذكية وهي الشبكات العصبونية الصناعية ذات الانتشار العكسي Back Propagation Artificial Neural Networks (BPANNs) وخوارزمية جزئية ثانية بطريقة تقليدية لإيجاد التوزيع الأمثل للحمل الكهربائي للمنظومة على وحدات التوليد العاملة في المنظومة وهي طريقة نيوتن، وبالنسبة للتطبيق العملي للبحث، فسبق الحديث في الملخص عن أهمية الحل التنبؤي لأخذ فكرة مسبقة دقيقة عن القيم الفنية، والاقتصادية، للمنظومة الكهربائية المدروسة لفترة قصيرة قادمة، ونرجو أن يتم استثمار البحث في المستقبل القريب لتطبيقه على المنظومة الكهربائية السورية لدعمها، وتطويرها، في إطار إعادة الإعمار.

2- هدف البحث:

يهدف البحث إلى إعداد برنامج حاسوبي مبني على خوارزمية حاسوبية مطوّرة لإيجاد الحل التنبؤي للمنظومات الكهربائية، بمعنى حساب المؤشرات الفنية والاقتصادية الأمثل للمنظومة المدروسة، تُؤسّس هذه الخوارزمية على الشبكات العصبونية عكسية الانتشار من أجل التنبؤ الآتي بالأحمال الكهربائية، ثمّ حلّ المنظومة الكهربائية أي إيجاد المؤشرات الفنية والاقتصادية الأمثل على أساس هذه القيم المتنبأ بها للحمل، واستخدام هذا البرنامج لدراسة المنظومة الكهربائية السورية الأساسية في إطار المساهمة في إعادة الإعمار وتطوير هذه المنظومة،

ومقارنة النتائج الحاصلة مع نتائج دراسات أخرى للمنظومة السُورِيَّة باستخدام برامج عالميَّة معروفة، تمَّ إطلاعنا عليها من قبل مهندسين في وزارة الكهرباء السُورِيَّة، والمؤسَّسة العامَّة لتوليد وتوزيع الكهرباء.

3- مواد وطريقة البحث:

تمَّ تقسيم الخوارزمية المطوَّرة في البحث إلى ثلاثة خوارزميات جزئية هي أولاً الخوارزمية المتعلِّقة بالشبكة العصبونيَّة المعدَّة للتنبؤ الآني بالأحمال الكهربائيَّة مع إمكانيَّة التحكم بدقة الشبكة من خلال التحكم بمعاملات خطيَّة تابع الانتقال بين الطبقتين المخفيَّتين ومعامل تدريب الشبكة، وثانياً خوارزمية إيجاد سريان الاستطاعة في المنظومة المدروسة بطريقة نيوتن-رافسون، وثالثاً خوارزمية الخرج الاقتصادي الأمثل لوحدات التوليد الحراريَّة لتغذية الحمل الكهربائي للمنظومة بما يوافق الكلفة الأدنى لإجمالي الوقود المصروف في هذه الوحدات الحراريَّة باستخدام طريقة نيوتن.

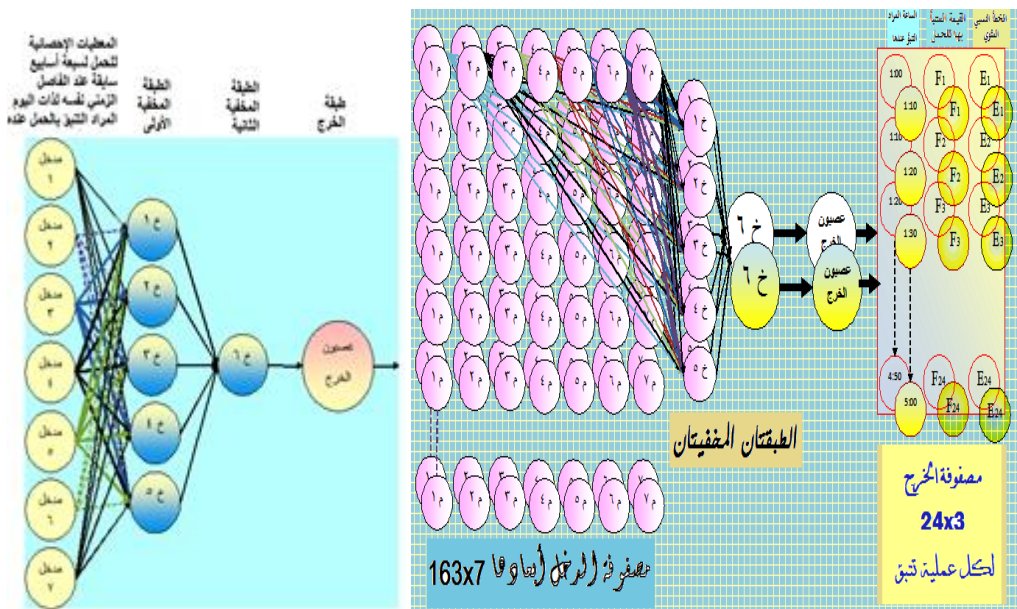
1. خوارزمية الشبكة العصبونيَّة المعدَّة للتنبؤ الآني بالأحمال الكهربائيَّة:

تمَّ إعداد بنية مناسبة لشبكة عصبونيَّة مكوَّنة من أربع طبقات، طبقة دخل تتألَّف من سبعة عصبونات، حيث تمَّ ترتيب القيم لكل يوم على شكل مصفوفة رياضيَّة أبعادها (163X7)، الأعمدة تمثِّل سبعة معطيات إحصائيَّة سابقة متتاليَّة زمنياً لليوم المراد التنبؤ الآني له (معطيات الحمل لذات اليوم لسبعة أسابيع سابقة مباشرة)، أما الصفوف ويكون عددها 163 هي الساعات من 00:00 حتى 23:00 لليوم المراد إجراء عملية التنبؤ الآني فيه بالإضافة إلى ثلاث ساعات من اليوم اللاحق وسبب ذلك هو حاجتنا لعدة ساعات من اليوم التالي في حال اراد المستثمر التنبؤ اعتباراً من الساعة 23:00 مثلاً، بالطبع الساعات السابقة مقسمة بفواصل زمنيَّة مقدارها عشرة دقائق $163=1+27 \times 6$ ، حيث العدد 1 هنا هو ساعة البداية، وتم ترتيب المصفوفات على شكل ملفات mat لتحميلها في برنامج الماتلاب، وطبقتين مخفيَّتين تتألَّف الأولى من خمسة عصبونات والثانيَّة من عصبون وحيد، وطبقة خرج مؤلفة من عصبون وحيد يعطي خرجاً هو عبارة عن مصفوفة أبعادها (24x3) حيث تمثِّل الأسطر الساعات الأربعة المراد بالتنبؤ بالحمل الكهربائي السوري عندها مقسمة بفواصل زمنيَّة مقدارها عشرة دقائق والأعمدة، يمثِّل العمود

أتمتة عمل المنظومة الكهربائية السُّورِيَّة، وفق التَّقْنِيَّات الحديثة، بناءً على خوارزميات توفِّع مؤشرات الشبِّكة

الأول قيم الساعات أو الفواصل الزمنية المراد التنبؤ بالحمل عندها، ويمثل العمود الثاني القيم المتنبأ بها للحمل عند كل ساعة (فاصل زمني) من الساعات المراد التنبؤ بالحمل الكهربائي عندها، والثالث الخطأ النسبي المئوي الموافق لعملية التنبؤ.

تمّ تدريب الشبكة بناءً على معطيات إحصائية تقريبية لحمل المنظومة الكهربائية السُّورِيَّة، وتمّ استخدام هذه القيم كمدخل للشبكة العصبونية المعدّة، يبيّن الشكل (1) بنية الشبكة العصبونية المعدّة للتنبؤ الآتي بالأحمال الكهربائية لقد تمّ التوصل إلى هذه البنية بعد العديد من المحاولات والتجارب حيث لا توجد معايير أو قوانين أو علاقات رياضية تساعد على اختيار البنية المناسبة للشبكة العصبونية باستثناء المبدأ الرياضي القديم المعروف المحاولة والخطأ Trial and Error، وتختلف بنية الشبكة العصبونية باختلاف المسألة المراد حلّها، ومن أجل تدريب الشبكة العصبونية تمّ أيضاً بالتجريب اختيار خوارزمية الانتشار العكسي Back Propagation التي أظهرت فعالية عالية لحل هذا النوع من المسائل، كما تمّ اختيار التابع الأسّي Sigmoid، لأنّ خرجه يقع في المجال [0,1] بما يلائم معطيات المسألة المدروسة



2. خوارزمية حل مسألة سريان الاستطاعة في المنظومة:

وهي خوارزمية نيوتن-رافسون وتتضمن الخطوات التالية:

(1) تحديد عقدة مرجعية للمنظومة الكهربائية المدروسة وإعطاؤها الرقم 1 وإنشاء عداد لعقد المنظومة وفرض قيم أولية لطويلة الجهد وزاويته على كل قضبان الحمل ولزاوية الجهد على جميع قضبان التوليد والتحكم بالجهد.

(2) حساب الاستطاعات الفعلية والردية عند عقد (قضبان) الحمل من المعادلات التالية:

$$P_i^{(k)} = |V_i^{(k)}| \left| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j^{(k)}| \cos((\theta_i^{(k)} - \theta_j^{(k)} - \delta_{ij}) \right) \quad (1)$$

$$Q_i^{(k)} = |V_i^{(k)}| \left| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j^{(k)}| \sin(\theta_i^{(k)} - \theta_j^{(k)} - \delta_{ij}) \right| \quad (2)$$

$$\text{حيث } V_i = |V_i| \angle \theta_i, Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \delta_{ij}$$

وحساب الفروق

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{\text{sch}} - Q_i^{(k)} \quad (3)$$

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{\text{sch}} - P_i^{(k)} \quad (4)$$

أما لقضبان التوليد أو التحكم بالجهد نلزمنا فقط العلاقات (1) و (4)

(3) حساب عناصر المصفوفة الجاكوبية Jacobian Matrix لسريان الاستطاعة التقليدية J

وهي معروفة لا داعي لذكرها، وحل المعادلة المصفوفية التالية:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

(4) حساب القيم الجديدة لطويلات الجهود وزواياها وفق العلاقات التالية:

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}|$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\max} &= P_i^{(k+1)} - P_i^{(k)} \leq \varepsilon 1 \\ \Delta Q_{\max} &= Q_i^{(k+1)} - Q_i^{(k)} \leq \varepsilon 2 \end{aligned} \right\} \text{مراقبة الشرط التالي:} \quad (5)$$

في حال تحقُّق الشرط ننتقل إلى الخطوة اللاحقة في خوارزمية سريان الاستطاعة الأمثل وإن لم يتحقَّق نعود للبند رقم 2 ويتم حساب القيم الجديدة للاستطاعات الفعلية والردِّيَّة باستخدام القيم الجديدة لطويلة وزاوية الجهود.

(6) حساب الاستطاعة عند العقدة المرجعية $S_1 = P_1 + jQ_1$ والجهود كطويلة وزاوية والاستطاعات الفعلية والردِّيَّة عند العقد والمفاقد الكلية الفعلية والردِّيَّة للمنظومة.

3. خوارزمية الخرج الاقتصادي الأمثل لوحدات التوليد الحرارية:

(1) تحديد الحمل الكلي في المنظومة الذي يساوي حاصل جمع الحمل الممتبأ به بواسطة البرنامج الجزئي الممثل للشبكة العصبية المعدَّة للتنبؤ الآني مع إمكانية التحكم بمعاملاتها من أجل زيادة دقَّتْها، والمجموع الكلي لمفاقد الاستطاعة الفعلية في المنظومة مطروحاً من المجموع الحمل الذي يتم تغذيته من الوحدات الهيدروليكية:

$$P_{Load} = (P_{Forecasted} + P_{Losses}) - P_{Hydraulic}$$

وإنشاء عداد لوحدات التوليد الحرارية.

(2) فرض قيمة ابتدائية لـ λ عامل الإرسالية الاقتصادية $\lambda^{(1)}$

(3) حساب الاستطاعات المرسله من وحدات التوليد الحرارية من العلاقة

$$P_i^{(1)} = \frac{\lambda^{(1)} - \beta_i}{2\gamma_i}$$

واعتبار هذا الحل تقريباً أولاً

(4) حساب الفرق التالي:

$$\Delta P^{(k)} = P_{Load} - \sum_{i=1}^n P_i^{(k)}$$

حيث n عدد وحدات التوليد الحرارية، فإذا كان هذا الفرق أصغر أو يساوي قيمة صغيرة معيَّنة (تسامحاً) يكون الحل انتهى وإلا نذهب للخطوة الخامسة.

(5) نحسب الخطأ في قيمة عامل الإرسالية الاقتصادية من العلاقة

$$\Delta\lambda^{(k)} = \frac{\Delta P^{(k)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\gamma_i}}$$

(6) ثم نحسب القيمة المصححة للامبدا من المعادلة التالية:

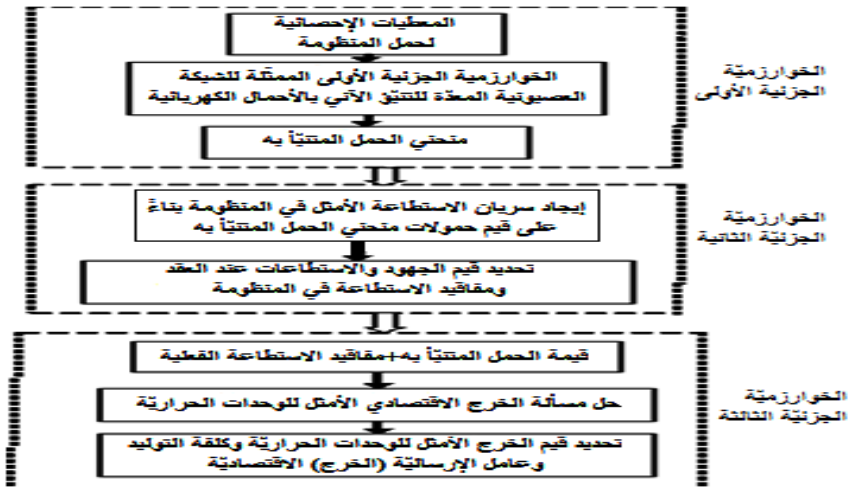
$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \Delta\lambda^{(k)}$$

(7) ثم نعيد الخطوات من الخطوة الثانية وصولاً إلى تحقق الشرط في الخطوة الثالثة.

يتم عن طريق حل هذه المعادلات تحديد الخرج الاقتصادي لوحدات التوليد الحرارية، ثم تتم المقارنة بين كل خرج والحدود الدنيا والعظمى المسموحة لهذه الوحدة ففي حال كان الخرج الناتج أصغر من الحد الأدنى يتم تثبيته عند الحد الأدنى، أما إذا كان هذا الخرج أكبر من الحد الأعظمي المسموح يتم تثبيته عند الحد الأعظمي، ثم إعادة إجراء الحل الاقتصادي للوحدات الواقعة ضمن الحدود المسموحة وهكذا، كذلك يجب أن يكون خرج كل محطة توليد مساوياً إلى قيمة الاستطاعة الخارجة من العقدة المربوطة إليها المحطة.

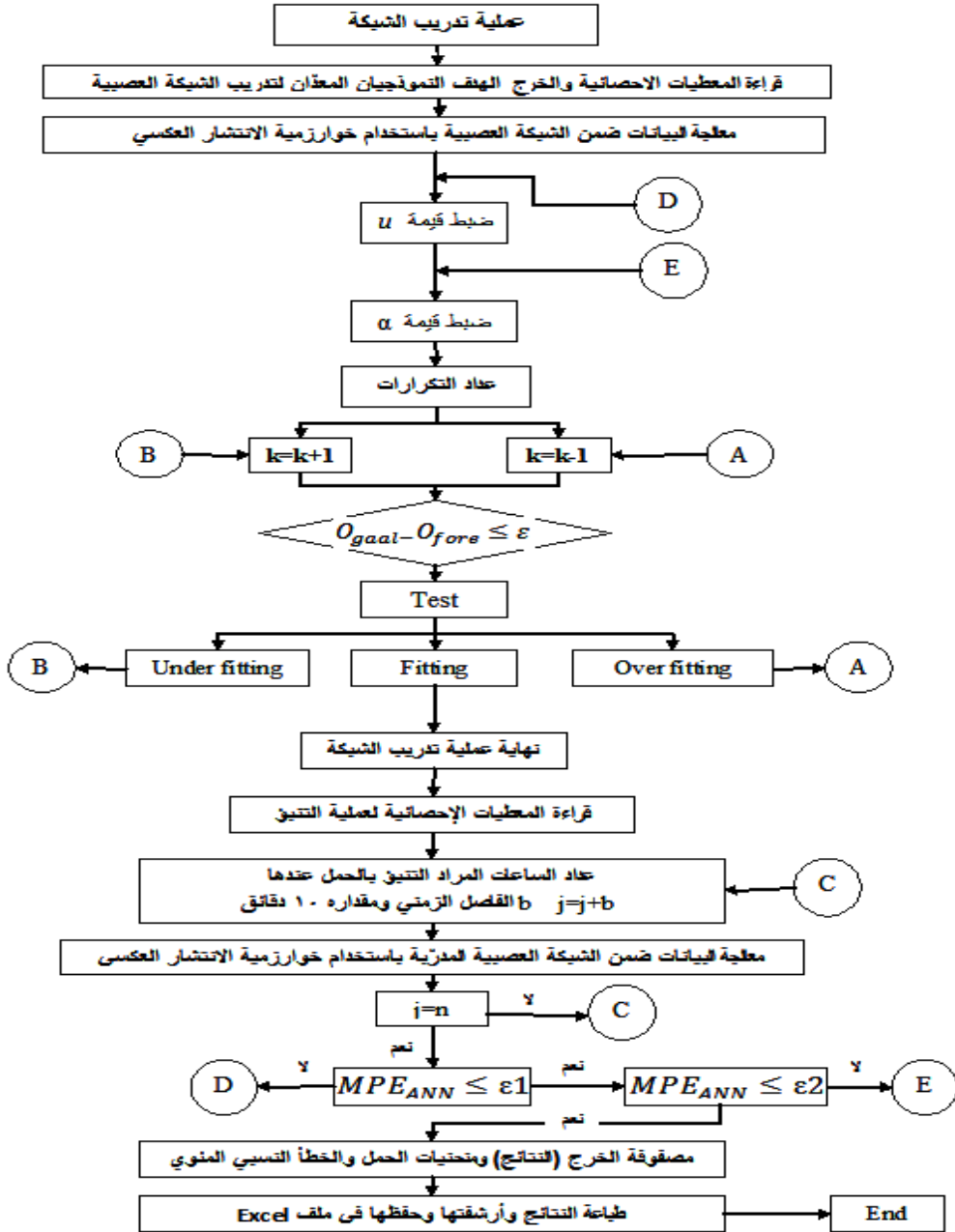
تبيّن الأشكال (2) و (3) و (4) و (5) المخطط النهجي للخوارزمية المركبة المعدة لإيجاد

الحل التنبؤي لمنظومات القدرة الكهربائية.

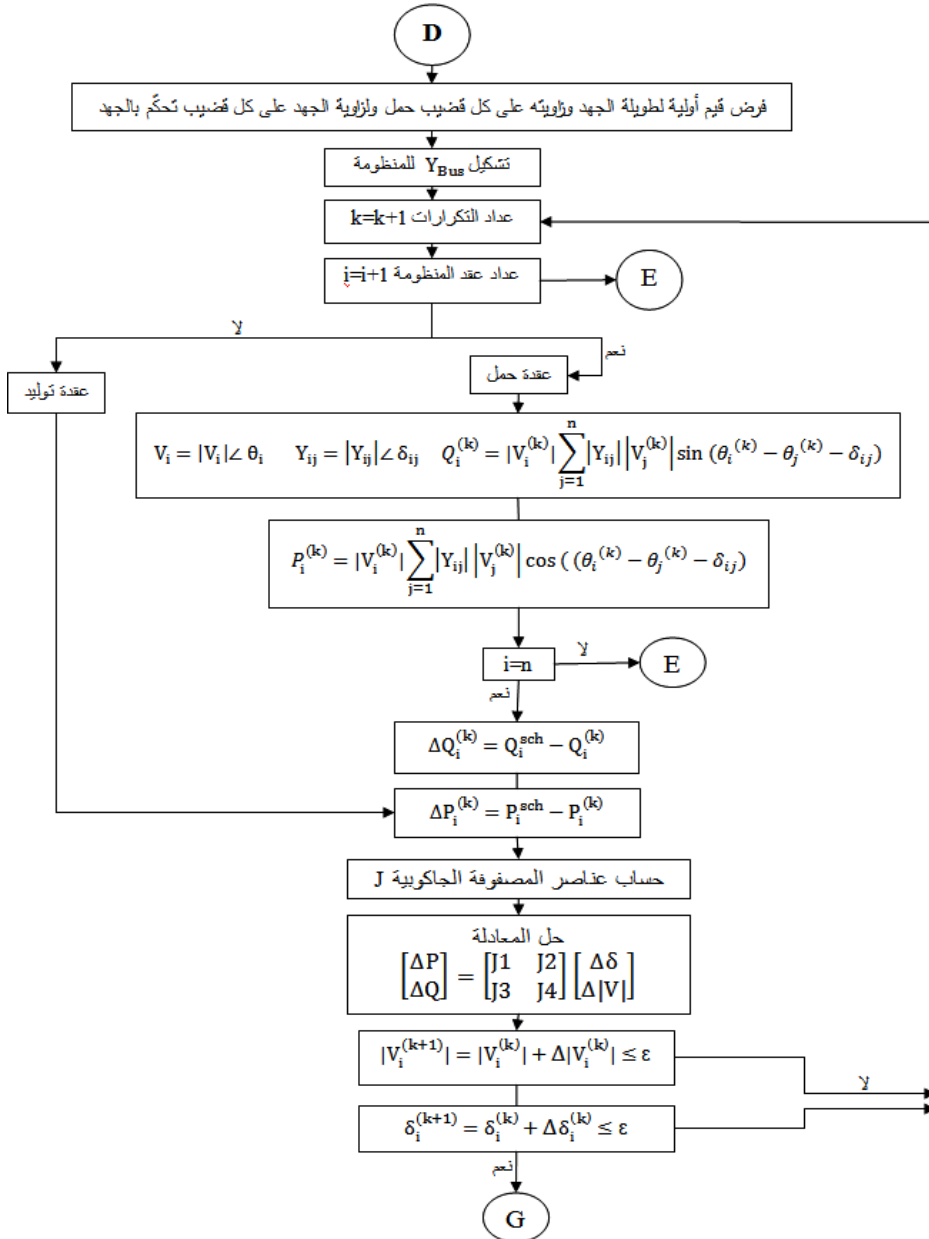


الشكل (2) المخطط الصندوقي العام للخوارزمية الكليّة المعدة في البحث

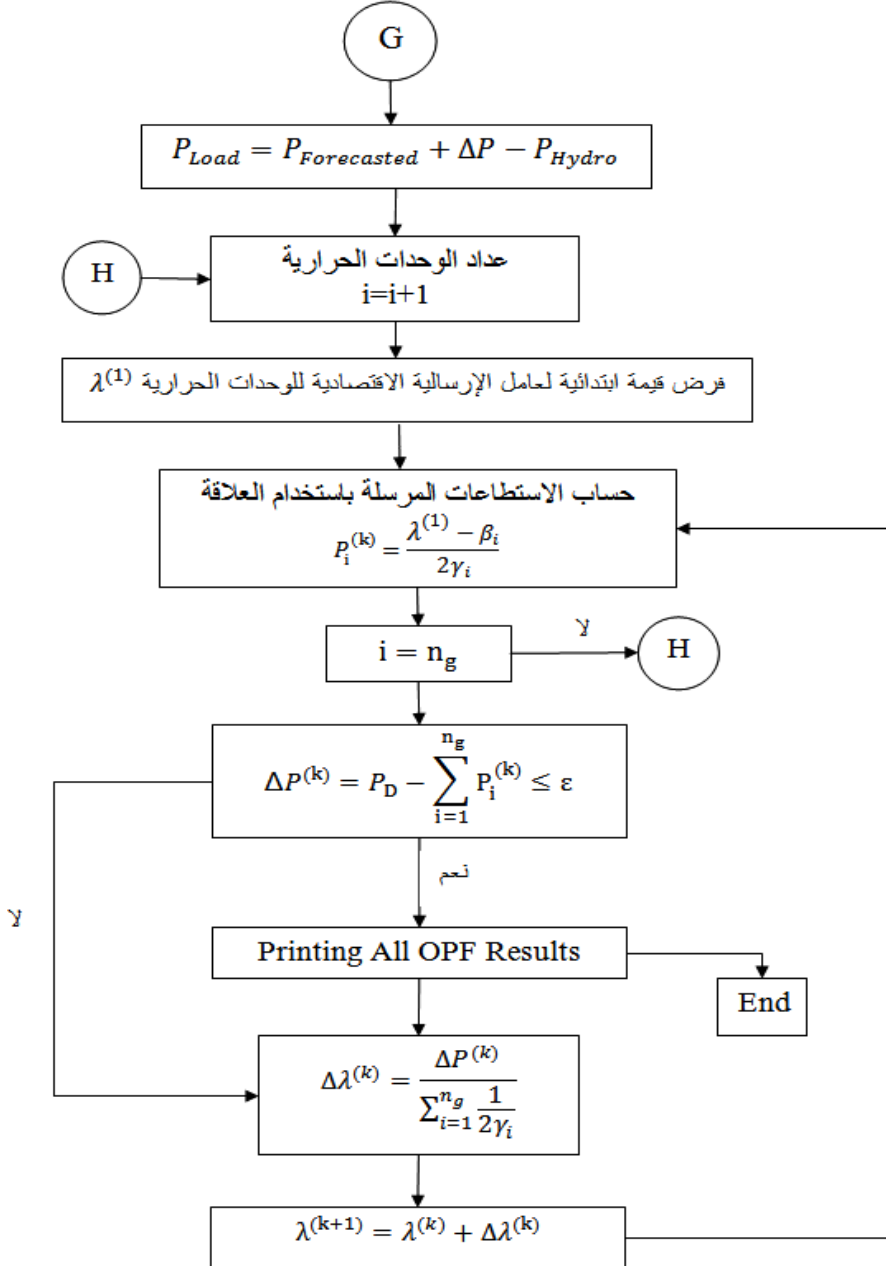
أتمتة عمل المنظومة الكهربائية السُورِيَّة، وفق التَّقْنِيَّات الحديثة، بناءً على خوارزميات توفُّع مؤشِّرات الشبِّكة



الشكل (3) المخطط الصندوقي لخوارزمية تدريب وعمل الشبكة العصبونية المعدة (الخوارزمية الجزئية الأولى)



الشكل (4) المخطط الصندوقي للخوارزمية الجزئية الثانية لحل مسألة سريان الاستطاعة التقليدية في المنظومة



الشكل (5) المخطط الصندوقي للخوارزمية الجزئية الثالثة لحل مسألة الإرسالية الاقتصادية الأمثل لوحدات التوليد الحرارية

4- تطبيقات البحث:

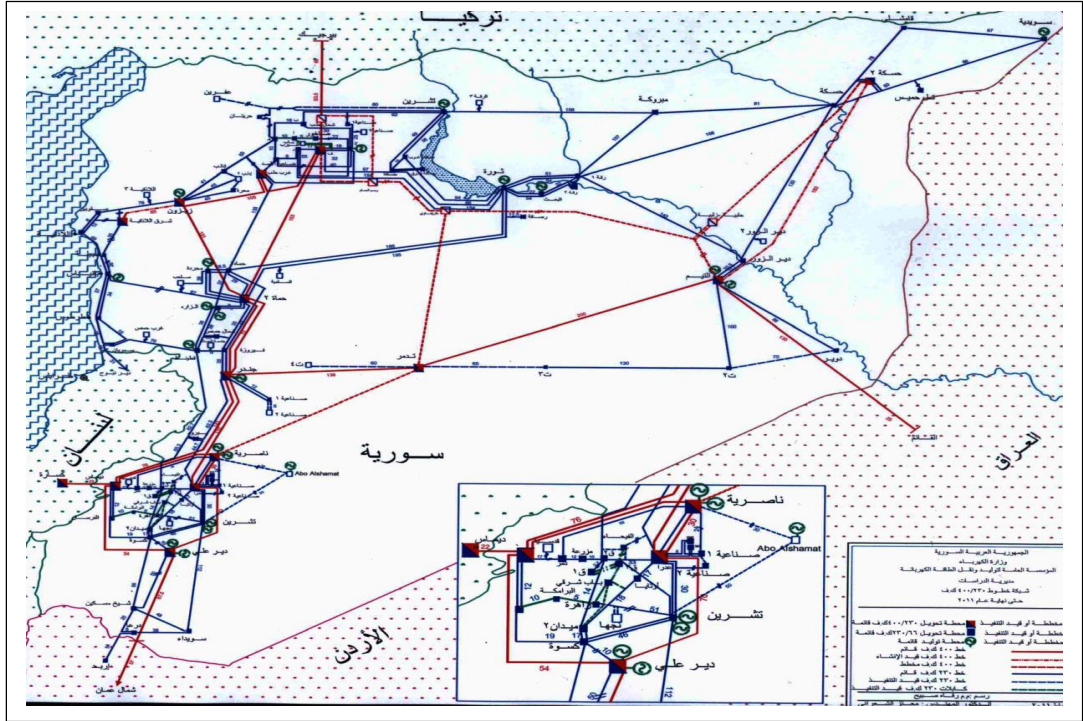
- تم تمثيل الخوارزمية المركبة السابقة ببرنامج حاسوبي في بيئة الماتلاب:
1. يستقبل ملفات من النوع mat وهو ملف يستخدم في بيئة الماتلاب تحتوي على المعطيات الإحصائية لحمل المنظومة المدروسة، ومعطيات العقد والخطوط
 2. يعرض هذا البرنامج منحنيات الحملات الحقيقية والمتبأ بها وأيضاً منحني الخطأ النسبي المثوي للقيم المتبأ بها، ومخطط يمثّل التوزيع الأمثل لحمل المنظومة مضاف له المفاهيم باعتبارها جزء هام لا يمكن إغفاله من الحمل على وحدات التوليد الحرارية العاملة في المنظومة، كما تقوم بنسخ جميع النتائج إلى ملف Excel في ثلاث صفحات في حال رغب المستخدم بنسخ النتائج وحفظها
 3. تتميز هذه البرامج بدرجة عالية من الدقة وسهولة الاستخدام من قبل المستثمر وسهولة إدخال وتغيير معطيات الدخل

5- نتائج الدراسة

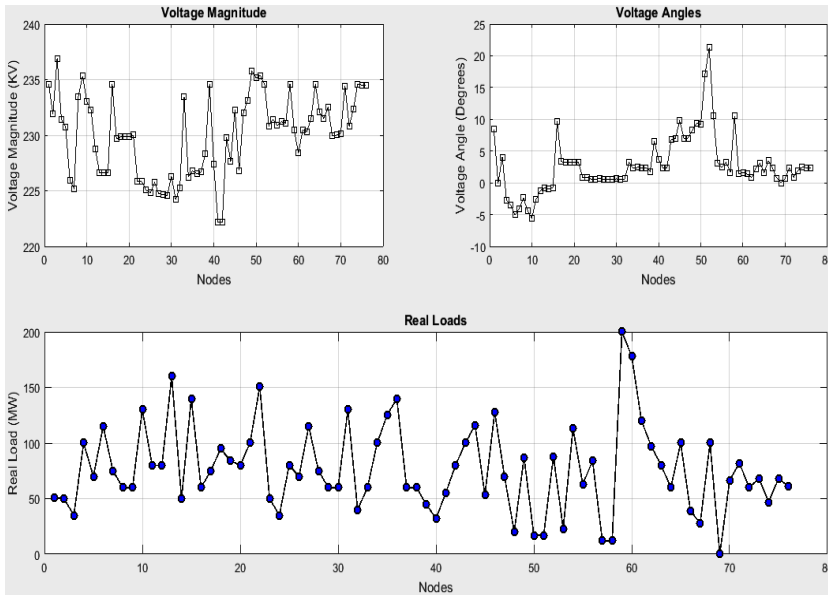
تم استخدام البرنامج المعدّ لدراسة المنظومة الكهربائية السورية الأساسية، أي ذات التوتّر العالي 230 ك.ف و العالي جداً 400 ك.ف، وهذه الدراسة هي الأهم بالنسبة لنا من بين الحالات التي تمّ دراستها في البحث، بسبب رغبتنا في تطوير أداء المنظومة الكهربائية الوطنية، والارتقاء بجودة الطّاقة الكهربائيّة المعدّة للاستهلاك الصّناعي، أو السّكني، اقتصادياً وفتنياً، في إطار إعادة الإعمار التي تشهدها بلادنا في الآونة الأخيرة.

ومن أجل إجراء هذه الدراسة بالدقّة المنشودة، تمّ إعداد المخطّط الحسّابي للشبّكة الكهربائيّة الأساسيّة، ذات التوتّر العالي 230 ك.ف، و العالي جداً 400 ك.ف، في الجمهورية العربية السورية حسب المعطيات الواقعية المتوفرة لدى وزارة الكهرباء لعام 2010، حيث كانت هذه المنظومة في ذروة عطائها، قبل تعرّضها لاحقاً للأعطال. وبسبب ضخامة نتائج البحث، والجدول الكثيرة، التي تحتاج لعشرات الصّفحات، ولاسبيل لإيرادها كاملةً هنا، سيتمّ الاكتفاء ببعض الأشكال، والمنحنيات البيانيّة، والجدول، المعبرة عن حالات معيّنة تتعلّق بقيمة حمل المنظومة، والتّوقيت الموافق لهذا الحمل.

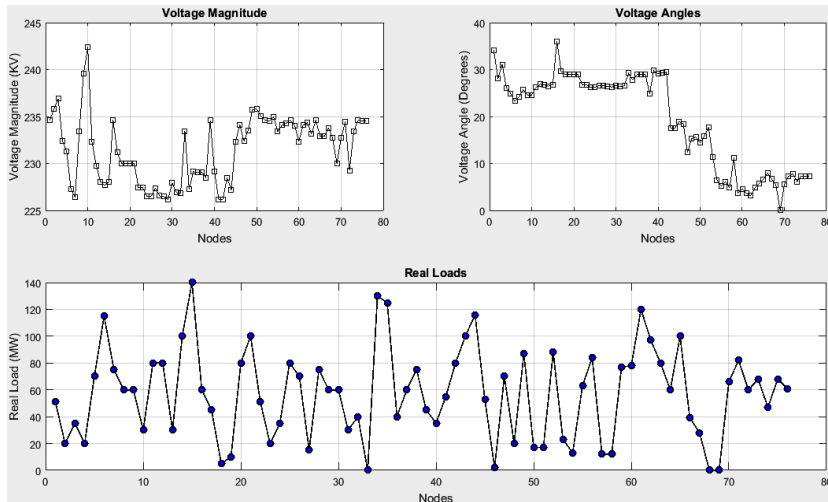
أتمتة عمل المنظومة الكهربائية السُورِيَّة، وفق التَّقْنِيَّات الحديثة، بناءً على خوارزمِيَّات توفُّع
مؤشرات الشبْكة



الشكل (6) خارطة الشبكة الكهربائية السورية الأساسية لعام 2010

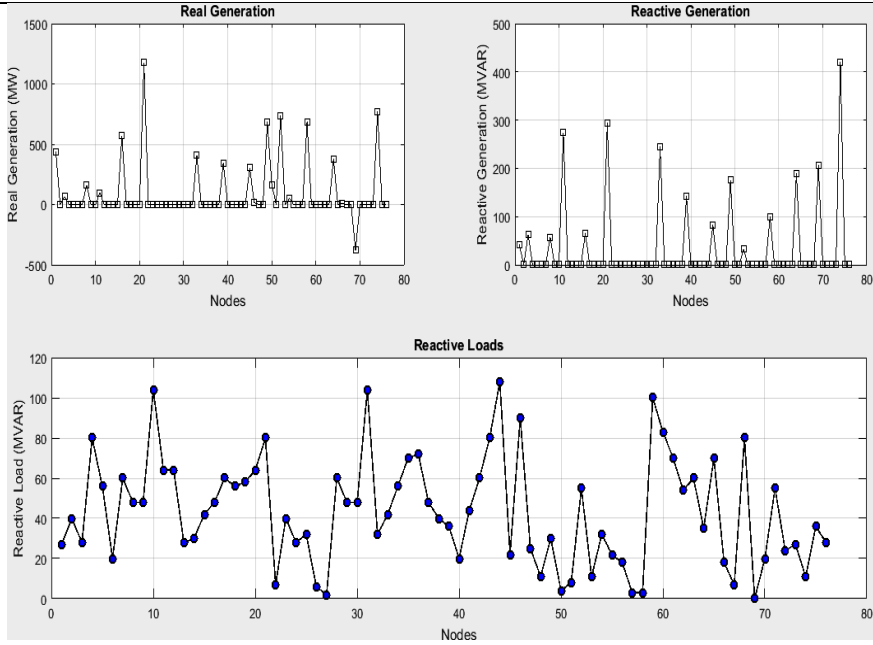


الشكل (7) منحنيات طويلة وزاوية الجهد والحمل الفعلي من أجل الحمل 6975 MW عند
عقد المنظومة السورية ذات التوتر 230 KV

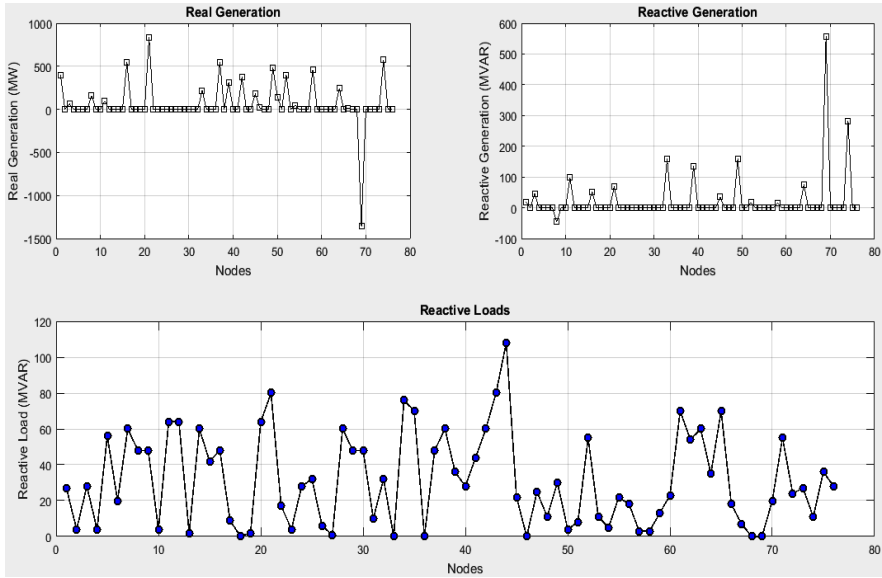


الشكل (8) منحنيات طويلة وزاوية الجهد والحمل الفعلي من أجل الحمل 5000 MW عند
عقد المنظومة السورية ذات التوتر 230 KV

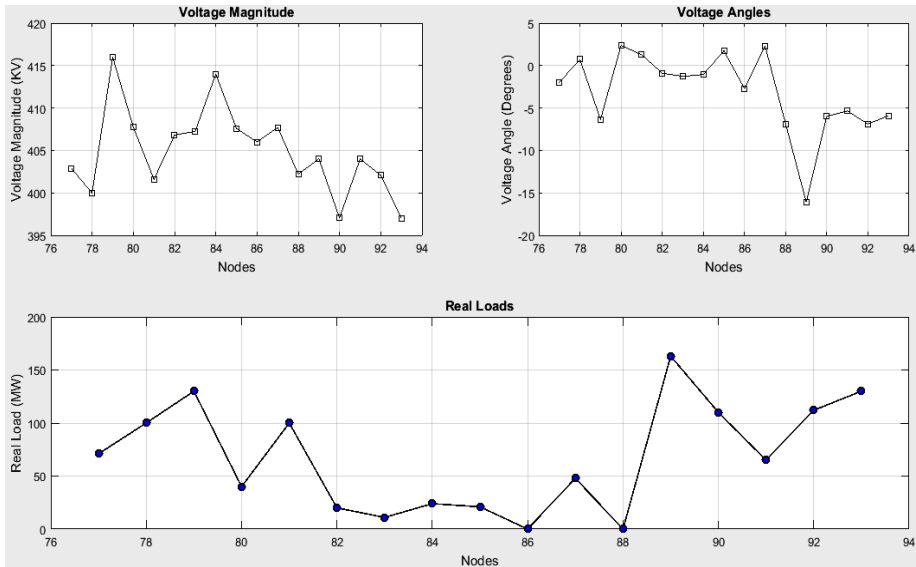
أتمتة عمل المنظومة الكهربائية السُورِيَّة، وفق التَّقْنِيَّات الحديثة، بناءً على خوارزمِيَّات توفُّع
مؤشِّرات الشبَّكة



الشكل (9) منحنيات التوليد الفعلي والردي والحمل الردي من أجل الحمل 6975 MW عند
عقد المنظومة السورية ذات التوتر 230 KV

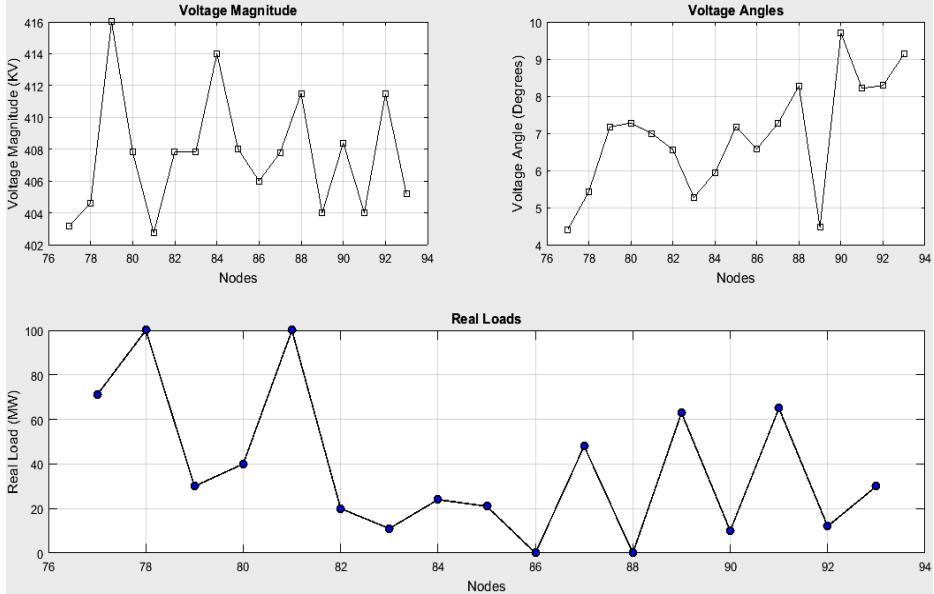


الشكل (10) منحنيات التوليد الفعلي والردي والحمل الردي من أجل الحمل 5000 MW عند
عقد المنظومة السورية ذات التوتر 230 KV

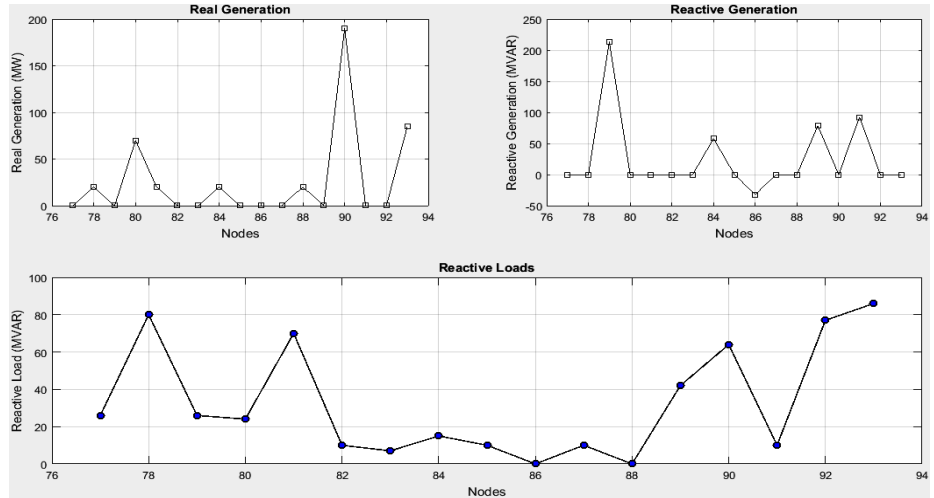


الشكل (11) منحنيات طولية وزاوية الجهد والحمل الفعلي من أجل الحمل 6975 MW عند
عقد المنظومة السورية ذات التوتر 400 KV

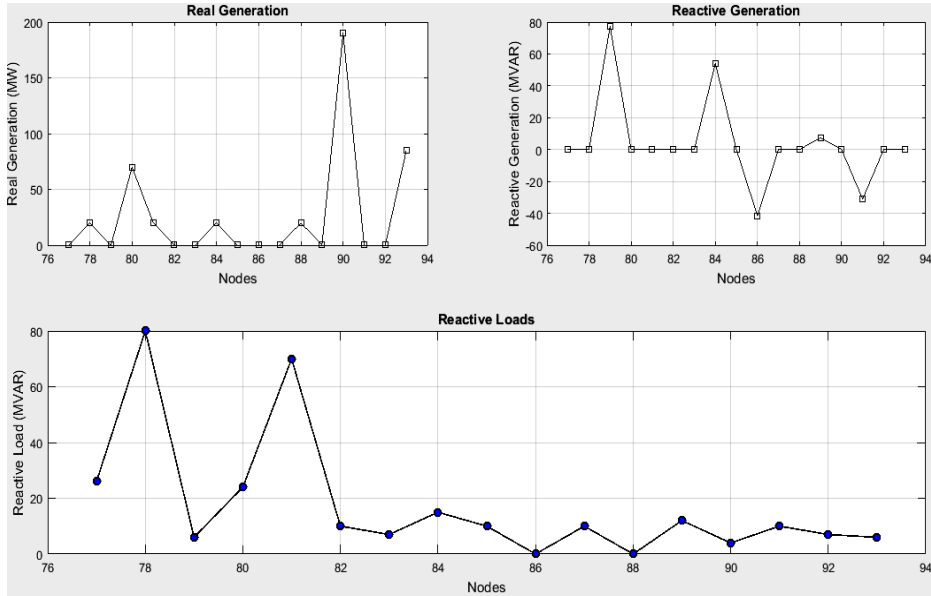
أتمتة عمل المنظومة الكهربائية السُورِيَّة، وفق التَّقْنِيَّات الحديثة، بناءً على خوارزميات توفُّع مؤشرات الشبكات



الشكل (12) منحنيات طويلة وزاوية الجهد والحمل الفعلي من أجل الحمل 5000 MW عند عقد المنظومة السورية ذات التوتر 400 KV



الشكل (13) منحنيات التوليد الفعلي والردي والحمل الردي من أجل الحمل 6975 MW عند عقد المنظومة السورية ذات التوتر 400 KV



الشكل (14) منحنيات التوليد الفعلي والردي والحمل الردي من أجل الحمل 5000 MW عند عقد المنظومة السورية ذات التوتر 400 KV

الجدول (1) نتائج قيم الاستطاعات المثلى المرسله من الوحدات الحرارية عند الحمل 5000 MW

مسلسل	رقم العقدة	اسم المحطة	الخرج الأمثل	P_min	P_max
1	8	'السويدية'	32	5	32
2	8	'السويدية'	32	5	32
3	8	'السويدية'	32	5	32
4	8	'السويدية'	32	5	32
5	8	'السويدية'	32	5	32
6	11	'التيم'	32	5	32
7	11	'التيم'	32	5	32
8	11	'التيم'	32	5	32
9	21	'م ح ح'	159.1725	31	231
10	21	'م ح ح'	159.1725	31	231
11	21	'م ح ح'	159.1725	31	231

أتمتة عمل المنظومة الكهربائية السُورِيَّة، وفق التَّقْنِيَّات الحديثة، بناءً على خوارزمِيَّات توفُّع
مؤشَّرات الشَّبْكَة

12	21	'م ح ح'	159.1725	31	231
13	21	'م ح ح'	159.1725	31	231
14	21	'م ح ح'	38	6	38
15	33	'زيزون'	71.9285	20	142
16	33	'زيزون'	71.9285	20	142
17	33	'زيزون'	71.9285	20	142
18	39	'بانياس'	108.467	26	180
19	39	'بانياس'	108.467	26	180
20	45	'محدرة'	89.23619	23	160
21	45	'محدرة'	89.23619	23	160
22	49	'الزارة'	159.1725	33	231
23	49	'الزارة'	159.1725	33	231
24	49	'الزارة'	159.1725	33	231
25	50	'قطيئة'	32	5	32
26	50	'قطيئة'	32	5	32
27	50	'قطيئة'	32	5	32
28	50	'قطيئة'	48.08235	10	70
29	52	'جندر'	81.54389	17	125
30	52	'جندر'	81.54389	17	125
31	52	'جندر'	58.46696	18	128
32	52	'جندر'	58.46696	18	128
33	52	'جندر'	58.46696	18	128
34	52	'جندر'	58.46696	18	128
35	58	'م ت ح'	148.1309	30	217
36	58	'م ت ح'	148.1309	30	217
37	58	'م ت ح'	80.4285	16	125
38	58	'م ت ح'	80.4285	16	125
39	64	'الناصرية'	80.39004	16	125
40	64	'الناصرية'	80.39004	16	125
41	64	'الناصرية'	80.39004	16	125
42	74	'دير علي'	190.4225	38	265
43	74	'دير علي'	188.3392	38	263
44	74	'دير علي'	188.3392	38	263

الجدول (2) نتائج قيم عامل الخرج الاقتصادي وكلفة التوليد في المنظومة السورية عند

الحمل 5000 MW

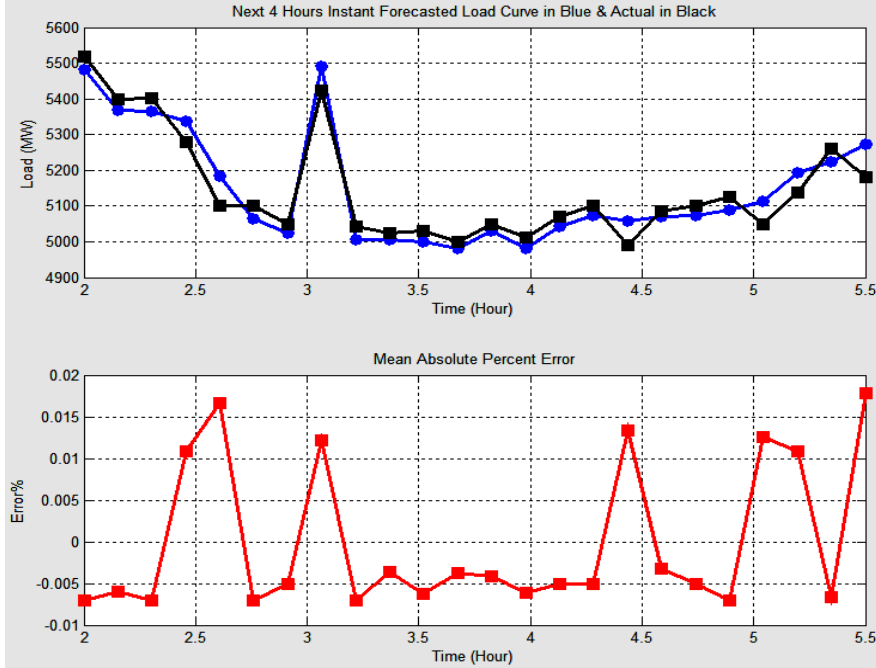
مسلسل	قيم λ (\$/MWh)	الكلفة الكلية للتوليد (\$/h)
1	6.597596	3097242
2	6.602014	3097294
3	6.76612	4376416

الجدول (3) نتائج الحمل والتوليد الفعليين والرديين في المنظومة السورية عند الحمل 5000

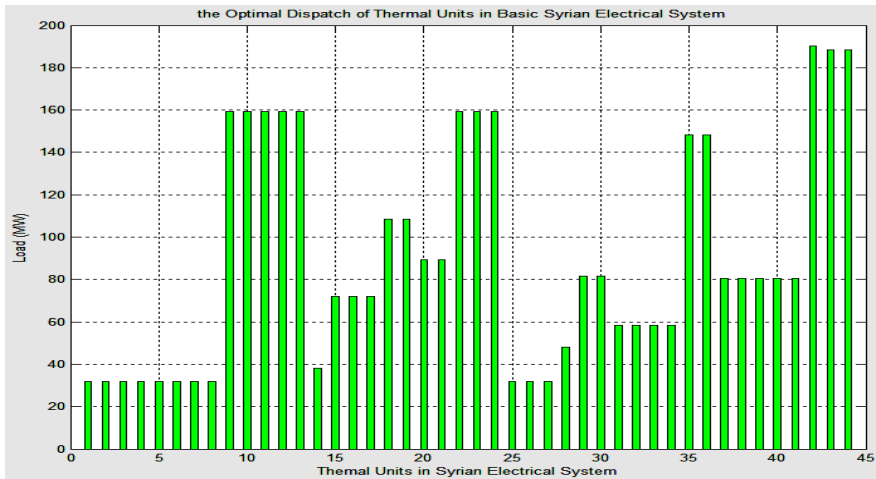
MW

التوليد الكلي الفعلي (ميغا وات)	5186.495
التوليد الكلي الردي (ميغا فار)	1739.598
الحمل الكلي الفعلي (ميغا وات)	5000
الحمل الكلي الردي (ميغا فار)	2695.2
المفايد الكلية الفعلية (ميغا وات)	186.4953
المفايد الكلية الرديّة (ميغا فار)	955.602

أتمتة عمل المنظومة الكهربائية السورية، وفق التقنيات الحديثة، بناءً على خوارزميات توقع مؤشرات الشبكة



الشكل (15) منحنيات الحمل الفعلي والمنتبأ به والخطأ النسبي المئوي من الساعة 7 للمنظومة السورية



الشكل (16) التوزيع الاقتصادي الأمثل للحمل 5000 MW على الوحدات الحرارية
في المنظومة السورية

6- مناقشة النتائج

(1) بالنسبة لنتائج المؤشرات الفنيّة للمنظومة الكهربائيّة السوريّة الحاصلة التي يعطيها البرنامج المعدّ في البحث، وبمقارنة هذه النتائج مع برنامج PSS/E المستخدم في وزارة الكهرباء السوريّة، والمبيّنة في الجدول التالي:

الجدول (4) مقارنة بين البرنامج المعدّ وبرنامج PSS/E في حل المنظومة الكهربائيّة
السورية

		عند الحمل الأعظمي	
		البرنامج المعدّ في البحث	PSS/E
		المؤشر	البرنامج المعدّ في البحث
230 KV	V(min)	203	222.14
	V(max)	236.89	236.9
400 KV	V(min)	352.73	397
	V(max)	408.9	416
		Peq(Loss)	129.9156
		Qeq(Loss)	1060.23
		عند الحمل الأصغري	
230 KV	V(min)	225.2	226.17
	V(max)	236.12	242.38
400 KV	V(min)	379.07	402.73
	V(max)	411.96	416
		Peq(Loss)	186.4953
		Qeq(Loss)	955.602

نلاحظ من الجدول السابق الدقة في النتائج الحاصلة من البرنامج المعدّ في الأطروحة بالمقارنة مع برنامج احترافي معتمد من قبل وزارة الكهرباء السورية هو برنامج PSS/E لاسيما عند الحمل

الأعظمي وبشكل خاص إذا قارنًا حدود الجهد عند سويتي الـ 230 KV و 400 KV، ومفاقيد الاستطاعة الرديَّة للمنظومة.

(2) بمقارنة نتائج الخرج الاقتصادي الأمثل لوحدات التوليد الحرارية فقد تمَّت مقارنة نتائج البرنامج مع برنامج آخر موجود في كلية الهندسة الكهربائية بجامعة حلب يعتمد خوارزمية تحويل معطيات توابع كلفة الوقود وباقي معطيات المسألة إلى معادلات مصفوفية خطية، كانت النتائج متطابقة تماماً بالنسبة للمنظومة الكهربائية السُورِيَّة عند الحمل الأصغري 5000MW، وعند الحمل الأعظمي 6975MW، وما بينهما، حيث تمَّ أخذ نتائج قيم عشوائية بين قيم الحمل الأصغري، والحمل الأعظمي، ومن المهم التذكير هنا أنَّ مسألة الخرج الاقتصادي عندما تكون قيم المفاقيد الفعلية موجودة في المسألة عن طريق إيجاد سريان الاستطاعة التقليدي للمنظومة المدروسة تتحوَّل إلى معادلات خطية وهنا يجب ان تكون القيم في أي برامج متشابهة متماثلة إلى حدِّ بعيد، دون أي اختلاف ولو بسيط، كما يجدر التنويه أنه في حال تجاوز الخرج المرسل من الوحدة الحرارية القيمة العظمى لها أي أعلى قيمة يمكن أن تقدِّمها الوحدة وفقاً لمواصفاتها الفنيَّة، ومنحنياتها الحرارية، يتم تثبيت الخرج عند القيمة العظمى، وفي حال انخفاض الخرج المرسل عن القيمة الدنيا يتم تثبيته عندها، ثم إعادة حساب الخرج الأمثل لباقي الوحدات المحققة للشَّروط $P_{max} \geq P \geq P_{min}$ ، وقد تتكرَّر العمليَّة أكثر من مرة، وهذا ما ينفِّذه البرنامج تلقائياً.

(3) فيما يتعلَّق بخوارزمية التنبؤ الآني بالأحمال الكهربائية، لم نجد دراسة مرجعية حول المنظومة السُورِيَّة، شبيهة بما قدَّمناه في البحث، وهو التنبؤ الآني لحمل هذه المنظومة، لعدَّة ساعات قادمة باستخدام الشبكات العصبونية، بفواصل زمني قدره عشر دقائق بين كلِّ عمليَّتي تنبؤ بما يضاهاي الدَّراسات العالميَّة المتقدِّمة، فتَمَّت عمليَّة المقارنة مع الدَّراسات الخاصَّة بالأنظمة المعياريَّة العالميَّة IEEE-118_bus، و IEEE57_bus، نظراً لأنَّ عدد الخطوط للشبِّكة الكهربائيَّة السُورِيَّة، يقع بين هاتين القيمتين. وبيَّنت المقارنة أنَّ الشبِّكة المعدَّة على دقَّة عالية كما توضِّح النتائج بالمقارنة مع مراجع ودراسات حديثة عالمية، تتضمن شبكات عصبونية مماثلة معدَّة للتنبؤ قصير الأمد، تعتمد التقنيَّة المقدِّمة في البحث على إضافة طبقة مخفيَّة جديدة إلى الشبِّكة العصبونية مكوَّنة من عصبون وحيد تمَّ ربطه بالطبقة المخفية الأولى بتابع تشييط خطي على أن يكون تابع التشييط النهائي بين الطبقة المخفية الثانية وطبقة الخرج من النوع

الأسّي Sigmoid لأنّ خرجة يقع في المجال [0,1] بما يلائم معطيات المسألة المدروسة، ولوحظ أهمية تطبيق هذه التقنية في زيادة دقّة وفعالية الشبكة العصبونية المعدّة، حيث ازدادت دقّة الشبكة العصبونية المعدّة للتنبؤ الآني (والتي تمّ تقديمها من قبل الباحث كدراسة سابقة في المرجع العربي [1])، بنسبة تتجاوز الـ 50%، حيث انخفض الخطأ النسبي المئوي المتوسط MPE للشبكة في البحث من 2.02% إلى 0.1389% بالنسبة للنظام المعياري IEEE 57- bus، كما انخفض MPE من 0.723% إلى 0.403% بالنسبة للنظام المعياري IEEE 118- bus بالقيمة المطلقة وهذه القيم تعبّر عن دقّة الشبكة حيث تصل قيمة الخطأ MPE المقبولة في المراجع العالمية إلى أكثر من 3%، في المرجع الأجنبي [4] يقترح البحث نموذجاً جديداً للتنبؤ بالأحمال الكهربائية باستخدام الشبكات العصبونية العميقة وبمقارنة الانحراف المعياري للنموذج مع نموذج تقليدي أول انخفض هنا المؤشر بمقدار 22% وانخفض الخطأ النسبي المئوي بمقدار 29%، ومع نموذج تقليدي ثانٍ انخفض المؤشر بمقدار 17% وانخفض الخطأ النسبي المئوي بمقدار 9%، أما في المرجع الأجنبي [5] فيقترح الباحث تدعيم طريقة الانتشار العكسي للشبكات العصبية باستخدام تقنية ذكية أخرى Smart technique وهي الأمثلية بطريقة الحشد الجزئي الكمي (QPSO) Quantum Particle Swarm Optimization، ويقدم الباحث نسختين متطورتين لهذه الطريقة ويقارن بين النسخ الثلاثة التي طوّرها في البحث من حيث الدقّة وكانت النسخ الثلاثة بالإجمال أفضل من طريقة الشبكات العصبية ذات الانتشار العكسي التقليدية والجدول التالي يوضح المقارنة بين النسخ الثلاثة المطورة للطريقة التي اقترحها الباحث:

الجدول (5) مقارنة بين النسخ الثلاثة المطوّرة للتنبؤ بالأحمال الكهربائية في المرجع 8

الطريقة	QPSO-BPNN	IQPSO-BPNN	VPQPSO-BPNN
الخطأ النسبي المئوي	6.14%	3.87%	3.39%

7- الاستنتاجات والتوصيات:

1- فعالية ودقّة الخوارزمية المقدّمة في البحث في إيجاد حلّ حقيقي وحلّ تنبؤي للمنظومات الكهربائية المدروسة كما بيّنت النتائج.

- 2- إمكانية استخدام البرنامج الحاسوبي المعدّ على أساس الخوارزمية المقترحة في البحث
لدراسة الشبكة الكهربائية السورية الأساسية.
- 3- اقتراح استخدام الخوارزمية المقترحة والبرنامج المنجز في البحث على أساسها في
مراكز التنسيق والمديريات التابعة لوزارة الكهرباء في القطر العربي السوري.
- 4- سهولة استخدام البرنامج المعدّ وسهولة إدخال المعطيات إليه وميزاته التي تسمح بنسخ
وحفظ نتائج حل المنظومة المدروسة بشكل واضح في ملف أوفيس-إكسيل وإظهار
منحنيات الحمل المتنبّأ به والأخطاء النسبية المئوية لعمليات التنبؤ، وشكل بياني يظهر
توزّع الحمل على وحدات التوليد الحرارية العاملة في المنظومة.

8- المراجع

1. د.عمر حمدوش، د. طه جبّان، وم. وحيد قسطون "زيادة دقة الشبكة العصبونية المعدة للتنبؤ الآتي من خلال التحكم بمعاملاتها" - مجلة جامعة البعث سلسلة العلوم الهندسية - المجلد 39 لعام 2017.

- [1] Edgardo D. Castronuovo, Jorge M. Campagnolo and Roberto Salgado, 2012-"**New Versions of Interior Point Methods Applied to the Optimal Power Flow Problem**"-CEPEL and RECOPE Rio de Janeiro Brazil, 105p.
- [2] Prakornchai Polratanasuk, Pisit Mesacharoenwong, Sumeth Anantasate and Nopporn Leeprechanon, 9/2015-"**Solving Optimal Power Flow Problem Using Parallel Bee Algorithm**"-SELECTED TOPICS in POWER SYSTEMS and REMOTE SENSING, 12p.
- [3] Shahrouz Qghazian, Masoud Rashidi Najad and Amir Abdollahi, 8/2014-"**Reduction of Transmission Losses on Optimal Power Flow using Genetic Algorithm**"-International Journal of Multidisciplinary, Current Research, 117p.
- [4] **Appendix for IEEE 5,14,30,57,118-BUS SYSTEM DATA**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.
- [5] Seunghyoung Ryu, Jaekoo Noh and Hongseok Kim, 2017, Deep Neural Network Based Demand Side Short Term Load Forecasting-**Energies Vol.11, No.3, 93-102**
- [6] Tan Zhongful, Xin He and Ju Liwei1, 2016-"**Simulation Study on Optimizing Neural Network in Short-Term Electric Load Prediction**"- International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering. Vol.11, No.3, pages 93-102.

Arabic references

- [1] O. Hamandoush, T. Jabban, W. Kastoun, 2017-"**Improving Artificial neural network Accuracy for instant electrical**

أتمتة عمل المنظومة الكهربائية السُّوريَّة، وفق التَّقنيَّات الحديثة، بناءً على خوارزميَّات توقُّع
مؤشِّرات الشبِّكة

Load forecasting by controlling its factors''- Albaath-univ
Magazine ,Engineering Science Series, Folder (19), 32p.

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة والشد والضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg-Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

الباحث الدكتور المهندس: معز الحصريه-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة

حمص

الملخص

حديثاً زاد الطلب على المواد المركبة المعدنية (MMCs) في عديد القطاعات الصناعية لأن الاعتماد عليها يفتح آفاقاً واسعة لاستخدامها في مجالات تتطلب خفة الوزن مع خواص ميكانيكية مميزة بتكاليف منخفضة، ونظراً للمكانة الصناعية للألمنيوم وسبائكه يتم حالياً تقويته بمواد تدعيم مختلفة بتقنيات تصنيع متنوعة والحصول على الألمنيوم المدعم (AMCs) مع اتباع التدعيم بعمليات لاحقة من عمليات التشكيل والمعالجة الحرارية بهدف تحسين خواصه الميكانيكية الأمر الذي من شأنه توسيع مساحة الاستخدام الصناعي له.

في هذا البحث تم تدعيم سبيكة الألمنيوم (AA6061) بدقائق قاسية ميكروية من الغرافيت (Gr) بنسبة وزنية ثابتة (4wt%) و من أكسيد التيتانيوم (TiO₂) بنسب وزنية متغيرة (3, 6, 9 and 12 wt%) بطريقة السباكة بالتحريك (SCT).

ثم قُمناً بعد التدعيم لزيادة الكفاءة الميكانيكية بعملية الدرفلة على البارد (CR) بنسبتي تشكيل مختلفتين (R=14%&R=28.5%) و أُلحقت بالدرفلة المعالجة الحرارية (T6) للعينات المدعمة المحضرة، وقد أوضحت نتائج الفحص المجهرى توزيع الدقائق الداعمة الهجينة بشكل شبه منتظم وبالتالي نجاح عملية التدعيم و الحصول على الألمنيوم المدعم الهجين (HAMCs) وفعالية تقنية السباكة بالتحريك (SCT).

وقد بينت نتائج الاختبارات الميكانيكية أن القساوة ومقاومة الشد والضغط تحسنت مع إضافة دقائق التدعيم المُشتركة وزيادة نسبتها وأن المعالجة الميكانيكية الحرارية عند نسبتي التشكيل حسنت من السلوك الميكانيكي بالمقارنة مع (AA6061) المفرد وأن أفضل الخواص تم الحصول عليها بعد المعالجة الميكانيكية الحرارية عند نسبة تدعيم (Gr + 4 % TiO₂ 9 %) وعند نسبة تشكيل (R=28.5%) بالمقارنة مع باقي العينات بنسبة تحسن بالخواص المدروسة تجاوزت الـ (50%).

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم
" (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

الكلمات المفتاحية: السلوك الميكانيكي، الألمنيوم المدعم، تقنية السباكة بالتحريك، المعالجة الميكانيكية الحرارية ، الخواص الميكانيكية.

Processes on Mechanical Study The Effect of Subsequent Treatment Tensile and Compressive of Aluminum Behavior on Harshness , Alloy(AL-Mg- Si) Reinforced Different Particles By Stir Casting Technique(SCT)

ABSTRACT

Recently, the demand for MMCs has increased in many industrial sectors because relying on it opens wide horizons to use in areas that require light weight with mechanical properties distinctive at low costs, and given the industrial status of aluminum and its hibernation, it is currently strengthened with different support materials with various manufacturing technologies and obtaining (AMCs) With the follow -up of subsequent operations of formation and heat treatment in order to improve its mechanical properties, which would expand the space of industrial use for it.

In This research an aluminum alloy (6061) was reinforced with hard particles having size of micron of Graphite with a fixed weight percentage (4wt%) and Titanium oxide particles are added in variable weight percentages (X= 3 , 6 , 9 ,and 12 wt%) by stir casting technique (SCT).

Then, after the reinforcement, we increased the mechanical efficiency with the cold rolling process (CR) with two different formation rates (R = 14% & R = 28.5%) and was attached (CR) to the heat treatment (T6) on all reinforcement samples.

The results of microscope have shown uniform distribution, hybrid reinforced Aluminum alloy successfully prepared and effectiveness of stir casting method.

The results of tests have show The Hardness, Compressive strength, and Tensile strength were determined, with the addition of hybrid reinforcement particles and the increase in its percentage and thermal mechanical treatment at the two formation rates improved from mechanical behavior compared to (AA 6061) alone. and that the best mechanical properties were obtained after mechanical heat treatment at reinforcement ratios (9% Tio₂ + 4% Gr)with formation rate (R = 28.5%) compared to the rest of the samples with an improvement rate of studying properties exceeding (50%) .

Keywords: Mechanical behavior, Aluminum Matrix Composites (AMCs), Stir Casting Technique (STC) , Mechanical heat-treatment, Mechanical properties.

1. مقدمة:

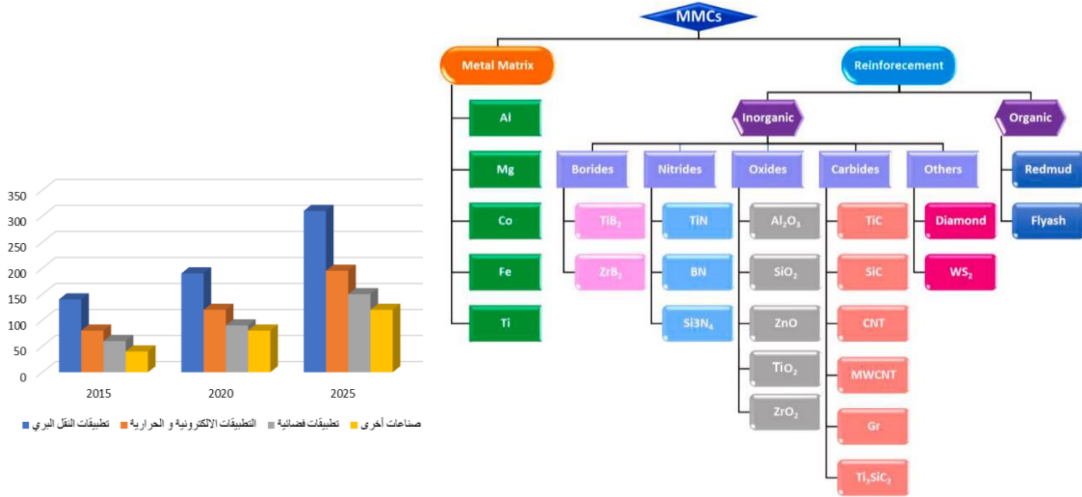
إن التطور التكنولوجي والثورة الصناعية الرابعة تفرض الحاجة الدائمة إلى ابتكار مواد هندسية حديثة وتطوير المواد الهندسية التقليدية لتوسيع ساحة الاستخدام الصناعي لها، تتمتع سبائك الألمنيوم بخواص مميزة بالفعل تلبي المتطلبات التصميمية والتكنولوجية للتطبيقات الهندسية المختلفة إلا أن خواصها الميكانيكية كمقاومتها على الشد والضغط وقساوتها منخفضة مقارنةً بمواد هندسية أخرى، حيث لا تزال بعض التطبيقات مُقتصرة على استخدام معادن محددة مرتفعة الوزن عالية الثمن ، ولن تتمكن من استخدام سبائك الألمنيوم - بهدف الاستفادة من خواصها المميزة - كمواد بديلة عن المعادن الأخرى مثلاً في تطبيق ما، إلا في حال تمكنا من تحسين خواصها الميكانيكية بنسب تحسن مميزة [2].

لذلك لا يزال العمل البحثي مستمراً من قبل الدارسين في هذا المجال من أجل اقتراح واعتماد طرق جديدة لتحقيق التطوير والتحسين في الخواص الميكانيكية لسبائك الألمنيوم سواء بالتسبيك (إضافة العناصر السبائكية) أو عمليات التشكيل المتنوعة أو المعالجات الحرارية أو طرائق التدعيم العديدة ومن هنا يبرز دور البحث الحالي في اعتماد ونشر وتوطين تقنية التدعيم الهجين مع إلحاقها بمعالجة ميكانيكية وحرارية لاحقة (أصبحت العمليات اللاحقة جزءاً أساسياً من دورة حياة تصنيع المواد المركبة المعدنية (MMCs) بما يحقق إمكانية التوسع في استخدام سبائك الألمنيوم بعد التحسين في سلوكها الميكانيكي. يوضح الشكل (1) تزايد الطلب على المواد المركبة ذات الأساس المعدني (MMCs) ما بين عامي (2015-2025) لأجل عديد التطبيقات الصناعية [3].

في التطبيقات الهندسية المعاصرة، تكتسب سبائك الألومنيوم أهمية متزايدة (موضوع بحثنا) كبديل فعالة للمواد الهندسية التقليدية، ويُعزى هذا التحول إلى المزايا العديدة التي يوفرها الألومنيوم وسبائكه، علاوة على ذلك، تتميز سبائك الألومنيوم بوزن نوعي أقل، بالإضافة إلى فعالية من حيث التكلفة، مما يجعلها خياراً جذاباً لمختلف الصناعات [2] [3] وهو ما جعله أهم وأول سبائك المعادن الملونة الجاري تدعيمها في الوقت الحالي ثم يليه المغنيزيوم أما السبائك الأخرى الجاري

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

تدعيمها بالإضافة لسبائك الألمنيوم و المغنزيوم مع أهم أنواع دقائق التدعيم بأنواعها المختلفة فهي موضحة بالشكل(2)[1] [2] .

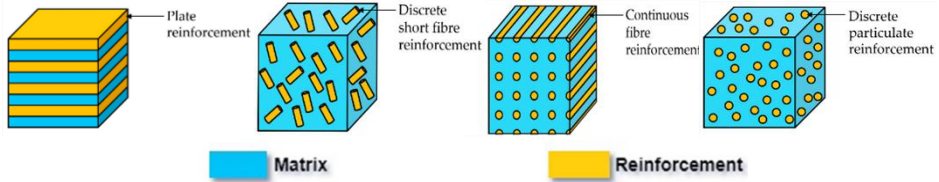


الشكل (1) تزايد الطلب على (MMCs) في
عديد التطبيقات الصناعية [3]

الشكل (2) أهم أنواع المعادن الجاري تدعيمها [2]

يجري تدعيم سبائك الألمنيوم (التدعيم التي تعتبر أحدث وأهم آليات تقوية السبائك) بطرائق تدعيم قديمة نسبياً وطرائق متطورة للحصول على المواد المركبة ذات الأساس المعدني من الألمنيوم (AMCs).

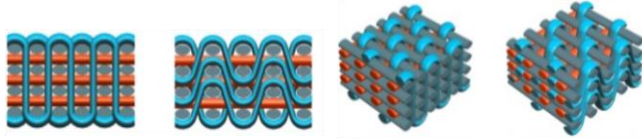
حيث إن الطرائق التقليدية القديمة للتدعيم تقوم على استخدام مادة تدعيم وحيدة بمقياس من مرتبة الميكرون و بتموضع بسيط لمادة التدعيم لنحصل على : الألمنيوم المدعم بالدقائق (PAMCs) -الألمنيوم المدعم بألياف قصيرة أو شعيرات (SFAMCs) -الألمنيوم المدعم بألياف طويلة مستمرة (CFAMCs) - الألمنيوم المدعم بالطبقات (PLAMCs). [1] . وهي موضحة كالتالي بالشكل (3):



الشكل (3) طرائق التدعيم التقليدية للألمنيوم

أما الطرائق المتطورة لتدعيم سبائك الألمنيوم : تعتمد على مواكبة التقنيات الحديثة والمتقدمة في التدعيم والتصنيع للحصول على ألمنيوم بخواص مميزة وتلافي العيوب والسلبيات في الطرائق التقليدية القديمة، ومن أهم الطرائق الحديثة لتدعيم سبائك الألمنيوم [13]:

(a) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام شبكة -نسيج- ثنائية أو ثلاثية (Structural or Woven reinforced) الشكل (4).



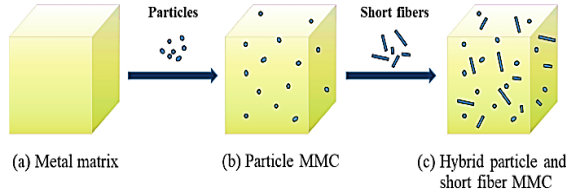
الشكل (4) التدعيم باستخدام شبكة -نسيج- (2D-3D)

(b) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام ألياف أو دقائق أو طبقات نانوية Nano composites (AMNCs).

(c) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام تقنية الساندويش تتم عن طريق ربط طبقات صفائحية من الألياف مع طبقات معدنية لتقويتها وتدعيمها (Sandwich Structure composites)

(d) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام تقنية التدعيم الهجين (التدعيم المشترك Hybrid composites) الطريقة (المعتمدة في بحثنا) والتي تعتبر تقنية هامة ومتقدمة وقد بدأ هذا النوع من الألمنيوم المدعم الهجين بالانتشار والتطور بعد عام (2010) بسرعة فائقة والدخول في تطبيقات كثيرة ، يتم فيه تدعيم الألمنيوم هنا بخليط من أكثر من نوع من مواد التدعيم المذكورة سابقاً على سبيل المثال الجمع بين التدعيم بالدقائق والتدعيم بالألياف القصيرة والدمج بين التدعيم بالألياف والتدعيم بالدقائق والخلط بين نوعين مختلفين من

الدقائق أو الألياف أو أكثر (دقائق نانوية-دقائق ميكروية) (ألياف كربون-ألياف زجاج) (دقائق أكسيد-دقائق كربيد). وكيفية التدعيم الهجين موضح بالشكل (5) [13] [5] [14] :



الشكل (5) طريقة التدعيم الهجين -المشترك-

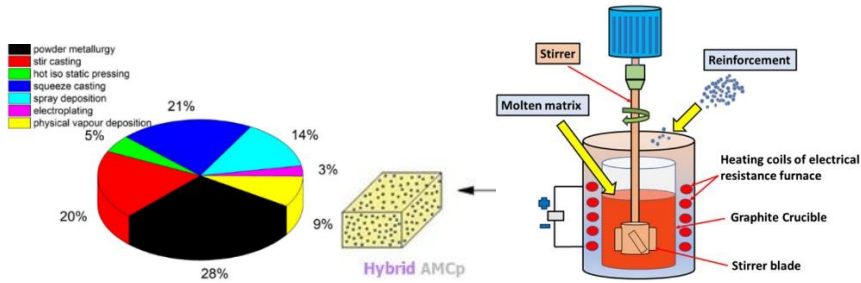
التدعيم الهجين للألمنيوم يمكن تحقيقه بطرائق وتقنيات متعددة أغلبها حديثة ومتطورة، وقد تم تعديل العديد من تقنيات التصنيع التقليدية لتناسب مع متطلبات تصنيع المعادن المدعمة ويعتمد اختيار الطريقة الهندسية الأفضل وفق كمية وتوزيع وشكل المواد الداعمة ونوع المعدن الأساس وطبيعة التطبيق الذي سوف تدخل المادة المركبة المصنعة فيه.

إن اختيار الطريقة الصحيحة لتصنيع (MMCs) يمثل أحد العوامل الأساسية لضمان نجاح المواد المركبة المعدنية، فالخصائص النهائية التي تتمتع بها المادة تعتمد بشكل مباشر على تقنية التصنيع المُختارة، وبارامترات هذه التقنية (درجة الحرارة، الضغط، زمن المعالجة)، إلى جانب نوعي المعدن الأساس والمادة الداعمة، بشكل عام تمر تقنيات تصنيع MMCs بما يلي:

- المعالجات الأساسية (Primary Processing): وتشمل إنتاج المادة المركبة وتشكيلها الأولي، وغالباً ما لا تؤدي هذه المرحلة إلى الشكل أو البنية النهائية للمنتج.
- المعالجات الثانوية أو اللاحقة (Secondary Processing): تلي المعالجات الأساسية، وتهدف إلى تحسين خواص المادة أو تعديل شكلها النهائي، وتشمل عمليات مثل: التطريق، البثق، الدرفلة، المعالجة الحرارية، والتشغيل الميكانيكي.
- وفي بعض الحالات، تسبق هذه المراحل عمليات تمهيدية أو تحضيرية (Preparing Processing): مثل المعالجة السطحية للمكونات أو تصنيع النموذج الأولي، والتي تلعب دوراً حيوياً في تحسين الالتصاق والارتباط بين المعدن والمادة الداعمة.

شهدت تقنيات تصنيع المواد المركبة تطوراً ملحوظاً على مر السنين، بهدف تحسين البنية المجهرية (الميكروية) والخواص الميكانيكية لـ (MMCs)، ويُعد التحدي الرئيسي في اختيار طريقة التصنيع المناسبة هو ضمان توزيع متجانس لأطوار التدعيم (سواء كانت دقائق أو ألياف أو خليط منهم)

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "



الشكل (7) تقنية السباكة بالتحريك (SCT) -تصنيف طرائق تصنيع من حيث الاستخدام [8]

تبرز مبررات وأهمية البحث كما ذكرنا سابقاً نظراً للمكانة الاقتصادية العالية لسبائك الألمنيوم كونه يأتي بالمرتبة الثانية بعد الفولاذ ونظراً لتوافره وما يتمتع به من ميزات عديدة وخواص ميكانيكية جيدة مقارنة بالسبائك التقليدية أتت الحاجة إلى تدعيمه لتحقيق متطلبات الأداء والموثوقية والتحكم بخواصه الميكانيكية من خلال طريقة التدعيم ونسبته والعمليات اللاحقة المطبقة لزيادة مساحة الاستفادة منه صناعياً في مجال السيارات والطائرات والتطبيقات الفضائية والتجهيزات الرياضية مع تحقيق تخفيض في التكلفة [3] [1].

إن تدعيم سبائك الألمنيوم بالطرائق التقليدية تقيد محدودية التطبيق وعدم تلبية متطلبات العمل والتكاليف الباهظة لمواد التقوية ولتصنيع الألمنيوم المدعم وصعوبة الوصول إلى الخواص المرجوة في كثير من الحالات بالإضافة إلى عدم مواكبة التطورات التكنولوجية الحديثة. كل هذا دفع إلى تدعيم الألمنيوم بالطرائق المتطورة من مواد نانوية أو شبكات تدعيم ولكن ما يُعيب ذلك أنها ذات تكاليف تصنيعية مرتفعة وبالتالي ارتفاع تكلفة الألمنيوم المدعم عدا عن الحاجة إلى تجهيزات وتقنيات معقدة للتصنيع والإنتاج بالأخص في حال الألياف المستمرة (CF).

أما بالاعتماد على التدعيم الهجين (Hybrid Reinforcement) أو ما يسمى التدعيم المزوج (Daul Reinforcement) باستخدام مواد تدعيم رخيصة وذات قابلية عالية للاندماج مع الأساس المعدني كالدقائق المتنوعة (مقارنة بمواد التدعيم الأخرى) كطريقة تدعيم حديثة لسبائك الألمنيوم فإنها تحقق الجدوى الاقتصادية بالإضافة إلى الوصول إلى الخواص المطلوبة من

خلال الاستفادة من جمع ومزج خواص دقائق التدعيم المُضافة معاً عدا عن سهولة تصنيع الألمنيوم الهجين المدعم بالدقائق وتعدد تطبيقاته وإمكانية التحكم بخواصه من خلال نسب ومواد التدعيم ومن خلال إجراء عمليات لاحقة على المنتجات وقابلية إعادة التدوير من خلال الصهر وإعادة تشكيل مرات كثيرة [8] [14].

وأن ما يحقق فعالية عملية تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين (HAMCs) اختيار طريقة ملائمة للتصنيع مثل تقنية السباكة بالتحريك (SCT) الي تتفوق على باقي تقنيات التصنيع من حيث انخفاض التكلفة والبساطة والمرونة وسهولة التطبيق وهي معتمدة تجارياً [8] .

استخدام عملية المعالجة اللاحقة المناسبة بعد تصنيع (HAMCs) (الدرفلة على البارد والمعالجة الحرارية في بحثنا) من شأنه تحسين الخواص والتشكيل إلى الأجزاء النهائية بدقة عالية وتقليل العيوب الناتجة عن السباكة وتصحيح عيوب البنية وتحسين التجانس وهذا ما يُعزز من الأداء والسلوك الميكانيكي ويمكن أن نكتفي بالمعالجة الحرارية فقط كعملية لاحقة في حال أردنا تعديل خواص HAMCs الميكانيكية دون تغيير شكلها [3].

لذا تم في هذا البحث تسليط الضوء على تحضير مادة مركبة معدنية ذات أساس من سبائك الألمنيوم AA6061 مدعمة تدعيماً هجيناً أو مزدوجاً باستخدام دقائق مختلفة (Tio₂-Gr) بتقنية (السباكة بالمزج SCT) ودراسة تأثير زيادة نسبة الأوكسيد عند ثبات نسبة الطور الأخر (Gr) على السلوك الميكانيكي: (القساوة - خواص شد والضغط) ومن ثم دراسة تأثير الدرفلة على البارد (CR) بنسبتي تشكيل مختلفتين (R=14% & R=28.5%) وتحديد الأفضل مع المعالجة الحرارية (T6) معاً كعمليات لاحقة على الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم المدعم الهجين المحضر.

نستعرض فيما يلي بعض الأوراق البحثية الحديثة التي تمحورت حول تقوية سبائك الألمنيوم بالدقائق المختلفة ودراسة تأثير عمليات التشكيل والمعالجة الحرارية اللاحقة على خواصها الميكانيكية:

في عام (2018) قام الباحثان (Saravanakumar) (Sasikumar) بتدعيم سبيكة من الألمنيوم AA 6063 باستخدام مواد تدعيم مشتركة من الألومينا ودقائق الغرافيت الثابتة النسبة (1%) باستعمال تقنية السباكة بالتحريك الميكانيكي (SCT) ومن ثم إجراء المعالجة الحرارية وفق إجراءاتي الأولى برفع درجة الحرارة إلى 500C° لمدة ساعة مع السقاية بالماء أما الإجراء الثاني فهو

التقسية بالتعتيق لمدة ست ساعات عند درجة الحرارة $170C^{\circ}$ وقد أظهرت النتائج نجاح إنتاج الألمنيوم الهجين مع توزيع جيد لدقائق التدعيم من خلال صور المجهر وقد بينت النتائج أيضاً تحسن في مقاومة الانحناء وانخفاض التدلي مع زيادة نسب الألومينا حتى حد معين (6%) وانخفاضها فيما بعد وبعد إجراء المعالجة الحرارية تحسنت ولكن افضل النتائج كانت بعد إجراء عملية التعتيق [5].

قام الباحث (Wakeel) وآخرون في عام (2019) بدراسة تأثير التدعيم الهجين بدقائق من كربيد السيلكون وأوكسيد الألمنيوم ودقائق من حديد الصب Grey cast iron على السبيكة AA 2218 المصنعة بطريقة السباكة بالتحريك (SCT) بنسب مختلفة و تأثير عملية المعالجة الحرارية اللاحقة بالتخمير عند درجة حرارة $410C^{\circ}$ لمدة ساعتين على العينات المدعمة والتي طبقها للمجانسة وإزالة الاجهادات الداخلية وقد بينت النتائج تحسن القساوة وخواص الشد (YS-UTS) والمتانة الصدمية مع انخفاض الاستطالة عند تطبيق المعالجة المذكورة وزيادة نسبة التدعيم وانخفاض نسبة دقائق الحديد [6].

في دراسة نُشرت عام (2020) قام الباحثان (Safiulla) (Nazeer) بدراسة تأثير البثق على البارد Cold Extrusion فقط على السبيكة AA6063 المصنعة بطريقة (SCT) والمدعمة بدقائق مختلفة وبشكل إفرادي من كربيد السيلكون وأوكسيد الألمنيوم وأوكسيد السيريوم CeO_2 بنسب (X = 0, 2, 4, 6, 8%) وقد بينت النتائج أن إجراء التشكيل بالبثق على البارد أدى إلى تحسين القساوة وخواص الشد مع انخفاض المتانة الصدمية وانخفاض معدل الاهتراء وازدياد نسبة التدعيم حسن من السلوك الميكانيكي و أعطى التدعيم بكربيد السيلكون أفضل النتائج ثم أوكسيد السيلكون ثم أوكسيد السيريوم [7].

في (2022) قام الباحث (Haripriya) وآخرون بمقارنة بعض خواص الألمنيوم النقي المدعم بدقائق من أوكسيد التيتانيوم بشكل إفرادي بنسب متزايدة وصلت حتى (9%) والمصنعة بطريقة (SCT) مع خواص الفولاذ متوسط الكربون MCS وقد أظهر البحث تفوق الفولاذ بالخواص بالرغم من ارتفاع مقاومة الشد الأعظمية ومقاومة الضغط ومقاومة الانحناء والقساوة مع انخفاض في الاستطالة لمعظم عينات الألمنيوم المدعم وذلك مع ازدياد نسبة التدعيم بالأوكسيد [10].

في دراسة (2023) للباحث (Khosroshahi) وآخرون تم تصنيع الألمنيوم المدعم بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) حيث تم تقوية سبيكة الألمنيوم A356 بشكل إفرادي بكل من دقائق أوكسيد

الألمنيوم وكربيد السيليكون المطبقة بالنحاس ومن ثم تدعيم هجين مشترك بكليهما مع اتباع التدعيم بالتشكيل على البارد بالدرفلة ومقارنة النتائج حيث ساعد التدعيم الهجين والدرفلة على تحسين خواص الشد والقساوة أكثر من التدعيم الإفرادي [11].

في (2024) قام الباحث (Kirman) وآخرون بتدعيم سبيكة الألمنيوم (ALZrCe) بدقائق نانوية من الألومينا بشكل إفرادي بنسب متزايدة بتقنية السباكة بالمزج مع إلحاق التدعيم بمعالجة ميكانيكية بالدرفلة على البارد بنسب تشكيل ثلاثة مختلفة ومعالجة حرارية بالتسخين حتى $500C^{\circ}$ لمدة ساعة وقد لاحظ الباحثون أن مقاومة الشد الأعظمية والقساوة ترتفع للعينات مع ازدياد نسبة التشكيل وأن المعالجة الحرارية قد ساهمت بشكل بسيط بتحسين الخواص المذكور وأفضل العينات من حيث التدعيم كانت عند نسبة تدعيم وسطية من دقائق الألومينا النانوية [12].

في أحدث الدراسات عام (2025) قام كل من (Bakrey) (Yakoub) بتدعيم سبيكة AA 6061 باستخدام مواد تدعيم مزدوجة من دقائق ميكروية من أكسيد التيتانيوم و كربيد السيلكون باستعمال تقنية السباكة بالتحريك الميكانيكي (SCT) ومن ثم مقارنة التدعيم الإفرادي بكل منها على حدا مع التدعيم الهجين بكلا النوعين للوصول للخواص الميكانيكية الأمثل من خلال دراسة ثنائي حالات للتدعيم وقد أظهرت النتائج نجاح إنتاج الألمنيوم الهجين وتحسن في مقاومة الانحناء والقساوة ومقاومة الشد الأعظمية مع زيادة نسب دقائق التدعيم لكل نوع حتى حد معين (8%) ولكن أفضل النتائج للسلوك الميكانيكي على الشد والانحناء والقساوة كانت بعد عملية التدعيم الهجين بالأكسيد والكربيد بنسبة (8%) وأكسيد ونسبة (6%) كربيد العينة S8. [14].

مما تقدم في الدراسات السابقة والمسح المرجعي نلاحظ أن اختيار طريقة تدعيم سبيكة الألمنيوم ونوع مواد التدعيم ونسبتها وطريقة التصنيع والعمليات اللاحقة وضبط شروط كل ما سبق يمثل تحدياً مهماً وأمر ضرورياً لتحسين وضبط السلوك الميكانيكي للألمنيوم وبالتالي رفع الأداء وزيادة الكفاءة الميكانيكية.

2. هدف البحث:

1. تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين (HAMCs) بتقنية (SCT) ودراسة السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد والضغط لسبيكة AA6061 عند زيادة نسبة دقائق التدعيم من (TiO₂) حتى

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

- (12%) وعند تثبيت نسبة الغرافيت(4%) وتحديد النسب المثالية من كلا الدقائق المُضافة والتي تُعطي أفضل تحسن في السلوك الميكانيكي.
2. دراسة تأثير عمليتي الدرفلة على البارد (CR) بنسبتي تشكيل مختلفتين (R=14%&R=28.5%) والمعالجة الحرارية (T6) معاً على القساوة وخواص الشد والضغط للعينات المُدعمة الهجينة.
3. الوصول إلى تصور أوضح حول ربط نوع ونسبة الدقائق الداعمة وطبيعة العمليات اللاحقة بتغير خواص الألمنيوم المُدعم الهجين الناتج بما يتلاءم مع التطبيق المطلوب وبالتالي توقع مجال الاستخدام صناعياً.

3. مواد وطرق البحث :

1.3. المواد الاولية المستعملة لتحضير (HAMCs):

1.3.1 المعدن الأساس (Metal Matrix):

تم استلام إحدى سبائك الألمنيوم (AL-Mg- Si) وهي سبيكة الألمنيوم AA6061 موضوع البحث وكانت على شكل بيليت بقطر (12cm) تركيبها الكيميائي التجريبي (من جهاز التحليل الطيفي Spectrometer) والمعياري حسب ASTM كما في الجدول (1).

الجدول (1) التركيب الكيميائي لسبيكة AA6061

التركيب المعياري	التركيب التجريبي	العنصر
0.8-0.4	0.75	Si
1.2-0.8	0.95	Mg
0.7>	0.6	Fe
0.4-0.15	0.3	Cu
0.15>	0.13	Mn
0.25>	0.23	Zn
0.35-0.04	0.29	Cr
0.25>	0.17	Ti
Bal.	Bal.	AL

1.3.2. مواد التدعيم (Reinforcement Materials):

هي عبارة عن مساحيق ناعمة قاسية ميكروية من أوكسيد التيتانيوم (TiO_2) والغرافيت (Gr) حيث تم استخدام دقائق بحجم وسطي ($50\mu m \rightarrow 20$) بعد نخلها على جهاز المناخل الآلي نوع من Rids dale & Co LTD, England .

1.3.3. مواد مساعدة (Added Materials) :

بودرة مغنزيوم ناعمة تُضاف لتحسين التبلل والترطيب بين المعدن والدقائق المُضافة بالإضافة لبودرة من الألمنيوم النقي وأقراص طاردة للخبث.

2.3. التجهيزات المُستعملة لتحضير (HAMCs) بطريقة السباكة بالمزج (SCT) وإجراء

المعالجة الميكانيكية (CR) والمعالجة الحرارية (T6):

2.3.1. آلة السباكة بالمزج Stir Casting Machine:

تم تصنيع آلة السباكة بالمزج محلياً في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية والتي تضم الأجزاء التالية الموضحة بالشكل (8) [4] [8] :

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "



الشكل (9) القالب والعينات بعد الصب



الشكل (8) القالب والعينات بعد الصب

2.3.2. قالب الصب المعدني Metal Mold :

وهو عبارة عن قطعتين من الفولاذ تم تشغيل أربع فتحات عليهما بطول 150mm (تمثل العينات) الشكل(9).

2.3.3. ميزان حساس Weighing Machine :

استخدمنا ميزان إلكتروني نوع (LS1000) صنع شركة (Sartrious) له قابلية المعايرة والتصفير يقيس (0→1000gr) بدقة عالية من مرتبة أجزاء الغرام لوزن قطع الألمنيوم والدقائق الداعمة بنوعها للحصول على نسبة التدعيم الصحيحة والمطلوبة.

2.3.4. ماكينة التشكيل على البارد (ماكينة الدرفلة):

بعد إجراء الحسابات التصميمية تم تصنيع ماكينة الدرفلة المستخدمة في بحثنا في مخبر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية وهي مخصصة لدرفلة عينات الألمنيوم الدائرية وموضحة بالشكل [9](10) :



الشكل (10) ماكينة الدرفلة المصنعة محلياً ومبدأ درفلة العينات الدائرية

2.3.5. فرن المعالجة الحرارية :

استخدمنا فرن المعالجة النوع (CurboLite, Hope watt :3100 w) تصل درجة حرارته العظمى (1200°C : Max temp) والزمن اللازم للتسخين الكامل (45) دقيقة .

3.3.3. طريقة تنفيذ البحث:

3.3.1. تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين [8] [12] [13] [14]:

يتم تقطيع بيليت الأساس AA6063 إلى قطع صغيرة ووزنها وتحديد أوزان الدقائق المُضافة بنوعيتها حسب النسب المطلوبة (wt%) في العينات المدروسة ثم وضع قطع الألمنيوم في البوتقة الغرافيتية داخل الفرن ورفع درجة حرارته إلى 850°C لضمان انصهار السبيكة التام وبعد التأكد من انصهار الألمنيوم يتم خفض درجة الحرارة ضمن الفرن إلى درجة حرارة 750°C ليتم إضافة الدقائق الداعمة الهجينة ($\text{Gr}-\text{Tio}_2$) المخلوطة بشكل متجانس و المعلومة الحجم والوزن والنسبة والمُسَخنة مسبقاً إلى درجة الحرارة حوالي 200°C لخمس دقائق وذلك لإزالة الرطوبة والغازات الممتصة وتنظيف السطح من طبقة الأكاسيد وتحسين توزيع الدقائق داخل المصهور ويتم معها إضافة كمية قليلة من المغنزيوم (لا تتجاوز 1%) لتحسين التبلل أيضاً ولتعويض الفقد نتيجة الاحتراق والتأكسد مع تنفيذ الخلط يدوياً بقضيب مزج لضمان تجاس التوزع، بعد ذلك يتم إدخال الخلاط الميكانيكي في المصهور ضمن البوتقة الموجودة داخل الفرن وتدويره بسرعة (350r.p.m) ولمدة (20min) للحصول على دوامة ضمن المصهور Vortex (تم اختيار هذه الشروط اعتماداً على مجموعة تجارب تحضيرية قمنا بها وعلى الدراسات المرجعية) ونتيجة لفعل الدوامة يتم سحب خليط الدقائق الهجينة الى داخل المصهور وتوزيعه خلاله وأثناء عملية الخلط يتم إعادة تسخين الخليط إلى درجة

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

الحرارة $850C^{\circ}$ لتحسين انتشار وتوزيع الدقائق الداعمة الهجينة ضمن المصهور وبعد انتهاء الخلط وعند درجة الحرارة $850C^{\circ}$ تتم عملية صب المادة المركبة الهجينة في القالب المعدني المسخن لدرجة حرارة $300C^{\circ}$ لتلافي التجمد المسبق للمصهور وللتقليل من عيوب السباكة في المسبوكات وأخيراً يتم إخراج العينات من داخل القالب بعد تبريده الشكل (9) وتكرر العملية عدة مرات وفقاً للنسب المطلوب إضافتها من الدقائق الداعمة الهجينة الأساس لنحصل على خمس عشر عينة لكل اختبار (A1, A2, A3, B1, B2.....) والجدول (2) يوضح بارامترات (SCT) المستخدمة أثناء التصنيع [8]:

الجدول (2) بارامترات (SCT) المستخدمة أثناء التصنيع

البارامتر / المتغير) المعتمد	القيمة
Preheating temperatures of reinforcements	$(200C^{\circ})$
Preheating temperatures of die	$(300C^{\circ})$
Spindle speed	$(350r.p.m)$
Stirring time	(20 min)
Stirring temperature	$(750C^{\circ})$

3.3.2. عملية المعالجة الميكانيكية (الدرفلة على البارد CR):

المعالجة الميكانيكية المتضمنة التشكيل بالدرفلة على البارد (CR) (التصليد الانفعالي Strain Hardening) وكان الغرض الرئيسي منها هو تحقيق الاهداف الاتية:

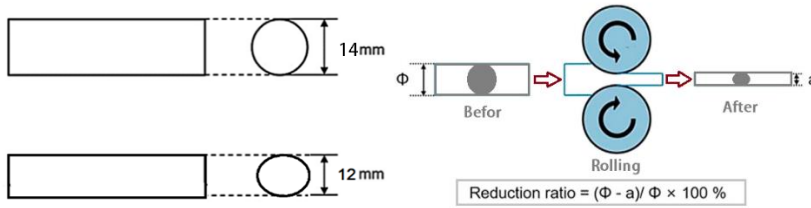
- تحسين الخواص الميكانيكية للمسبوكة المدعمة وتعزيز الاداء.
- تقوية المسبوكات المدعمة وذلك من خلال إحداث شبكة انخلاعات جديدة Dislocations في المادة والتي تتداخل مع استمرار حركة الانخلاعات .
- التخلص من المسامية الناتجة عن عملية السباكة وتحسين الترابط بين المكونات.

عُرّضت العينات المسبوكة المُدعمة بالمجموعتين الثانية والثالثة (عشرة عينات لكل اختبار) حسب شروط العمل (A2, A3, B2, B3, C2.....E3) لعملية التشكيل (المعالجة الميكانيكية) الشكل (10) بنسبتي تخفيض مختلفتين باستخدام ماكينة الدرفلة المُصنعة محلياً على مرحلتين $mm(10 \rightarrow 12 \rightarrow 14)$ بنسبة تشكيل (تخفيض) تعطى كما يلي [9] [12]:

$$Reduction\ rate\ (\%) = \left(\frac{\phi - a}{\phi} \right) \times 100\%$$

وكانت نسبة التخفيض (درجة التشكيل) في كل مرحلة تحسب كالتالي الشكل(11):

$$R\ (\%) = \left(\frac{14 - 12}{14} \right) \times 100\% \approx 14\% \ \& \ R\ (\%) = \left(\frac{14 - 10}{14} \right) \times 100\% = 28.5\%$$



الشكل (11) حساب نسبة التشكيل

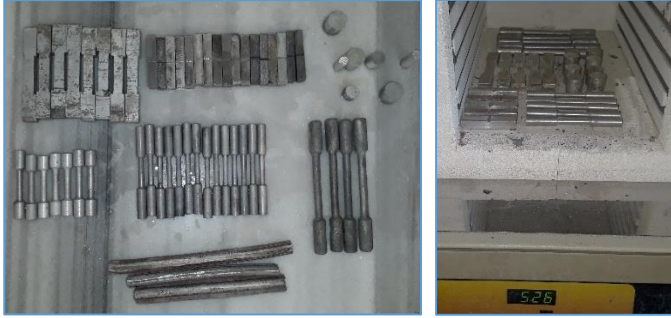
3.3.3. المعالجة الحرارية المحلولية T6 :

أُجريت المعالجة الحرارية المحلولية في درجة $530C^\circ$ ولمدة (1hour) يعقبها التبريد السريع بالماء ثم التعتيق الصناعي في درجة $185C^\circ$ ولفترة زمنية (6hour) على جميع عينات الألمنيوم في المجموعتين الثانية والثالثة (A2, A3, B2, B3, C2.....E3) المدعمة تدعيماً مشتركاً والمُدرفلة بنسبتي تشكيل مختلفتين الشكل (12). وكان الغرض الرئيسي من المعالجة المحلولية (تحقيق التصليد بالترسيب Precipitation Hardening) هو تحقيق الاهداف الاتية:

- الحصول على محلول جامد متجانس وبعد التبريد في الماء نحصل على محلول جامد فوق الاشباع.

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

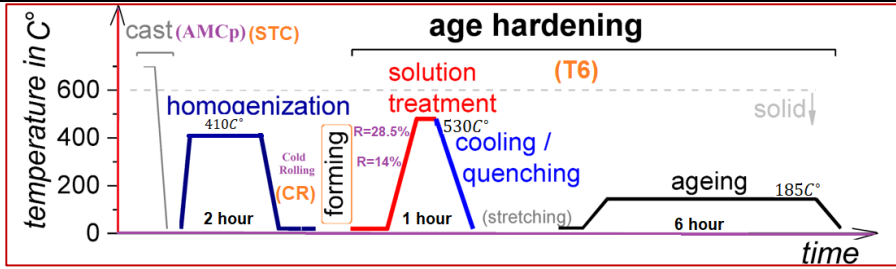
- وبعد عملية التعتيق تترسب دقائق ناعمة جداً من الطور الثاني Mg₂Si (وبالتالي التخلص من ظاهرة العزل المجهرى Micro Segregation للسيلكون والمغنزيوم) تعمل هذه الرواسب على إعاقة الانخلاعات مما تؤدي الى تحسين الخواص الميكانيكية للسبيكة.
- تغير المعالجة بنية جزيئات AlFeSi وهي عبارة عن طور غير منحل في هذه السبائك.
- التخلص من بعض عيوب السباكة وضمان توزيع الاطوار بشكل متجانس في الصبة للحصول على بنية منتظمة متجانسة خلال المسبوكة و إزالة الاجهادات الداخلية الناشئة من الظروف الحرارية أو التقلص أثناء التجمد [13] [5] [6] [12].



الشكل (12) عينات الاختبارات المدعمة والمشكلة في فرن المعالجة الحرارية

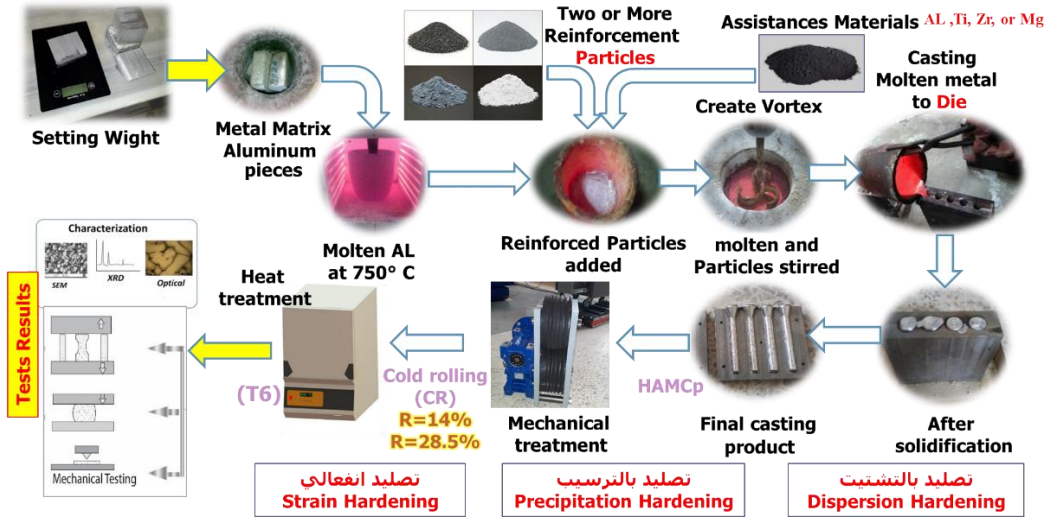
بعد عملية التدعيم الهجين ستكون المسبوكات مُجهدة نتيجة عملية التجمد لذا تم إجراء عملية المُجانسة (Homogenization) (إحدى عمليات التخمير) لجميع مسبوكات الألمنيوم المُدعمة لتحقيق التجانس وإزالة الإجهادات الداخلية قبل أي معالجة لاحقة بالتسخين لدرجة 410C° وإبقاء لزمناً 2^{hour} ثم تبريد بطيء بجو الفرن [6].

بعد الانتهاء من المُجانسة ومن المعالجة الميكانيكية CR (التشكيل بالنسبتين) تم تعريض العينات المدعمة والمشكلة لعملية معالجة حرارية لاحقة T6 وفق البرنامج كما في الشكل التالي (13) :



الشكل (13) برنامج العمل بعد تحقيق التدعيم الهجين (درفلة على البارد لاحقة- معالجة حرارية لاحقة)

وبالتالي يمكن تلخيص خطوات تنفيذ البحث كما في المخطط التالي الشكل (14):



الشكل (14) مخطط تنفيذ البحث الذي أنجز في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

4.3. التجهيزات المستعملة لإجراء الفحوصات والاختبارات الميكانيكية:

وهي موضحة بالشكل (15):

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "



الشكل (14) أجهزة الفحص والاختبارات : (السيكرومتر - المجهر الضوئي -جهاز الشد- جهاز القساوة) في مخبر علم المواد والمعالجات الحرارية بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.

قبل إجراء الاختبارات على العينات المدعمة الهجينة تم تقسيمها إلى خمس مجموعات (A,B,C,D,E) وفقاً لنسب المواد المضافة (نسب التدعيم) وضمن كل مجموعة يوجد ثلاث عينات حسب شروط العمل (A1, A2, A3, B1, B2.....) وبعد ذلك تم تجهيز خمسة عشرة عينة (مع عينات إضافية عند نفس الشروط لتحقيق من النتائج) بعمليات التشغيل للاختبارات الميكانيكية الثلاثة وفق (ASTM standards) كما في الجدول (3) الذي يوضح أنواع وتسميات العينات حسب نسب التدعيم الهجين وشروط العمل المختلفة (عمليات المعالجة الميكانيكية والحرارية اللاحقة):

الجدول(3) أنواع العينات المدعمة الهجينة

نسبة التدعيم المنغفرة (4)%Gr+ (X) %TiO2	Different Temper Conditions		
	المدعمة	المدعمة والمدرفلة %14 R=والمعالجة حرارياً	المدعمة والمدرفلة R=%28.5 والمعالجة حرارياً
PureAL6061	A1	A2	A3
X=3% TiO2	B1	B2	B3
X=6% TiO2	C1	C2	C3

X=9% TiO2	D1	D2	D3
X=12% TiO2	E1	E2	E3

والشكل (16) يوضح عمليات تحضير عينات الاختبارات الميكانيكية والفحص المجهرى:



الشكل (16) عينات الاختبارات الميكانيكية والفحص المجهرى

4. النتائج ومناقشتها (Results and Discussion):

النتائج:

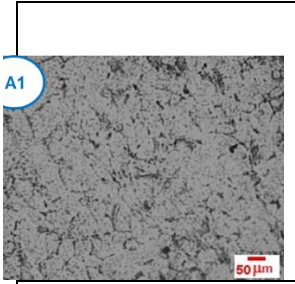
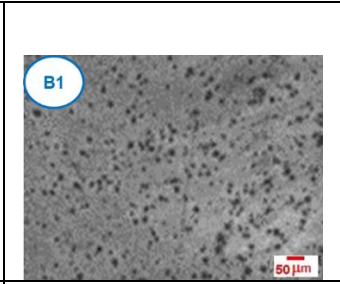
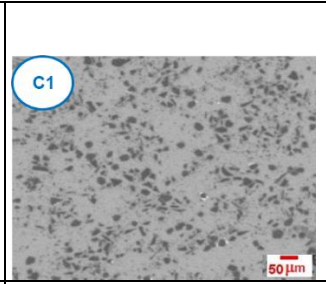
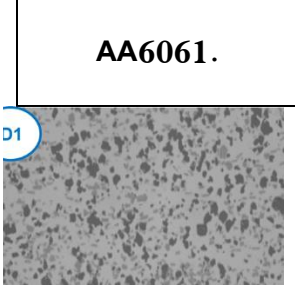
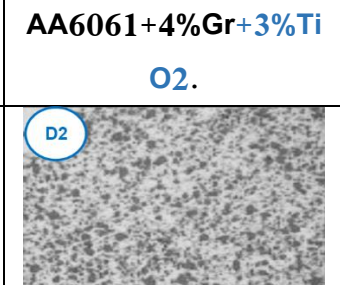
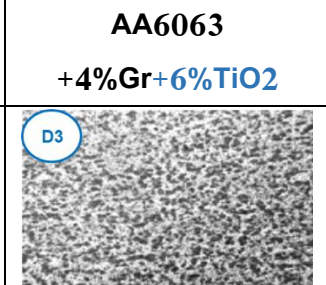
1) نتائج الفحص المجهرى Results of optical Microscope:

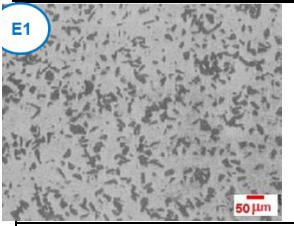
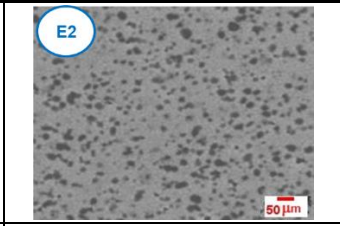
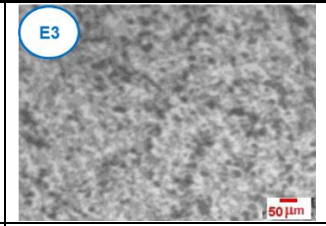
تم شحذ عينات الألمنيوم المدعم الهجين بأوراق صنفرة بدرجات نعومة مختلفة (600, 800, 1200, 1500, 2000) على جهاز الشحذ نصف الآلي بوجود تيار مائي ثم عملية التلميع باستعمال معجون الألماس الصناعي بحجم (0.25 μ m) ثم أجريت عملية غسل للعينات بالماء والكحول ثم التجفيف بالهواء أما إظهار البنية - التخریش - فتتمت بالغمس لمدة حوالي (30sec) على الأقل بمحلول كيلر (Keller) ذو التركيب (ml H2O, 5ml HNO3, 1903ml HCL & 2ml HF) ثم تم فحصها على المجهر الضوئي وبمقدار تكبير قدره 200X وفق المواصفة ASTM-E3.

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (17) حيث توزعت الدقائق الداعمة من الأكسيد والغرافيت بنوعها والعديد من الرواسب ضمن الألمنيوم الأساس بشكل شبه منتظم تقريباً وكان تظهر ضمن البنية بشكل أغزر وأكثر كثافة حيث تزداد المساحة المشغولة فيها على الصور المجهرية -المناطق العاتمة- مع زيادة نسبتها لحد معين [5] [12].

تم استخدام المجهر الضوئي نوع (MEIJI) المجهر بكاميرا رقمية نوع (DCE-2) مُنصبة ببرنامج خاص على جهاز الحاسوب لدراسة البنية المجهرية للعينات (مع برنامج لمعالجة الصور المجهرية Image J).

		
AA6061.	AA6061+4%Gr+3%TiO2.	AA6063+4%Gr+6%TiO2
		
AA6061+4%Gr+9%TiO2	(AA6061+4%Gr+9%TiO2)+14% cold rolled and solution heat treated	(AA6061+4%Gr+9%TiO2)+28.5% cold rolled and solution heat treated

		
<p>AA6061+4%Gr +12%TiO2</p>	<p>(AA6061+4%Gr+12% TiO2) +14%cold rolled and solution heat treated</p>	<p>(AA6061+4%Gr +12%TiO2) +28.5%cold rolled and solution heat treated</p>

الشكل (17) صور المجهر الضوئي توضح توزيع دقائق التددعيم الهجينة ضمن الألمنيوم AA6061 وتأثير المعالجات الميكانيكية والحرارية . نسبة تكبير 200X

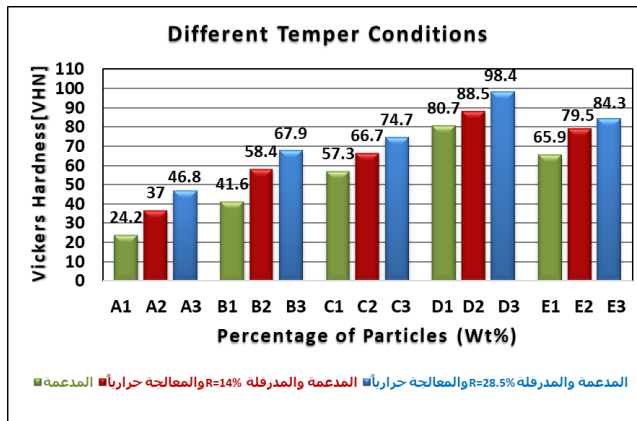
(2) نتائج اختبار القساوة Hardness test Results :

تم إجراء الاختبار على جهاز نوع (HARTEPRÜFER GNEHM:230) جهاز قساوة (Vickers) وفق المواصفة ASTM-E92 حيث طبقت حمولة (4Kg_f) عن طريق هرم رباعي وجوه منتظم بزواوية رأس (136°) لزمن تحميل (Dwell Time= 10sec) وسُجلت لضمان موثوقية القياس أربعة قراءات بشكل عشوائي للقساوة من مناطق مختلفة من كل عينة لتحديد القيمة المتوسطة لقساوة العينات المدروسة.

الهدف من إجراء القساوة مراقبة نجاح التددعيم والمعالجة اللاحقة وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (18) حيث إن ازدادت قساوة الألمنيوم إلى حد معين مع ارتفاع نسبة إحدى الدقائق الداعمة الهجينة القاسية الموزعة ضمنه .

أما المعالجة الميكانيكية (CR) والحرارية (T6) عند نسبة تشكيل (R=14%) فقد ساعدت على الحصول على قيم عالية للقساوة لعينات الألمنيوم المدعم الهجين وزاد التحسن في القساوة مع ارتفاع نسبة التشكيل إلى (R=28.5%) حيث ارتفعت القساوة وبلغت أعلى قيمة (98.4HV) العينة -D3 .

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

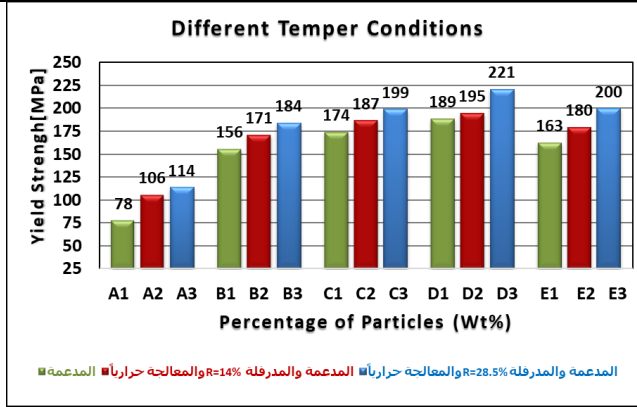


الشكل (18) تأثير التدرج الهجين و المعالجة الميكانيكية الحرارية على قيم القساوة

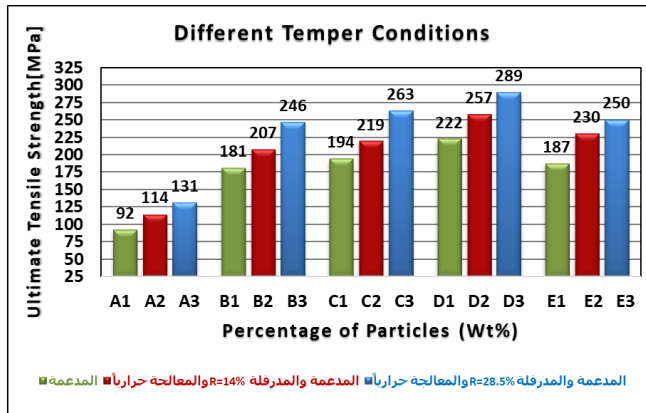
(3) نتائج اختبار الشد Tensile Test Results :

تم إجراء اختبار الشد والضغط على جهاز الشد (TINIUS OLSEN H25KS) المزود براسم بياني إلكتروني لمنحني الشد وبأخذ عينتين لكل قراءة ومن ثم المعدل الوسطي بعد أن تم تحضير جميع العينات حسب المواصفة القياسية (ASTM- B557) بطول قياس (75mm) وقطر (8mm) وبعد الحصول على مخططات الشد للعينات تم التركيز على تحديد قيم (مقاومة الخضوع YS- مقاومة الشد الأعظمية UTS- الاستطالة).

وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (19) (20) (21) حيث إن قيم إجهاد الخضوع ومقاومة الشد العظمى للألمنيوم الأساس زادت مع ازدياد ارتفاع نسبة دقائق الأوكسيد القاسية وبالتالي ارتفاع كمية الدقائق الهجينة الموزعة ضمنه إلى حد معين 13% , وبعدها بدأت قيم خواص الشد بالانخفاض، كما يمكن ملاحظة أن المعالجة الميكانيكية (CR) المتبوعة بالحرارية (T6) عند درجتي التشكيل فقد أدت إلى تحسين قيم إجهاد الخضوع ومقاومة الشد للألمنيوم المدعم الهجين بشكل ملحوظ ودرجة التشكيل الأعلى أعطت خواص أفضل . أما بالنسبة للاستطالة فإنها انخفضت مع ازدياد نسبة الدقائق الداعمة الهجينة وتحسنت قيمتها عند المعالجة الميكانيكية الحرارية ، وكانت قد بلغت أفضل خواص للشد القيم التالية (YS=221MPa&UTS=289MPa) عند نسبة تشكيل (R=28.5%) ونسبة تدعيم (Wt=9%Tio2+4%Gr) العينة -D3- .

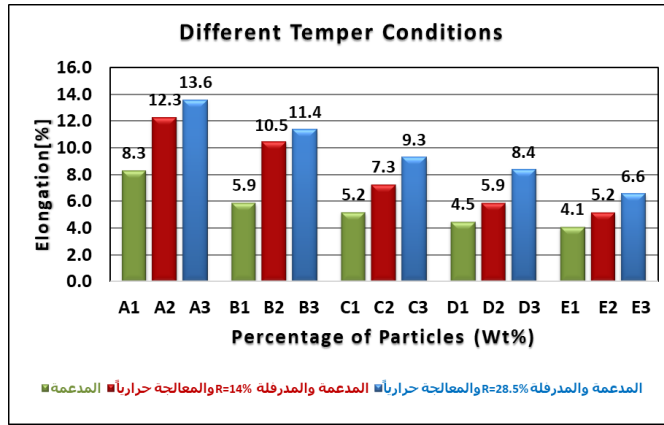


الشكل (19) تأثير التدعيم الهجين و المعالجة الميكانيكية الحرارية على قيم إجهاد الخضوع



الشكل (20) تأثير التدعيم الهجين والمعالجة الميكانيكية الحرارية على قيم مقاومة الشد
الأعظمية

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

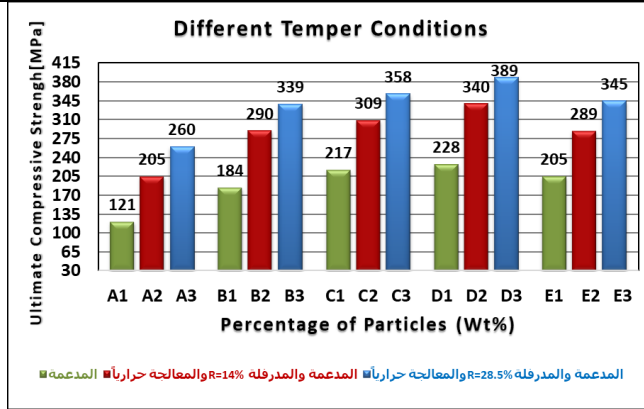


الشكل (21) تأثير التدعيم الهجين و المعالجة الميكانيكية الحرارية على قيم الاستطالة

يمكننا القول أن المعالجة الميكانيكية (CR) والحرارية (T6) ساهمت وأعطت خواص شد أفضل مقارنة بالتدعيم الهجين فقط وحالة عدم التدعيم مع تراجع وانخفاض في المطيلية (معبراً عنها بالاستطالة كنسبة مئوية).

4) نتائج اختبار الضغط Compressive Test Results :

إن اختبار تحديد مقاومة الانضغاط للمعادن المدعمة غاية في الأهمية بالأخص إنه لا يتأثر بمسامية العينات المدروسة مثل اختبار الشد وقد تم إجراء اختبار الضغط على نفس جهاز اختبار الشد (TINIUS OLSEN H25KS) تحت حمولة ضغط تدريجية مطبقة من الجهاز وبعد الحصول على منحنى الضغط وبأخذ عينتين لكل قراءة ومن ثم المعدل الوسطي بعد أن تم تحضير جميع العينات بسطوح مصقولة جيداً لضمان انتظام التحميل وبمقاطع دائرية متناسبة مع ارتفاع العينة حتى لا يحصل التواء أو انبعاج أثناء إجراء الاختبار حسب المواصفة القياسية (ASTME9-95) بطول ($L_0=25mm$) وقطر قيمته ($D_0=15mm$) وبعد الحصول على المخططات للعينات تم التركيز على تحديد قيمة: (مقاومة الانضغاط الأعظمية Ultimate UCS Compressive Strength) الشكل (22).



الشكل (22) تأثير التدعيم الهجين و المعالجة الحرارية الميكانيكية على مقاومة الضغط العظمى

وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (22) حيث إن مقاومة الضغط العظمى (UCS) للألمنيوم الأساس زادت مع ازدياد ارتفاع نسبة دقائق الأوكسيد القاسية وبالتالي ارتفاع كمية الدقائق الهجينة الموزعة ضمنه إلى حد معين 13%. كما يمكن ملاحظة أن المعالجة الميكانيكية (CR) والحرارية (T6) عند درجتي التشكيل فقد أدت إلى تحسن قيمتها لتبلغ (UCS=389MPa) وذلك للعيونة D3- عند نسبة تشكيل (R=28.5%) ونسبة تدعيم (Wt=9%TiO₂+4%Gr).

مناقشة وتفسير النتائج:

المناقشة والتقييم:

توضح الأشكال (23) (24) (25) (26) مقدار التحسن بالخواص الميكانيكية المدروسة للعينات الخمسة عشرة مقدر كنسبة مئوية بعد التدعيم الهجين والمعالجة الميكانيكية الحرارية والذي يُحسب من العلاقة:

على اعتبار: P_0 : قيمة الخاصية لعينة الألمنيوم غير المدعمة في كل مجموعة . P_{New} : قيمة الخاصية لعينة الألمنيوم المدعمة تدعيم هجين والمعالجة ميكانيكياً وحرارياً.

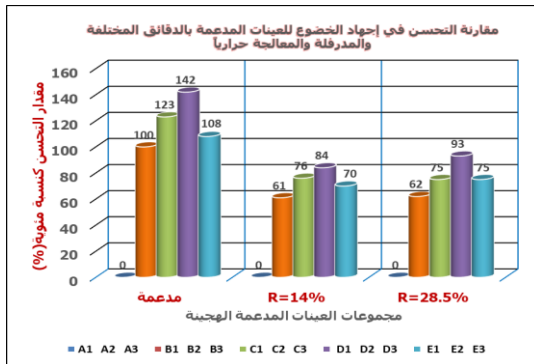
$$(\%) \text{Improving Percentage} = \left[\left(\frac{P_{New} - P_0}{P_0} \right) \times 100 \right] \%$$

"دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة في السلوك الميكانيكي على القساوة و الشد و الضغط لسبيكة الألمنيوم (AL-Mg- Si) المقواة بدقائق مختلفة بتقنية السباكة بالتحريك (SCT) "

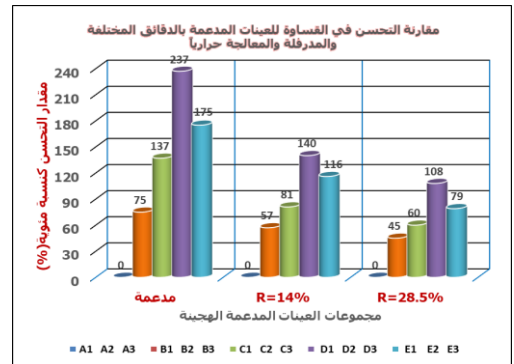
نلاحظ أن حققنا مقدار تحسن في الخواص تراوح بين (30%-237%) حسب شروط العمل في بحثنا وأنه عند نسبة التدعيم (Gr + 4% Tio2 9 %) العينة (D3) عندها كانت أعلى قيم للخواص الميكانيكية وبالتالي أصبح لدينا طيف واسع من العينات بخواص مختلفة تحقق (الكفاءة العالية والتكلفة المخفضة) بما يتلاءم مع التطبيق المطلوب .

وأن التحسن الحاصل في السلوك الميكانيكي عند الخواص المدروسة عند زيادة نسب التدعيم الهجين إلى نسبة معينة وبعد إجراء المعالجة الميكانيكية (CR) و الحرارية (T6) معاً والذي توصلنا له في بحثنا الحالي يتوافق مع ما توصل له العديد من الباحثين بالأبحاث الحديثة ذات الصلة بموضوعنا مع اختلاف نوع دقائق التدعيم ونسبتها وسبائك الألمنيوم الجاري تدعيمها والخواص الميكانيكية المدروسة وطريقة التصنيع ونوع المعالجة اللاحقة المطبقة ومُتغيرتها [10]

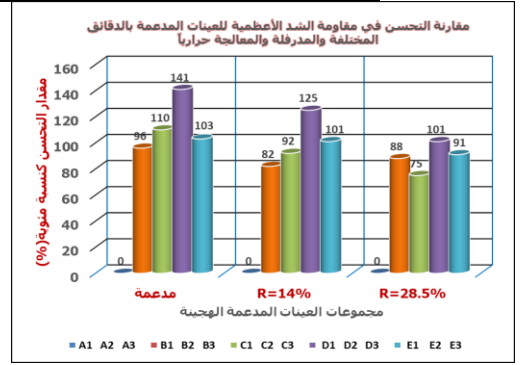
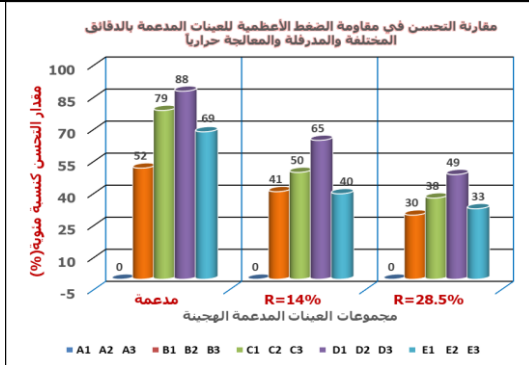
[11] [12] [14].



الشكل (24) مقدار التحسن في (YS)



الشكل (23) مقدار التحسن في (HV)



الشكل (26) مقدار التحسن في (UCS)

الشكل (25) مقدار التحسن في (UTS)

تفسير النتائج:

يتعلق الميكانيزم المسؤول عن تحسن الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم المدعم الهجين بانتظام وحسن توزيع الدقائق الداعمة ضمن الأساس بشكل شبه متجانس بالإضافة لتفاعلها معه وارتباطها والتصاقها به ويمكن تلخيص هذا الميكانيزم في نقاط رئيسية توضح آليات التقوية وتحسن الخواص في (MMCs): [13] [14] :

*وفقاً لنظرية أوران بالتقوية (Orowan Strengthening Mechanism) أو التقسية بالتشتيت للدقائق والتي تعتبر المسؤولة عن زيادة قساوة ومقاومة المعادن والسبائك للتشوه اللدن حيث تعتمد هذه النظرية على مبدأ إعاقة حركة الانخلاعات داخل المعدن الأساس فعندما تتحرك الانخلاعات تحت تأثير إجهاد تصطم بالدقائق القاسية والمشتتة بشكل متجانس ضمن الألمنيوم وفي هذه الحالة بدلاً من أن تقطع الدقائق تضطر الانخلاعات إلى الالتفاف حولها مما يؤدي إلى توليد حلقات من الانخلاعات حول كل جسيم من الدقائق المشتتة، هذه الحلقات تعمل كعوائق إضافية لحركة الانخلاعات اللاحقة وصعوبة مرورها خلال أو حول الدقائق المترسبة مما يزيد بشكل كبير من مقاومة المعدن للتشوه اللدن وكلما كانت الدقائق أصغر وأكثر تباعداً وتوزعاً (تشتتاً) زادت كثافة الانخلاعات (Dislocation density) الناتجة الجديدة (منبع فرانك-ريد) وبالتالي زادت فعالية تقوية أوران في تحسين مقاومة وقساوة المعدن.

*نقل الحمل (Load Transfer): هو المبدأ الأساسي في عمل المواد المركبة فعندما تتعرض لقوة خارجية (قوة شد أو ضغط مثلاً) تقوم مادة الأساس الأضعف بنقل جزء كبير من الحمل إلى الدقائق الداعمة الأكثر قساوة ومقاومة ويتم هذا النقل عبر سطوح التماس البينية بين المكونات مما

يؤدي إلى توزيع الحمل المطبق على هذه السطوح للتغلب على قوة الربط القوية بينها وتحقيق التشوه اللدن وكلما كان الترابط أقوى بين المعدن والدقائق كان نقل الحمل أكثر كفاءة مما يزيد بشكل كبير من مقاومة المعدن المدعم.

*تثبيت حركة الانخلاعات (Dislocations Pinning): حركة هذه الانخلاعات هي المسؤولة عن التشوه اللدن للمعدن إضافة الدقائق الداعمة يؤدي إلى إعاقة أو تثبيت حركة الانخلاعات داخل المعدن فعندما تصطدم هذه الانخلاعات بالدقائق الداعمة فإنها تتوقف أو تغير مسارها مما يزيد من مقاومة المعدن للتشوه اللدن وهذا من شأنه تحقيق زيادة كبيرة في مقاومة و قساوة المعدن المدعم.

* تعميم البنية المجهرية (Microstructural Refinement): تساعد الدقائق الداعمة على تحسين البنية المجهرية للمعدن الأساس بعدة طرق منها:

1. تصغير الحجم الحبيبي: تعمل الدقائق الداعمة المقدمة للمصهور كعوامل وبذور وأنوية تبلور (Nucleating agents) أثناء تصلب المادة و تسهم في تصغير الحجم الحبيبي (decreasing the grain size) مما يؤدي إلى تكوين عدد أكبر من الحبيبات الدقيقة وفقاً لقانون (هول- بيتش Hall-Petch) فإن مقاومة المادة تزداد مع تناقص حجم حبيباتها. تساهم الدقائق في تقليل العيوب الداخلية والمسامية مما يزيد من كثافة المادة وخواصها الميكانيكية.

2. تأثير التصلب بالترسيب Precipitation Hardening: من الممكن أن تتفاعل دقائق التذعيم مع المعدن الأساس لتكوين أطوار مترسبة دقيقة جداً عند حدود الدقائق وداخل المعدن وبالتالي تعمل هذه الرواسب الدقيقة بنفس طريقة الدقائق الداعمة حيث تعيق وتعرقل حركة الانخلاعات و تزيد مقاومة المعدن.

عدا عن الاختلافات الكبيرة بمعامل التمدد الحراري بين الألمنيوم الأساس ودقائق التذعيم الهجينة بنوعيتها وهذا يؤدي إلى عدم تطابق الانفعال الناتج عن الاختلافات بالنقلص الحراري عند السطح البيني بين الأرضية ودقائق التقوية، والمحصلة فقدان التطابق بالإجهاد والذي يولد انخلاعات إضافية .

بينما انخفاض قيم الاستطالة للألمنيوم AA6061 يُعزى إلى وجود الدقائق الداعمة التي تسبب مناطق تركيز للإجهادات الموضعية عند أسطح التماس بين الدقائق والمعدن عدا على أن إضافة

هذه الدقائق يولد مناطق انزلاق (Slip regions) في المعدن أو نتيجة اختلافات كبيرة في السلوك المرن بين المعدن الأساس والدقائق المبعثرة وكون إضافة الدقائق له تأثير مشابه للتشحييم حيث يسهل حركة الدقائق على طول مستويات الانزلاق.

تأثير المعالجة الميكانيكية بالدرفلة على البارد (التصليد الانفعالي): [7] [9] [12] : تحقق تقوية المسبوكات المدعمة وتجعلها أقوى وذات مقاومة أعلى وذلك من خلال إدخال شبكة انخلاعات جديدة في المادة والتي تتداخل مع استمرار حركة الانخلاعات الأساسية وتكديسها وتكون عوائق لحركة بعضها البعض عدا على أنها تساعد على التخلص من المسامية والفراغات الميكروبية الموجودة ضمن البنية وتساعد في تحسين الاستطالة (المطيلية).

تأثير المعالجة الحرارية (التقسية بالترسيب): [5] [6] [12] [13] :

تؤدي إلى تحسين الخواص الميكانيكية السابقة: حيث تؤدي إلى تشكيل رواسب من دقائق -الطور الثاني- المحلول الجامد فوق المشبع Mg_2Si وتوزعها في البنية (وترسب أطوار وسطية أخرى مثل AL_3Ti و AL_4C_3 وهي أطوار قاسية ناتجة عن العمليات الانتشارية لعناصر السبك (Mg, Si) بعد المعالجة الحرارية المحلولة والتعتيق) وحصول تفاعلات مع الانخلاعات مما يؤدي إلى مقاومة حركة الانخلاعات المتحركة وفرملتها وبالتالي زيادة مقاومة السبيكة المدعمة وقساوتها.

من الجدير ذكره أن انخفاض الخواص الميكانيكية لبعض العينات المدروسة حتى مع ازدياد نسبة الدقائق الداعمة يعود بشكل رئيسي إلى انخفاض كفاءة عملية المزج والخلط Difficult to Stir and Mix وبالتالي ضعف توزع هذه الدقائق ضمن المعدن الأساس وميلها للتأكسد وللكتل والتجمع والطفو على سطح المصهور.

5. الاستنتاجات والتوصيات للأعمال المستقبلية:

الاستنتاجات:

1. توصلت الدراسة إلى تحديد الشروط العملية لتحضير مادة مركبة معدنية (HAMCP) من أساس سبيكة الألمنيوم (AA6061) مدعمة تدعيماً هجيناً بنوعين مختلفين من الدقائق القاسية بتقنية السباكة بالتحريك (SCT).

2. تحسن وارتفاع الخواص الميكانيكية له صلة وثيقة بضبط نسب التدعيم وبالاختيار المناسب للعمليات اللاحقة وشروطها (عمليات التشكيل والمعالجة الحرارية) بما يتلاءم مع الاستخدام المطلوب.
3. حسنت الدرفلة على البارد (CR) المتبوعة بالمعالجة الحرارية (T6) وفق الشروط المحددة الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم AA6061 المدعم الهجين عند نسبي التشكيل المختلفتين وكانت النتائج أفضل عند نسبة التشكيل الأعلى (R=28.5%) ممثلة بالعينة - العينة (D3)-.
4. في ضوء الدراسة الحالية أدت زيادة نسبة دقائق أوكسيد التيتانيوم (TiO2) المُضافة حتى (9 wt%) مع ثبات نسبة الغرافيت (Gr) إلى زيادة القساوة للألمنيوم الأساس (AA6061) بالمقارنة مع المعدن الأساس (AA6061) غير المدعم .
5. تحسنت خواص الشد والضغط (إجهاد الخضوع - مقاومة الشد العظمى-مقاومة الضغط) للألمنيوم الأساس AA6061 مع انخفاض في المطيلية (ممثلة بالنسبة المئوية للاستطالة) بالمقارنة مع (AA6061) غير المدعم مع ازدياد نسبة دقائق الأوكسيد المُضافة حتى (9 wt%) مع ثبات نسبة الغرافيت المُضافة.
6. أفضل قيم للخواص الميكانيكية للألمنيوم المدعم الهجين تم الحصول عليها عند نسب تدعيم (9 wt% TiO2 + 4% Gr) - العينة (D1)- وإن زيادة نسبة دقائق الأوكسيد فوق (9 wt%) مع ثبات نسبة الغرافيت المُضافة أدى إلى انخفاض في الخواص.

التوصيات للأعمال المستقبلية:

1. في مجال توصيف سلوك هذا النوع من المواد نوصي بتوسيع النتائج لتشمل دراسة خواص ميكانيكية أخرى للألمنيوم بعد التدعيم والمعالجة الميكانيكية الحرارية اللاحقة المُتبعة بالدراسة (مقاومة التعب والزحف.....) بالإضافة إلى دراسة خواص الاهتراء والاحتكاك والصمود الحراري عند درجات حرارة مرتفعة .
2. دراسة تأثير عمليات معالجة لاحقة أخرى سواء ميكانيكية أو حرارية أو كليهما ودراسة تأثير تغيير بارامتراتهما وشروطها على خواص المعدن المدعم الهجين المحضر.

3. العمل على تصنيع الألمنيوم المدعم الهجين بطرق وتقنية تصنيع حديثة أخرى (تكنولوجيا المساحيق أو السباكة بالضغط).
4. من الممكن استخدام دقائق داعمة نانوية في تحقيق التدعيم الهجين للألمنيوم واستخدام ومقارنة سبائك أخرى من الألمنيوم مع ما تناولناه في دراستنا الحالية.

6. المراجع:

- [1] SURAPPA, M 2003- **Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities**. Vol. 28, Parts 1 & 2, Printed in S⁻adhan⁻a, First Edition, India, 319–334 p.
- [2] Chawla, N and Chawla, K, 2013, **Metal Matrix Composites**. Springer Science +Business Media New York Journal of Metals Vol. 2, Second Edition USA, 1-381p.
- [3] Stojanović, B and Ivanović ,L 2015-**APPLICATION OF ALUMINIUM HYBRID COMPOSITES IN AUTOMOTIVE INDUSTRY**. Vol.22, Issue 3 Ver, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME) Tehnički vjesnik, Serbia, 247-251 p.
- [4] Saho,M. Rout, Naveed ,I, and Patra,D 2015-**Design and Fabrication of a Stir Casting Furnace Set-Up**. Vol. 5, Issue 7, (Part - 3) July, Manabhanjan Sahoo et al. Int. Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), India, 80-88p.
- [5] Saravanakumar, A and Sasikumar ,P, 2018-**Flexural behavior and Microstructure of hybrid Metal Matrix Composites**. Vol.9, Issue 10, Journal of Materials and Environmental Sciences (JMES), India, 2951-2955p.
- [6] Wakeel, A and Pasha, R.A, 2019-**PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ALUMINUM AL METAL MATRIX COMPOSITE REINFORCED WITH SiC /Al₂O₃ AND METAL PARTICLES USING STIR CASTING PROCESS**. Vol. 71, Pakistan Journal of Science (APICEE), Pakistan, 266-272 p.
- [7] Nazeer, A and Safiulla ,M, 2020-**Mechanical and Wear Properties of Cold Extruded Al6063 Metal Matrix Alloy Reinforced with Silicon Carbide, Alumina and Cerium Oxide**. Vol.9, Issue 3, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), India, 4091-4097p.

[8] Qudeiri, A. Abdudeen,A and Ziout, A, 2021- **A Review on AA 6061 Metal Matrix Composites Produced by Stir Casting.** Journal of Materials MDPI Vol. 14, 175, January , Switzerland,1-22p.

[9] Jun-Ren Zhao, Fei-Yi Hung, Bo-Jou Chen, 2021- **Effects of heat treatment on a novel continuous casting direct rolling 6056 aluminum alloy: cold rolling characteristics and tensile fracture properties.** journal of materials research and technology Vol. 11, Taiwan,535-547p.

[10] Haripriya ,M and Rao ,N, 2022-**Fabrication and Tensile, Compressive, Flexural Mechanical Testing of Aluminium Metal Matrix Composites Reinforcement with TiO₂.** Vol.7, No 1, International Journal of Mechanical Engineering Kalahari Journals, India, 2523-2531p.

[11] Khosroshahi,N, Mousavian, R., and Brabazon, D., 2023 - **Mechanical properties of rolled A356 based composites reinforced by Cu-coated bimodal ceramic particles,** Vol (10) , Journal of School of Mechanical & Manufacturing Engineering, Dublin City University, Ireland, 110-122p.

[12] Kirman, K., Suhartono, H., vano , O., and Irawadi, Y., 2024 - **Enhancing Aluminum Alloys for High-Strength Electrical Conductor with Nanoparticle Reinforcement,** Vol (11) (03), Issue 03, Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy, Indonesia, 2720-2727p.

[13] Liang-Yu Chen , Peng, Q Lina Zhang and Lai- Zhang,C 2024-**An overview of additively manufactured metal matrix composites: preparation, performance, and challenge.** Vol.6, International Journal of Extreme Manufacturing (IJEM), China, 1-45p.

[14] Yakoub ,G and Bakrey ,M, 2025-**Optimizing Mechanical Properties of Al-6061 Alloy with Varied Nanoparticle Reinforcements: A Study Using Titanium Dioxide and Silicon Carbide Nanoparticles.** Vol.6, Issue 1, International Journal of Engineering Sciences and Applications (SVU), Egypt, 39-45p.

دراسة تأثير درجة الحرارة ورقم رينولدز على نمو الطبقة الحدية في الأنابيب المتقاربة عند سرعات جريان منخفضة باستخدام CFD

د. مي نهاد سعيد *

الملخص

تمّ في هذا البحث إجراء نمذجة ومحاكاة لجريان الهواء الساخن ضمن الأنابيب المتقاربة ثلاثية الأبعاد ودراسة نمو الطبقة الحدية عند سرعات جريان منخفضة باستخدام تقنية (CFD) واستخدام برنامج (ANSYS Fluent 2021R1)، وتمّ دراسة تغيير الطبقة الحدية قرب الجدران عند عوامل مختلفة ومتغيرة كدرجة حرارة الجريان وزاوية ميل الأنبوب المتقارب ورقم رينولدز وتبيان تأثير كل من العوامل السابقة على سماكة الطبقة الحدية، لاختيار التصميم الأمثل للأنبوب المتقارب الذي تتحقق عنده السرعة العظمى عند مقطع الخروج.

تشير النتائج إلى أنّ سماكة الطبقة الحدية تصل إلى قيمة أعظمية على ارتفاع 10% من الارتفاع الكلي للأنبوب، ثمّ تعود بالانخفاض تدريجياً حتى مخرجه، كما لوحظ انخفاض سماكة الطبقة الحدية بانخفاض زاوية الميل للفوهة إذ تنخفض سماكة الطبقة الحدية بمقدار 12.5% عند انخفاض زاوية الميل ضمن المجال (68-84) degree، كما تبين أنّ سماكة الطبقة الحدية تنخفض بمقدار 10.7% عند انخفاض درجة الحرارة الهواء ضمن المجال $^{\circ}C(35-95)$ ، كما تُشير النتائج تأثير رقم رينولدز على سماكة الطبقة الحدية إذ تبين انخفاض سماكة الطبقة الحدية بمقدار 50.5% عند ازدياد رقم رينولدز ضمن المجال $(4*10^4-9*10^5)$.

* مدير أعمال - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة اللاذقية - اللاذقية - سوريا.

الكلمات المفتاحية: الطبقة الحدية، الأنابيب المتقاربة، زاوية الميل، رقم رينولدز، درجة الحرارة.

Study the Effect of Temperature and Reynolds Number on the Boundary Layer Growth in Convergent Pipes at Low Flow Speeds Using CFD

* **Dr. Mai Nuhad Saaed**

Abstract

In the research, the modeling and simulation of flow of hot air within three dimensions convergent pipes was conducted, and studied the boundary layer growth at low flow speeds by using (CFD) technique and (ANSYS Fluent 2021R1) Program, and studied the change of the boundary layer near the walls under variable and different factors as flow temperature and the inclination angle of convergent pipe and Reynolds number, and demonstrate the impact of each of the previous factors on the boundary layer thickness, to choose the optimal design of the convergent pipe which is achieved at it maximum speed at the outlet section.

The results indicate the boundary layer thickness reaches to maximum value at 10% of the total height of the convergent pipe, then

* **Works Manager - Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Lattakia University, Lattakia, Syria.**

decreases gradually up to the outlet section, and was observed the decrease of the boundary layer thickness with decreasing the inclination angle of convergent pipe, the boundary layer thickness decreases such 12.5% at decreasing of the inclination angle within the range (84-68)degree, as was shown that the boundary layer thickness decreases such 10.7% at decreasing of the air temperature within the range (95-35)°c, and the results indicate the effect of Reynolds number on the boundary layer thickness, where it was found that the boundary layer thickness decreased such 50.5% as Reynolds number increased within the range ($4*10^4$ – $9*10^5$).

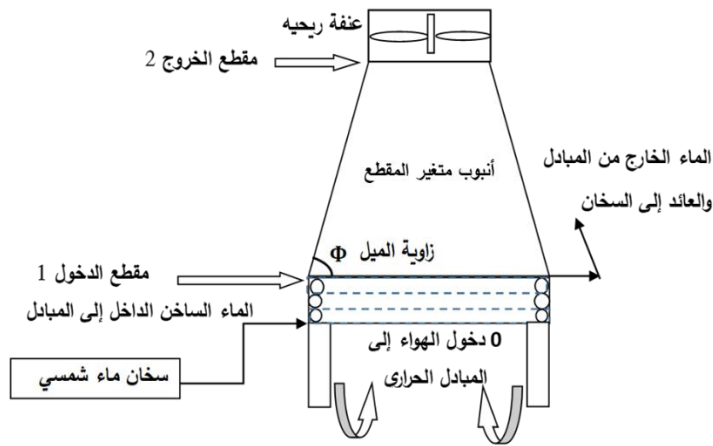
Key Words: Boundary Layer, Convergent Pipes, Inclination Angle, Reynolds Number, Temperature.

1. مقدمة

تستخدم الأنابيب المتقاربة في زيادة سرعة جريان المائع المار عبرها في الجريان التحت صوتي [1]، إلا أنّ تشكل الطبقة الحدية بالقرب من جدار الأنبوب في الجريانات الداخلية ضمن الأقفية والأنابيب يؤثر على سرعة المائع (fluid speed) المار ضمنها، حيث يحدث تدرج بالسرعة عند كل مقطع من مقاطع الأنبوب، وتكون السرعة عند الجدار مساوية للصفر (وفق شرط الالتصاق)، وتزداد تدريجياً لتصل إلى أعلى قيمة لها عند محور الأنبوب [2]، لذلك فإنّ دراسة الطبقة الحدية ونموها أمر بالغ الأهمية في الدراسات الحديثة لما لها من تأثير سلبي على سرعة الجريان وطاقته.

يهدف البحث إلى دراسة نمو الطبقة الحدية وتغيرها على امتداد جدار الأنبوب لجريان الهواء داخل الأنابيب المتقارب، ودراسة تأثير مختلف العوامل عليها كدرجة الحرارة ورقم رينولدز وزاوية الميل وذلك بهدف الحصول على أعلى سرعة عند مقطع الخروج للأنبوب وبالتالي أعلى استطاعة كهربائية للعنفة الريحية.

بناءً على ما تقدم ولتحقيق أهداف البحث تم اعتماد أنبوب متقارب في منشأة تشغيل العنفة الريحية في المناطق ذات سرعة الرياح المنخفضة [3]، كما هو موضح في الشكل (1)، والتي تتكون من الأقسام التالية: سخان ماء شمسي، مبادل حراري ذو جريان متقاطع (هواء - ماء)، مروحة تعمل بالطاقة الشمسية لتأمين سرعة ابتدائية للهواء تتوضع عند مدخل المبادل الحراري، أنبوب متغير المقطع (متقارب)، عنفة ريحية.



الشكل (1) مخطط منظومة تشغيل العنفة الريحية

يتم تسخين الماء بواسطة سخان الماء الشمسي إذ يشكل الماء الوسيط الحراري الساخن حيث يتم إرساله إلى مبادل حراري (ماء-هواء) يقوم بتسخين الهواء المدفوع بواسطة المروحة إلى المبادل الحراري [4]، إذ ترتفع درجة حرارته ويندفع نحو الأعلى باتجاه الأنبوب المتقارب وتزداد سرعته حتى تصل إلى أعلى سرعة عند مخرج الأنبوب، حيث يصطدم بشفرات العنفة الريحية ويؤدي إلى تدويرها وتوليد الطاقة الكهربائية.

اتجهت مجموعة من الأبحاث نحو إجراء تحليل عددي باستخدام برنامج ANSYS FLUENT لسلك الهواء المتدفق عبر أنبوب متقارب والذي يستخدم لتوجيه الهواء باتجاه شفرات العنفة [5]، وأجرى الباحثون مقارنة بين الاستطاعة الناتجة للعنفة الريحية بوجود وغياب الفوهة المتقاربة، توصل الباحث BAZGIR أنه باستخدام الأنبوب المتقارب تحقق ازدياد في السرعة الأعظمية بمقدار 60% أدى إلى الازدياد في الاستطاعة المنتجة بمقدار 5 أضعاف، تناولت أبحاث أخرى نمذجة حقل الجريان باستخدام (ANSYS FLUENT) ضمن الفوهات عند سرعات جريان مرتفعة [6]، وتطوّرت إلى دراسة عدد تقسيمات الشبكة الرقمية (Mesh) في نموذج المحاكاة على حقل الجريان، توصل الباحث SURYA وآخرون أنه بزيادة عدد تقسيمات الشبكة الرقمية (مع الأخذ بعين الاعتبار ارتفاع أول خلية في الشبكة الرقمية) يزداد رقم ماخ وينخفض رقم رينولدز، واتجه الباحث KEBRIAEE وآخرون نحو دراسة تأثير تدرج الضغط على نمو الطبقة الحدية لجريان ضمن أنبوب [7]، إذ تبيّن من خلال الدراسة انخفاض سماكة الطبقة الحدية اللابعدية δ_z / D (وهي تمثل نسبة سماكة الطبقة الحدية إلى قطر الأنبوب) بوجود تدرج في الضغط في الأنبوب على كامل طول الأنبوب.

تناول الباحثون WITT و RUZICKA وآخرون دراسة الطبقة الحدية باستخدام ANSYS FLUENT وتمت دراسة تأثير ارتفاع أول خلية في الشبكة الرقمية وعدد الطبقات الجدارية على سماكة الطبقة الحدية [9] [8]، أظهرت النتائج أنه للحصول على نتائج دقيقة عند دراسة الطبقة الحدية يجب جعل قيمة $(y^+ < 1)$ ، وبالتالي يصبح البعد بين عقد الشبكة صغيراً جداً، الأمر الذي يؤدي إلى الحصول على نتائج دقيقة لسماكة الطبقة الحدية وبازدياد عدد الطبقات الجدارية حتى 15 يؤدي للحصول على نتائج أدق منها في حال عدد طبقات جدارية منخفض، ألفت أبحاث أخرى الضوء على دراسة الطبقة الحدية المضطربة في الفوهات المتقاربة، وتمت دراسة تأثير رقم رينولدز على سماكة الطبقة الحدية [10]، إذ توصل الباحث BROUGERDI وآخرون أنه بزيادة رقم رينولدز تنخفض سماكة الطبقة الحدية عند زاوية مخروط محددة (40 degree)، واتجهت أبحاث أخرى نحو دراسة الطبقة الحدية المضطربة لجريان انضغاطي عالي السرعة في الفوهات المتقاربة الثلاثية الأبعاد، وتمّ من خلالها دراسة نمو الطبقة الحدية وتأثير مختلف البارامترات [11]، إذ توصل الباحث BROUGERDI وآخرون أنه بانخفاض زاوية

المخروط تزداد سماكة الطبقة الحدية عند قيمة محددة لرقم رينولدز ($Re=5*10^4$)، وقامت أبحاث أخرى بدراسة سلوك الطبقة الحدية بالقرب من جدران الأنبوب المتقارب [12] ، توصل الباحث FARHANIEH وآخرون إلى أنّ سماكة الطبقة الحدية تصل إلى قيمة أعظمية بالقرب من مدخل الفوهة، ثم تعود بالانخفاض بشكل تدريجي بالقرب من المخرج عند قيم مختلفة لزوايا الميل ورقم رينولدز.

تناولت الدراسات السابقة نمذجة الجريانات ضمن الفوهات ثنائية وثلاثية الأبعاد ودراسة سلوك الطبقة الحدية لجريانات قابلة للانضغاط عالية السرعة وتأثير مختلف العوامل على سلوك الطبقة الحدية، إلا أنّها لم تتطرق إلى دراسة عديدة لتأثير درجة الحرارة ورقم رينولدز للجريان وزاوية الميل للفوهة على نمو الطبقة الحدية باستخدام (ANSYS FLUENT) ضمن الفوهات المتقاربة ثلاثية الأبعاد ذات الأبعاد الكبيرة عند سرعات جريان منخفضة وغير قابلة للانضغاط (إنّ جريان الهواء غير قابل للانضغاط لأنّ سرعة الهواء أصغر من (100m/sec) [13] إذ أنّ أعلى قيمة تصل لها سرعة الهواء لدوران العنفة الريحية عند مقطع الخروج (10m/sec).

2. هدف البحث

يهدف البحث إلى دراسة نمو الطبقة الحدية ودراسة تأثير درجة حرارة الجريان ورقم رينولدز وزاوية ميل الأنبوب المتقارب على نمو الطبقة الحدية، عن طريق حل معادلات الجريان (معادلة الاستمرار، معادلة الحركة نافييه ستوكس، معادلة الطاقة) باستخدام تقنية CFD للحصول على أعلى سرعة عند مقطع الخروج للأنبوب المتقارب.

3. مواد وطرق البحث

تمّ في هذا البحث التحليل الدقيق للطبقة الحدية باستخدام علم ديناميك الموائع الحسابي CFD، وهو العلم الذي يختص بالطرق الرياضية العددية المستخدمة في حل معادلات الجريان وانتقال الحرارة، إذ تم إجراء عملية المحاكاة العددية اللازمة حيث تم بناء النموذج الهندسي وبناء الشبكة الرقمية Mesh، ومن ثم تحويل جملة المعادلات التفاضلية النازمة للجريان إلى جملة من المعادلات الجبرية الخطية، ويتم حلها بالطرق الرياضية المختلفة بشكل تكراري باستخدام برنامج ANSYS FLUENT2021 R1.

4. النتائج والمناقشة

تمّ تصميم الأنبوب المتقارب المبين في الشكل (1) وذلك وفق القيم الاسمية للعنفة الريحية عند مقطع الخروج لمنشأة تشغيل العنفات الريحية، والتي تتضمن سرعة العنفة الريحية $V_2=10\text{m/sec}$ وقطرها $D_2=4\text{m}$ ، سرعة الهواء الشاقولية الصادرة عن المروحة عند مدخل المبادل 2m/s ، وبالعودة إلى أطلس الرياح في شهر تموز في المنطقة الساحلية صيفاً في القطر العربي السوري [14] تم اختيار سرعة الرياح الخارجية 2m/s ودرجة حرارة الهواء الجوي 35°C (والجدير بالذكر أنه تم اختيار بارامترات الرياح عند شهر تموز لأنّ سرعة الرياح منخفضة ودرجة حرارة مرتفعة، حيث تستخدم منشأة تشغيل العنفة الريحية لتشغيل العنفات الريحية عند سرعة رياح منخفضة [3]).

ويتطبيق معادلة الاستمرار بين مقطعي الدخول والخروج للمبادل الحراري (0,1) (المبادل الحراري المتوضع عند مدخل الأنبوب المتقارب، وعلى اعتبار أن المبادل الحراري يقوم بتسخين الهواء إلى الدرجة 95°C) يتم الحصول على السرعة عند مخرج المبادل الحراري V_1 [15]:

$$\rho_0.V_0.A_0 = \rho_1.V_1.A_1; A_0 = A_1$$

$$\Rightarrow \rho_0.V_0 = \rho_1.V_1$$

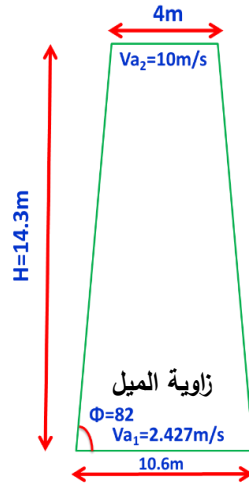
كما تمّ حساب قطر مقطع الدخول للأنبوب المتقارب وفق معادلة الاستمرار بين مقطعي الدخول والخروج للأنبوب (على اعتبار جريان الهواء الساخن ضمن الأنبوب غير قابل للانضغاط وبالتالي: $\rho_1 = \rho_2$)، تصبح معادلة الاستمرار كالتالي: $V_1.A_1 = V_2.A_2$ ، أما ارتفاع الأنبوب يعطى

$$H = \left(\frac{D_1 - D_2}{2} \right) \tan \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \quad [16]:$$

حيث: D_1, D_2 : قطري مقطع الدخول والخروج للأنبوب المتقارب بالـ m.

φ : زاوية ميل الأنبوب المتقارب بالـ degree.

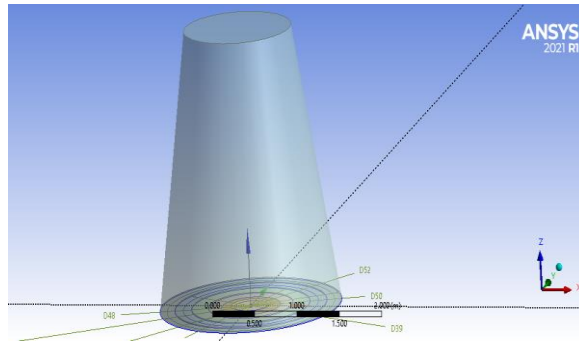
يوضح الشكل (2) أبعاد الأنبوب المتقارب:



الشكل (2) أبعاد الأنابيب المتقارب

1.4 المجسم الهندسي

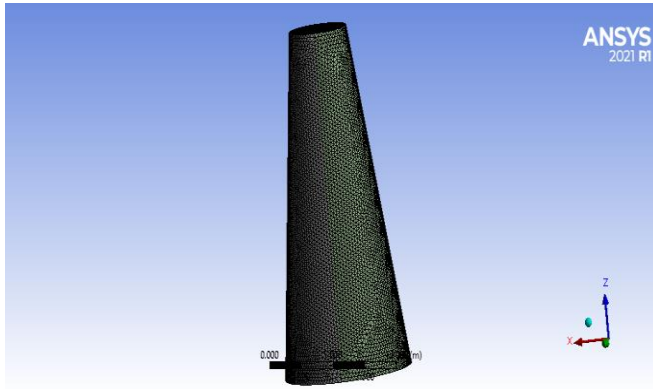
هو الحيز الذي يشغله المائع ضمن حسابات الـ CFD [17]، حيث تمّ رسم الأنابيب المتقارب كنموذج ثلاثي الأبعاد (3Dimensions) للنموذج المدروس وفق الأبعاد المبينة في الشكل (2) باستخدام تعليمة (Geometry) في برنامج (Ansys Fluent) مع الأخذ بعين الاعتبار وجود المبادل الحراري عند مقطع الدخول للأنبوب، كما هو موضح في الشكل (3):



الشكل (3) نموذج الأنابيب المتقارب ثلاثي الأبعاد

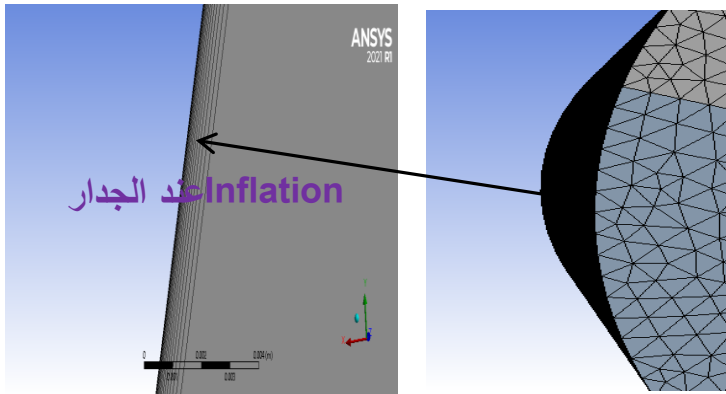
2.4 الشبكة الرقمية

يتطلب الحل باستخدام الـ CFD بناء شبكة من الخلايا تغطي كامل المجال المدروس، ويتم إجراء الحل الرقمي لمعادلات الجريان ضمن هذه الخلايا، وتمّ تصميم الشبكة الحاسوبية للأنبوب المتقارب باستخدام تعليمة Mesh في برنامج Ansys Fluent، وتمّ اختيار الشبكة منتظمة لتحقيق دقة عالية في الحل [18] كما هو مبين في الشكل (4):



الشكل (4) الشبكة الرقمية للأنبوب المتقارب

تمّ استخدام تعليمة (inflation) لدراسة الطبقة الحدية عند الجدار، حيث تكون عدد الطبقات الجدارية الأعظمي (Maximum Layers=15) نسبة التنامي (Growth Rate=1.2) كما هو مبين في الشكل (5):



الشكل (5) الطبقات الجدارية عند جدار الأنبوب المتقارب

3.4 مرحلة المعالجة

يتم في هذه المرحلة تحويل جملة المعادلات التفاضلية الحاكمة للجريان إلى جملة من المعادلات الجبرية الخطية تعرف هذه العملية بالتقطيع (Discretization) ويتم حلها بالطرق الرياضية المختلفة بشكل تكراري، وهذا يعود إلى الطبيعة غير الخطية للمعادلات [19]، وتم تحديد الشروط الحدية (Boundary Conditions) إذ تم اعتبار الجريان غير مستقر لأن سرعة الرياح الخارجية متغيرة مع الزمن، وتم تعريف السرعة عند مقطع الدخول للفوهة ومقطع الخروج للمبادل الحراري (مع الأخذ بعين الاعتبار أن الجريان قسري بسبب وجود مروحة عند مقطع الدخول للمنشأة كما ذكر في المقدمة)، كما تم تحديد عدد التكرارات والشروط الابتدائية ونسبة التقارب للحل $1e-6$ ونموذج الاضطراب والشروط الابتدائية [20]، يبين الجدول (1) مدخلات برنامج ANSYS FLUENT:

الجدول (1) مدخلات برنامج ANSYS FLUENT

Models	Energy: On Viscous: (k-ε (2eqa) Realizable)
Boundary Conditions	Inlet: Velocity Inlet Internal: Interior Surface Body Outlet: Pressure Outlet Wall: Walls, Thermal: Heat Flux=0
Residual	
Monitors	Convergence Absolute Criteria $1e-6$
Solution Initialization	Method Initialization: Standard Initialization Compute from: Inlet

4.4 التحقق من دقة الحل Validation

تم التحقق من دقة الحل بهدف الحصول على نتائج دقيقة ونسبة خطأ ضئيلة وذلك عند زاوية محددة (82degree) للفوهة ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°C وفق محورين:
1. التحقق وفق دقة الشبكة الرقمية (Mesh Independence)

2. التحقق عن طريق مقارنة النتائج لـ CFD للسرعة عند مقطع الخروج مع السرعة التحليلية (النظرية) عند مقطع الخروج وهي سرعة دوران العنفة، وإيجاد نسبة الخطأ.

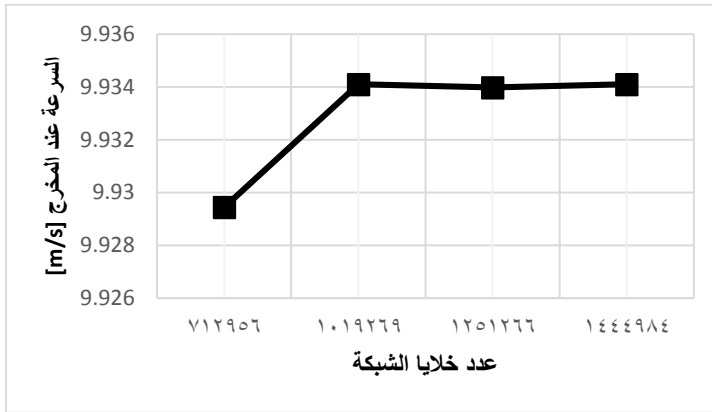
أولاً: اختبار دقة الشبكة Mesh independence

تمّ اختبار دقة الشبكة عند أربعة أنواع من الشبكات [21] باختلاف عدد الخلايا والعقد (شبكة خشنة، وشبكة متوسطة الخشونة، وشبكة ناعمة، وشبكة عالية النعومة)، وتم إيجاد السرعة عند مقطع الخروج باستخدام برنامج ANSYS FLUENT، كما هو مبين في الجدول (2):

الجدول (2) قيم السرعة مع تغير عدد خلايا الشبكة

عدد خلايا الشبكة	السرعة عند مقطع الخروج وفق (CFD) [m/s]
712956	9.929435
1019269	9.9341
1251266	9.93398
1444984	9.9341

يوضح الشكل (6) العلاقة بين السرعة عند مقطع الخروج وعدد الخلايا الشبكية:



الشكل (6) علاقة السرعة عند مقطع الخروج مع عدد خلايا الشبكة

نلاحظ من الشكل (6) أن الحل يصبح مستقراً جداً عند زيادة عدد خلايا الشبكة الرقمية من الشبكة الناعمة إلى الشبكة عالية النعومة.

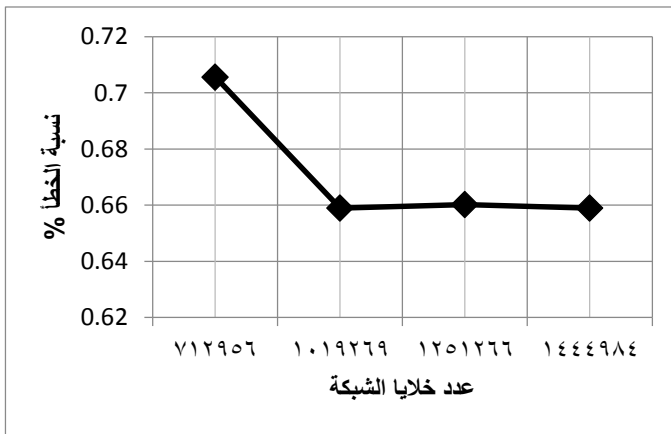
ثانياً: اختبار دقة الحل Validation

تم التحقق عن طريق المقارنة بين السرعة الناتجة عند مقطع الخروج وفق CFD والسرعة النظرية التحليلية [22]، كما هو مبين في الجدول (3) إذ يبين الجدول نسبة الخطأ المئوية بين القيمة النظرية والتحليلية للسرعة عند مقطع الخروج:

الجدول (3) قيم السرعة مع تغير عدد خلايا الشبكة

عدد خلايا الشبكة	السرعة عند مقطع الخروج وفق (CFD) [m/s]	السرعة التحليلية عند مخرج الأنابيب المتقارب [m/s]	نسبة الخطأ %
712956	9.929435	10	0.70565
1019269	9.9341	10	0.659
1251266	9.93398	10	0.6602
1444984	9.9341	10	0.659

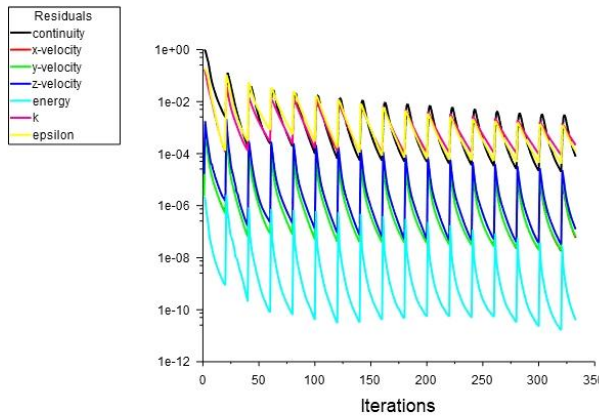
يبين الشكل (7) علاقة عدد خلايا الشبكة مع نسبة الخطأ المئوية:



الشكل (7) علاقة نسبة الخطأ مع عدد خلايا الشبكة

نلاحظ من الشكل (7) عند مقارنة قيمة السرعة عند مقطع الخروج وفق CFD والسرعة التحليلية 10m/s تقارب نسبة الخطأ عند الانتقال من الشبكة الناعمة إلى الشبكة الأكثر نعومة كما أن نسبة الخطأ ضئيلة لم تتجاوز 1% وبذلك تم تحقيق اختبار الحل. لذلك نستنتج مما سبق أنه تم اختبار الشبكة كما تم التحقق من دقة الحل وفق CFD لذلك فإن نموذج المحاكاة والشبكة صحيح.

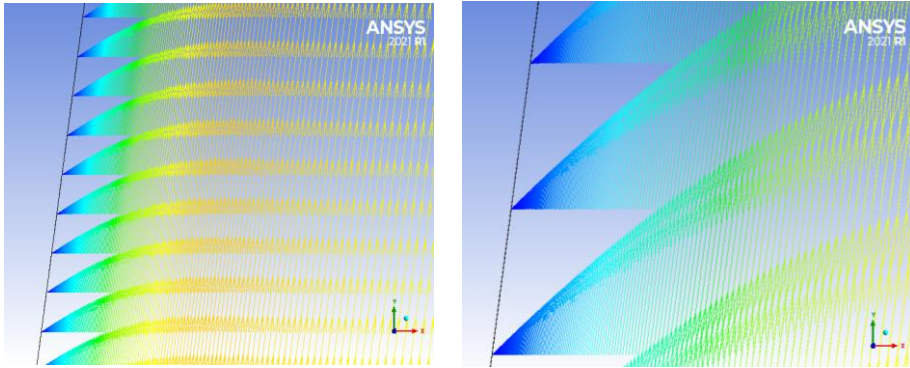
5.4 مخططات تقارب الحل: يبين الشكل (8) مخططات تقارب الحل لمعادلات الجريان:



الشكل (8) مخططات تقارب الحل

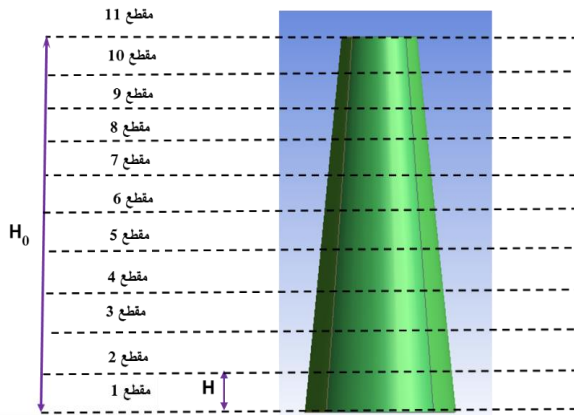
6.4 دراسة الطبقة الحدية

تتكون الطبقة الحدية قرب جدار الأنبوب نتيجة تدرج السرعة عند كل مقطع من مقاطع الأنبوب إذ تبدأ السرعة عند الجدار صفر (نتيجة شرط الالتصاق) ثم تزداد تدريجياً حتى تصل إلى قيمة أعظمية (كما هو مبين في الشكل (9)) [2]:



الشكل (9) تغير أشعة السرعة ضمن الأنابيب المتقارب وعند الجدار

وتمّ رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية (δ) على كامل جدار الأنابيب المتغير المقطع باستخدام (Ansys Fluent)، إذ تمّ تمثيل الطبقة الحدية بالقرب من جدار الأنابيب المتقارب، وتمّ أخذ عدة مقاطع للأنبوب ابتداءً من مقطع الدخول (inlet) حتى مقطع الخروج (outlet)، كما هو مبين في الشكل (10) [23]:

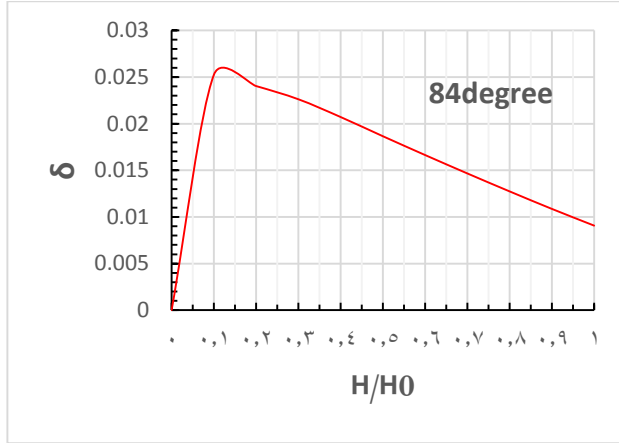


الشكل (10) المقاطع المأخوذة من الأنابيب المتقارب

1.6.4 دراسة الطبقة الحدية عند زوايا مختلفة

تمّ رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية (δ) على كامل جدار الأنابيب باستخدام (ANSYS FLUENT) عند زوايا ميل مختلفة: (84-78-72-68)degree وعند قيمة محددة

لرقم رينولدز 4.3×10^5 ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°C ، كما هو موضح في الأشكال (11-12):

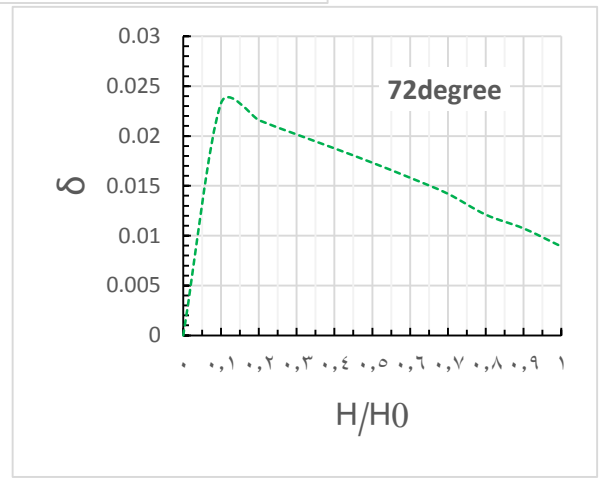
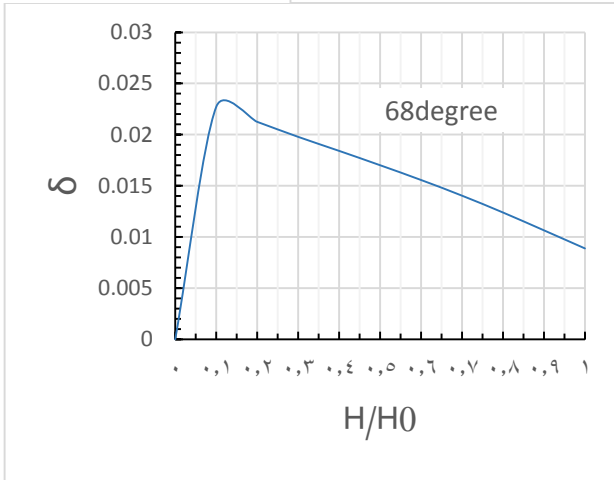
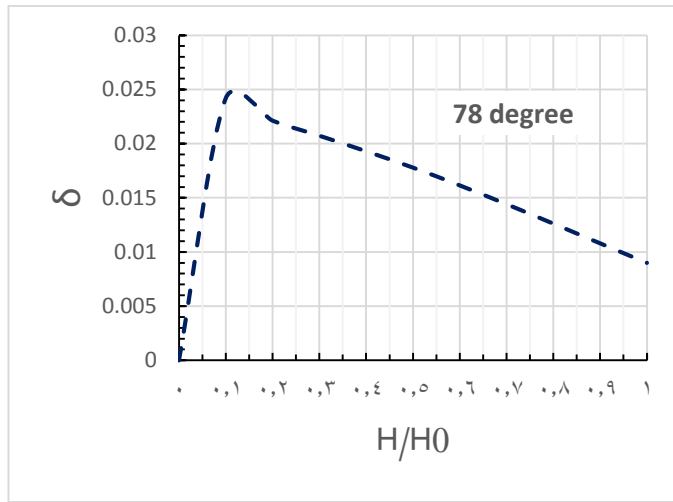


الشكل (11) تغير سماكة الطبقة الحدية اللاحقة عند الزاوية 84degree

تمّ تمثيل محور الإحداثيات الأفقي بشكل لا بعدي، إذ يمثل نسبة بُعد كل مقطع من المقاطع السابقة (الموضحة في الشكل (10)) H عن مقطع الدخول إلى كامل ارتفاع الأنبوب H_0 مع العلم أنّ H: هو ارتفاع متغير ضمن النطاق $[0 - H_0]$ ، وأما بالنسبة للمحور الشاقولي يمثل سماكة الطبقة الحدية اللاحقة وهي سماكة الطبقة الحدية منسوبة إلى نصف قطر مقطع الدخول للأنبوب.

بناءً على ما تقدم تم إيجاد تغير سماكة الطبقة الحدية عند زوايا ميلان مختلفة كما هو مبين في الشكل (12):

دراسة تأثير درجة الحرارة ورقم رينولدز على نمو الطبقة الحدية في الأنابيب المتقاربة عند سرعات جريان منخفضة باستخدام CFD

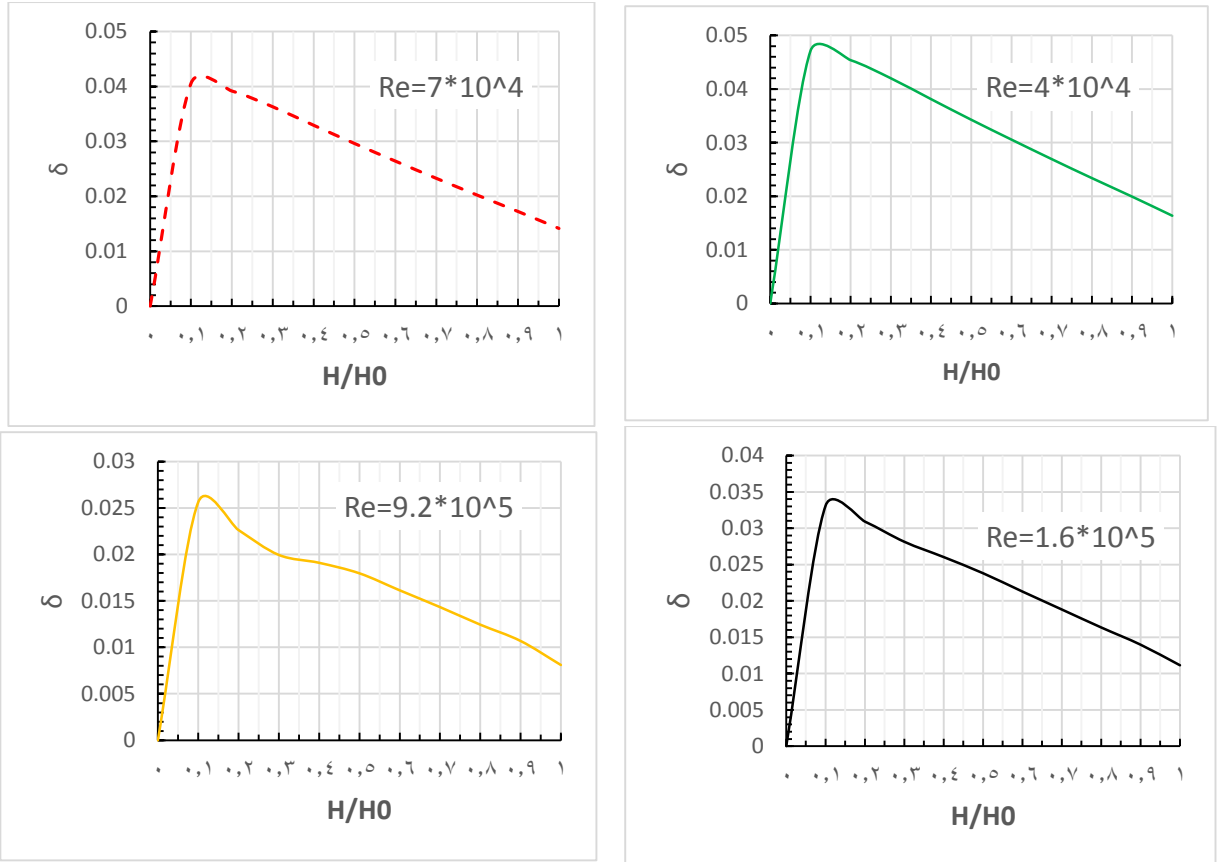


الشكل (12) تغير سماكة الطبقة الحدية اللابعدية عند زوايا ميل مختلفة

نلاحظ من المخططات السابقة أنّ سماكة الطبقة الحدية اللابعدية عند زوايا الميل المختلفة تصل إلى أعلى قيمة لها على ارتفاع (10%) من الارتفاع الكلي للأنبوب، ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى أخفض قيمة عند مقطع الخروج، وهذا محقق لأن سماكة الطبقة الحدية تتناسب عكساً مع سرعة الجريان، وبالتالي كلما اتجه تيار الهواء الساخن باتجاه مقطع الخروج ازدادت قيمة السرعة نتيجة تضيق المقطع وبالتالي تتخفض سماكة الطبقة الحدية [13].

2.6.4 دراسة الطبقة الحدية عند قيم مختلفة لرقم رينولدز

تم رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية (δ) على كامل جدار الأنبوب عند قيم مختلفة لرقم رينولدز وذلك عند زاوية ميل محددة للفوهة 82° ، كما هو موضح في الشكل (13):



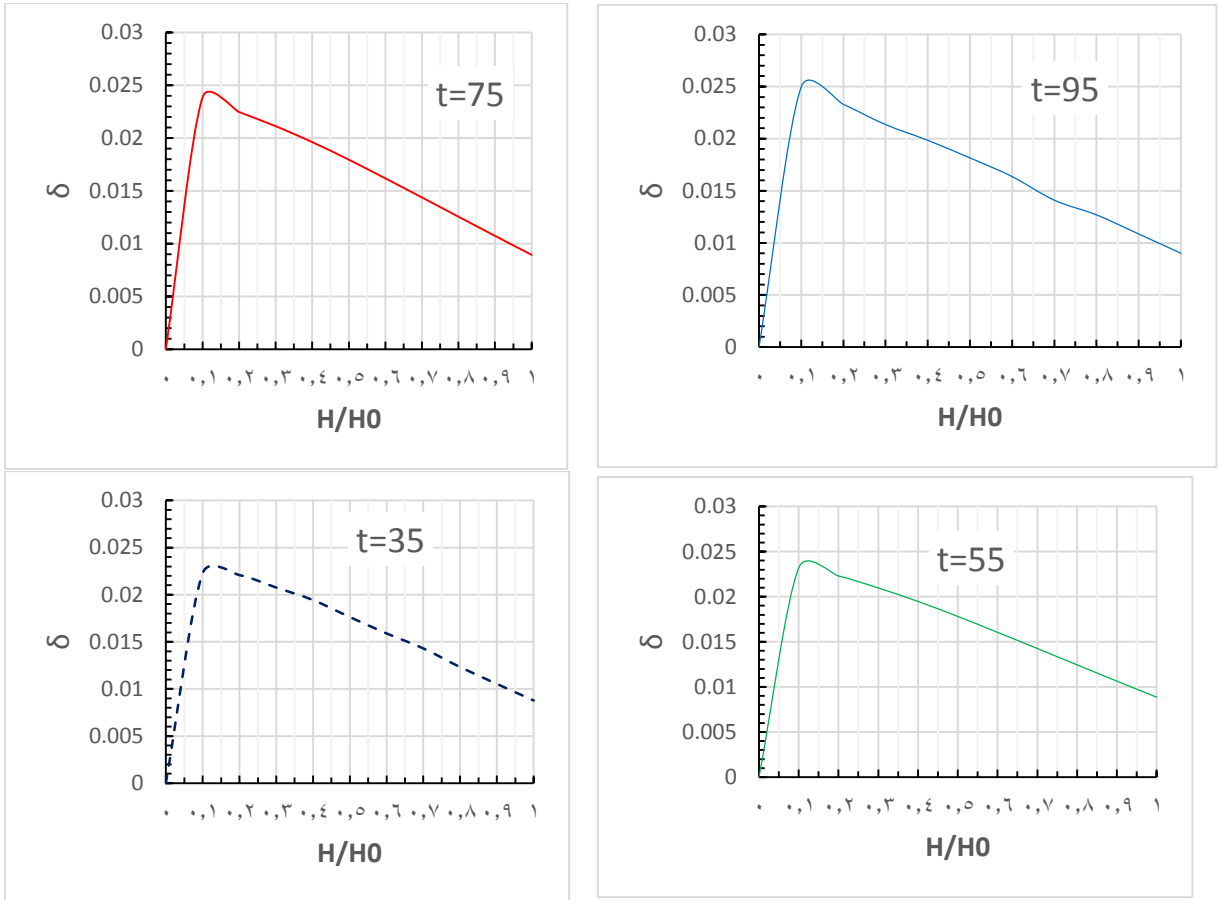
الشكل (13) تغير سماكة الطبقة الحدية عند أرقام رينولدز مختلفة

نلاحظ من الشكل (13) الذي يضم مخططات تغير سماكة الطبقة الحدية عند قيم مختلفة لرقم رينولدز أن سماكة الطبقة الحدية تبلغ أعلى قيمة على ارتفاع 10% من الأنبوب ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى قيمة صغرى عند مقطع الخروج.

3.6.4 سماكة الطبقة الحدية عند درجات حرارة مختلفة

دراسة تأثير درجة الحرارة ورقم رينولدز على نمو الطبقة الحدية في الأنابيب المتقاربة عند سرعات جريان منخفضة باستخدام CFD

تم رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية (δ) على كامل جدار الأنبوب عند درجات حرارة مختلفة $(35-55-75-95)^{\circ}\text{C}$ وعند قيمة محددة لزواوية ميل الفوهة 82° ، كما هو موضح في الشكل (14):

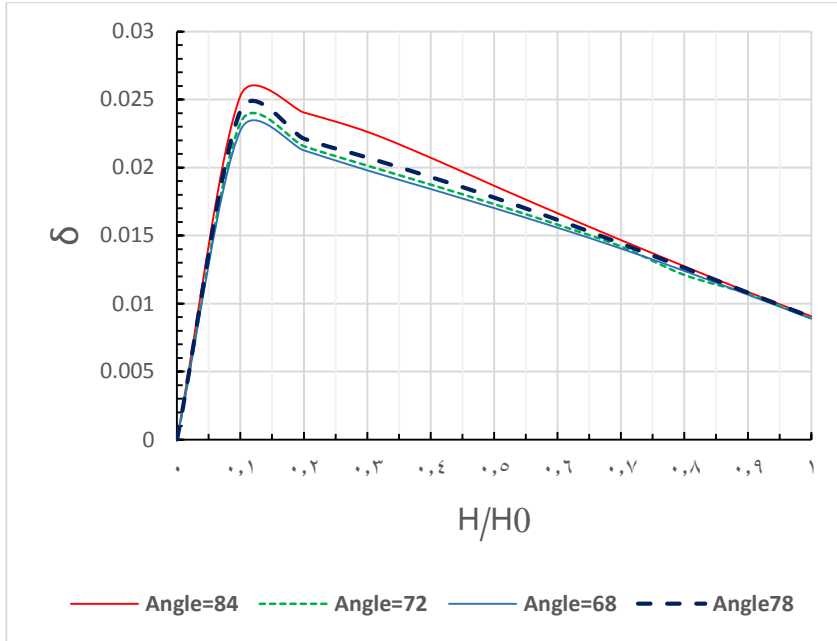


الشكل (14) تغير سماكة الطبقة الحدية عند درجات حرارة مختلفة

نلاحظ من الشكل (14) أن سماكة الطبقة الحدية تصل إلى قيمة أعظمية بالقرب من مدخل الأنبوب ثم تعود بالانخفاض تدريجياً.

4.6.4 مناقشة تأثير زاوية الميل

لتبيان تأثير زاوية الميل على سماكة الطبقة الحدية عند منطقة الجدار، تمّت مقارنة النتائج التي حصلنا عليها عند زوايا ميل مختلفة، إذ تمّ رسم مخطط تغيير سماكة الطبقة الحدية عند زوايا ميل مختلفة وعند قيمة محددة لرقم رينولدز 4.3×10^5 ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°C ، كما هو مبين في الشكل (15):

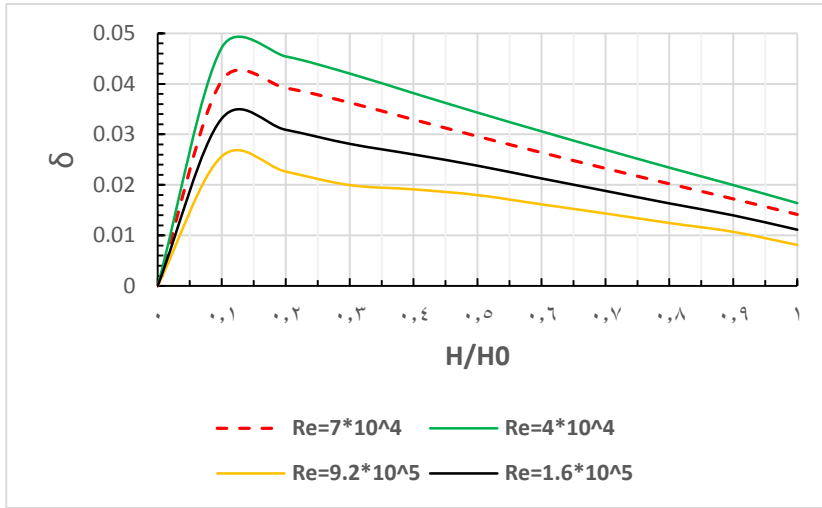


الشكل (15) تغيير سماكة الطبقة الحدية عند زوايا ميل مختلفة

نلاحظ من الشكل (15) أنه بانخفاض زاوية ميل الأنبوب تتخفّض سماكة الطبقة الحدية، كما نلاحظ أنّ سماكة الطبقة الحدية تصل إلى أعلى قيمة على ارتفاع 10% من الارتفاع الكلي للأنبوب ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى أخفض قيمة عند مخرج الأنبوب وذلك عند قيم مختلفة لزوايا الميل.

5.6.4 مناقشة تأثير رقم رينولدز

لدراسة تأثير رقم رينولدز على سماكة الطبقة الحدية تمّت مقارنة النتائج التي حصلنا عليها عند قيم مختلفة لرقم رينولدز عند زاوية ميل محددة للنفوثة 82° ، إذ يوضح الشكل (16) تغيير سماكة الطبقة الحدية تبعاً لرقم رينولدز للجريان:

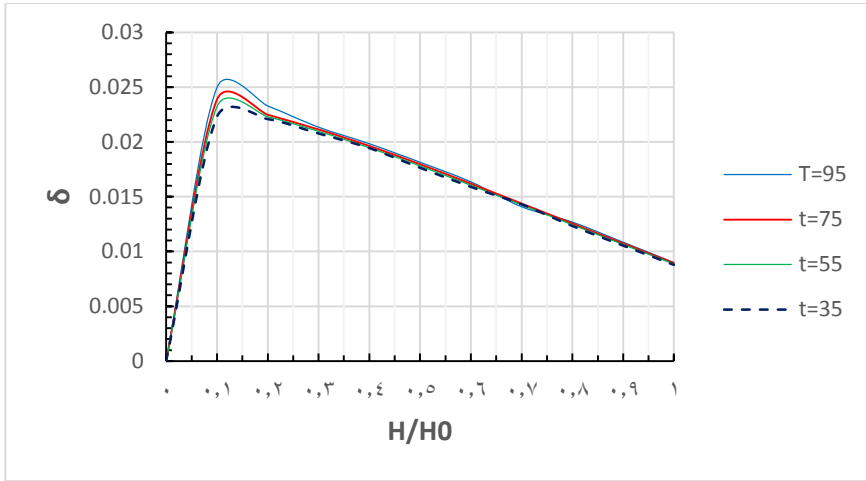


الشكل (16) تغير سماكة الطبقة الحدية مع تغير رقم رينولدز

نلاحظ من المخطط أنه بزيادة رقم رينولدز تنخفض سماكة الطبقة الحدية بالقرب من جدار الأنبوب، وهذا محقق بسبب التناسب العكسي بين سماكة الطبقة الحدية ورقم رينولدز.

6.6.4 مناقشة تأثير درجة الحرارة

لتبيان تأثير درجة الحرارة على سماكة الطبقة الحدية، نرسم تغير سماكة الطبقة الحدية عند زاوية ميل للفوهة 82degree وقيم درجات الحرارة (35-55-75-95)°c كما هو مبين في الشكل (17):



الشكل (17) تغير سماكة الطبقة الحديدية مع تغير درجة حرارة الجريان

نلاحظ من المخططات أن سماكة الطبقة الحديدية تتخفّف بانخفاض درجة حرارة الجريان، وهذا محقق نظراً أنّ اللزوجة الحركية للهواء تتخفّف بانخفاض درجة الحرارة وبالتالي تتخفّف سماكة الطبقة الحديدية [24].

5. الاستنتاجات والتوصيات

من خلال ما تقدّم خلص الباحث إلى مجموعة من الاستنتاجات التالية:

1. تمّ التحقق من نموذج المحاكاة العددية للأنبوب المتقارب الذي تمّ إنشاؤه عن طريق برنامج ANSYS FLUENT بسبب تحقق اختبار دقة الشبكة واختبار دقة الحل بسبب وجود تطابق كبير بين القيم النظرية (التحليلية) والقيم الناتجة من الـ CFD.
2. تبين من خلال حقل أشعة السرعة أن السرعة تبدأ من الصفر عند جدران الأنبوب ثم تزداد تدريجياً حتى تصل إلى قيمة أعظمية عند محور الأنبوب.
3. تبين من المخططات السابقة التي تُظهر سلوك الطبقة الحديدية على كامل جدار الأنبوب المتقارب عند قيم مختلفة لزاوية ميل الفوهة وقيمة محددة لرقم رينولدز 4.3×10^5 ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°C ، أنّ سماكة الطبقة الحديدية تصل إلى قيمة أعظمية على ارتفاع (10%) من الارتفاع الكلي للأنبوب، ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى قيمة أصغرية عند مقطع الخروج للأنبوب.

4. تبين أنّ سماكة الطبقة الحدية تصل إلى قيمة أعظمية على ارتفاع (10%) من الارتفاع الكلي للأنبوب، ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى قيمة أصغر عند مقطع الخروج للأنبوب، وذلك عند قيم مختلفة لرقم رينولدز وعند قيم مختلفة لدرجة الحرارة وقيمة محددة لزواوية الميل 82degree،
5. تبين وجود تأثير لزواوية ميل الأنبوب على سماكة الطبقة الحدية عند قيمة محددة لرقم رينولدز 4.3×10^5 ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°C ، حيث لوحظ انخفاض سماكة الطبقة الحدية بمقدار (12.5%) عند انخفاض زاوية ميل الأنبوب بمقدار 16degree.
6. تبين وجود تأثير لرقم رينولدز على سماكة الطبقة الحدية، حيث لوحظ انخفاض سماكة الطبقة الحدية بمقدار 50.5% عند ازدياد رقم رينولدز ضمن المجال $(4 \times 10^4 - 9.2 \times 10^5)$.
7. إنّ درجة حرارة الهواء المار ضمن الأنبوب المتقارب تؤثر على سماكة الطبقة الحدية، إذ تنخفض سماكة الطبقة الحدية بمقدار 10.7% عند انخفاض درجة الحرارة ضمن المجال $(95-35)^\circ\text{C}$.
8. تبين من خلال البحث أهمية تقنية الـ CFD في إعطاء تصوراً مسبقاً عن سلوك المنظومة، والتي تمثل في البحث منشأة تشغيل العنفات الريحية من خلال دراسة تأثير مختلف العوامل على نمو الطبقة الحدية والذي ينعكس بدوره على السرعة عند مقطع الخروج للمنظومة، والتي تؤثر بدورها على الاستطاعة الكهربائية الناتجة للعنفة الريحية عند مقطع الخروج.

6. المراجع

- [1] POTTER, M. WIGGERT, D 1991-MECHANICS OF FLUIDS. Prentic-Hall International Editions, UK London, 692p.
- [2] Çengel, Y. A 2014- FLUID MECHANICS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, THIRD EDITION, McGraw-Hill, New York, 776p.
- [3] HASAN, A. ALI, M. ISSA, H. SAAEED, M 2022 An Analytical Study of Construction for Working Wind Turbines in the Areas of Low Speed of

- the Wind, Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series, Vol. 44, No. 2, 29-42. (In Arabic)
- [4] HASAN, A 2008-Heat and Mass Transfer. Tishreen University, Syrian Arab Republic, 789p. (In Arabic)
- [5] BAZGIR, A, S 2017 Theoretical Results for Utilizing Nozzle Between The Wind-Way And Wind Turbine In Roof of The Buildings - Wind Speed Increase For Wind Turbine To Produce Electricity, Journal of Applied Mechanical Engineering, United States, 5.
- [6] SURYA, K, P. SADHASHIVA, K 2016 Simulation of Convergent Divergent Rocket Nozzle using CFD Analysis, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, India, Vol.13 NO.4, 58-65.
- [7] KEBRIAEE, A. FARHANIEH, B. FIROOZABADI, B 2011 Analytical investigation of boundary layer growth and swirl intensity decay rate in a pipe, Arch Appl Mech, Iran, 14p.
- [8] Witt, P. Khan, M. Brooks, G 2007 CFD modelling of heat transfer in supersonic nozzles for magnesium production, JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 11.
- [9] RUZICKA, P 2018 Modeling of Boundary Layer and the Influence on Heat Transfer with Help of CFD, 17th Conference of Power System Engineering, Thermodynamics and Fluid Mechanics, Vol. 2047, No.1, 12.
- [10] BROUGERDI, A. N. KEBRIAEE, A 2012 Simulation of Turbulent Swirling Flow in Convergent Nozzles, Scientia Iranica Sharif University of Technology, Vol.19, No. 2, 258-265.
- [11] BROUGERDI, A. N. KEBRIAEE, A 2010 Pressure Loss of Turbulent Swirling Flow in Convergent Nozzles, International Conference On Mechanical Engineering ISME2010 -3101, Iran, Vol. 18, 6.
- [12] FARHANIEH, B. FIROOZABADI, B 2011 Turbulent flow in converging nozzles part one: boundary layer solution, Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), Berlin Heidelberg, 645-662.
- [13] Mahmoud, H 2007- Gas Dynamics. Tishreen University, Syrian Arab Republic, 619p. (In Arabic)
- [14] Wind Atlas in Syrian Arab Country.
- [15] HASAN, A 2013-Thermodynamic /2/. Tishreen University Publications, Syrian Arab Republic, 730p. (In Arabic)

- [16] HASAN, A 2011 Improving the Effectiveness of Wind Turbine Performance on the Coast, Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series, Vol. 33, No. 6, 16. (In Arabic)
- [17] Magoulès, F 2011 Computational Fluid Dynamics, CHAPMAN & HALL/CRC, France, 407.
- [18] MADHU, B. P. SAMEER, S. KUMAR, M. K. MANI, G. M 2017 CFD Analysis of Convergent-Divergent and Contour Nozzle, International Journal of Mechanical Engineering and Technology, Vol.8, No.8, 670-677.
- [19] Jones, W, P. Launder, B 2016 The prediction of linearization with a two-equation model of turbulence, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 15, 301-314.
- [20] Tu, J. Yeoh, G. Liu, C 2019 Computational fluid dynamics: A practical approach, Elsevier, Third Edition, 978.
- [21] SRINIVAS, G, RAKHAM, B 2017 Experimental and numerical analysis of convergent nozzle, Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering, India, 14.
- [22] Khallouf, A. Mohamad, N. al-Muhammad. A 2021 Computation Ship Resistance Using Computational Fluid Dynamics (CFD), Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series, Vol. 43, No. 2, 77-87. (In Arabic)
- [23] HASAN, A. ALI, M. ISSA, H. SAAEED, M 2023 Numerical Study of Thermal Boundary Layer of the Hot Air Flow in Convergent Pipes Using Computational Fluid Dynamics CFD, journal of Al Baath University-Syria-Homs, 23. (In Arabic)
- [24] ROGERS, G. MAYHEW, Y 2014-Engineering Thermodynamics Work and Heat Transfer. PEARSON, Fourth Edition, 711p.