مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية والكهربائية والمعلوماتية

مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 4

1448 هـ - 2026 م

الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص **المدير المسؤول عن المجلة**

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

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	عضو هيئة التحرير

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 : 2138071 31 963 ++

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

. البريد الالكتروني : 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.
- **اذا كان الباحث طالب دراسات عليا:**

يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقته على النشر في المجلة.

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:**

يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.

- **اذا 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.

- **اذا 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 17.5×25 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

ـ كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي ـ 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 وورد 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 ـ الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة ـ سنة النشر ـ وتتبعها معترضة (–) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة ـ دار النشر وتتبعها فاصلة ـ 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:

ـــ بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة ـــ المجلد والعدد (كتابة مختزلة) وبعدها فاصلة ـــ 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 الف ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .**
3. **دفع رسم نشر (200) مئتا 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

اسم البحث	اسم الباحث	الصفحة
دراسة تأثير اختلاف تصميم مقاطع الجدران في المباني المطبوعة بطابعة ثلاثية الأبعاد على الأداء الحراري للبناء	د.م. أنس حسن قرمو	40-11
"مقارنة تأثير بعض بارامترات التصنيع على القساوة ومقاومة الشد لسبيكة الألمنيوم (AA7075) المُدعمة بالدقائق والمُحضرة بتقنيتي السباكة بالمزج (SCT)والسباكة بالعصر(SQT) باستخدام طريقة تاغوشي(Taguchi) "	د.م. معتز الحصريه	70-41
دراسة تأثير إضافة فرشة أنابيب مياه بلاستيكية في الأداء الحراري لمجفف شمسي للبصل	علي عبدو د. محمد باكير	102-71
تحسين كفاءة الاستطاعة والمساحة لدارة جامع كامل مصممة باستخدام ترانزستورات الأثر الحقلي ذات الأنابيب النانوية الكربونية (CNTFETs).	م. هلال احمد تكروني د. مجد الدين العلي	136-103

دراسة تأثير اختلاف تصميم مقاطع الجدران في المباني المطبوعة بطابعة ثلاثية الأبعاد على الأداء الحراري للبناء

د.م. أنس قرمو

الملخص

في ظل التوجه العالمي نحو دمج تقنيات البناء الحديثة مع تطبيق المعايير الهندسية الفعالة لترشيد الطاقة برزت طرق جديدة وحديثة لإشادة الأبنية توفر الوقت وتؤمن إمكانيات تحكم في البناء لا توفرها الطرق التقليدية الأخرى، ومن أهم هذه الطرق هي طريقة البناء باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، التي يمكن من خلالها التحكم بأدق التفاصيل الهندسية لتحقيق أفضل النتائج من كافة النواحي. عند تطبيق هذه التقنيات، يجب أن تحقق الأبنية أهم المعايير البيئية ومن أهمها شروط الكفاءة الحرارية.

تم في هذا البحث إجراء دراسة حرارية لستة نماذج جدران وفق الشروط التصميمية الحرارية لمدينة حمص، يحتوي خمساً منها على فجوات ذات شكل هندسي محدد وبأبعاد وشروط محددة، شكل الفجوات المدروسة هي (مثلثي – دائري – بيضوي – سداسي – مربع) بالإضافة لنموذج مصمت لا يحتوي على فجوات كنموذج مرجعي. تم إجراء الدراسة بطريقة النمذجة العددية على مساحة $1\ m^2$ باستخدام برنامج نمذجة حاسوبي هو ANSYS وقد تم تصميم النماذج المدروسة باستخدام برنامج SOLID WORKS ثم تصديرها لبرنامج النمذجة. بعد الانتهاء من النمذجة العددية للتصاميم المدروسة، أعطت النمذجة النتائج التالية: حقق النموذج الجدار ذو الفجوات البيضوية وفراً طاقياً على باقي النماذج ذات الفجوات بنسب % 15.54 و % 21.36 و % 18.28 و % 22.19 على كل من المثلثي والدائري والسداسي والمربع على الترتيب، وحققت جميع النماذج ذات الفجوات (المثلثي والدائري والبيضوي و السداسي والمربع) وفراً طاقياً على النموذج المصمت المرجعي بلغت نسبه % 42.97 و % 38.75 و % 51.83 و % 41.06 و 38.09 % على الترتيب، وبذلك كان النموذج ذو الفجوة البيضوية هو الأفضل بين النماذج المدروسة.

الكلمات المفتاحية: طباعة الجدران ثلاثية الأبعاد– فجوات الجدران – النمذجة الحرارية – الوفر الطاقي.

Studying the effect of varying wall section designs in 3D-printed buildings on the building's thermal performance

Dr.Anas Qarmo

Abstract

With the global trend towards integrating modern construction technologies with the application of efficient engineering standards for energy conservation, new and modern building construction methods have emerged. These methods save time and provide construction control capabilities not offered by traditional methods. One of the most important of these methods is construction using 3D printing technology, which allows for precise control over engineering details to achieve optimal results in all aspects. When applying these technologies, buildings must meet the most important environmental standards, most notably thermal efficiency requirements.

This research conducted a thermal study of six wall models according to the thermal design requirements of Homs city. Five of these models contained cavities of a specific geometric shape with defined dimensions and conditions. The shapes of the studied cavities were triangular, circular, oval, hexagonal, and square. A solid model without cavities was included as a reference model. The study was conducted using numerical modeling on a 1 m² area using the ANSYS computer modeling software. The studied models were designed using SOLIDWORKS software and then exported to the modeling software. After completing the numerical modeling of the studied designs, the modeling yielded the following results: The oval gap wall model achieved energy savings over the other gap models by percentages of 15.54%, 21.36%, 18.28%, and 22.19% for the triangular, circular, hexagonal, and square models, respectively. All gap models (triangular, circular, oval, hexagonal, and square) achieved energy savings over the reference solid model by percentages of 42.97%, 38.75%, 51.83%, 41.06%, and 38.09%, respectively. Thus, the oval gap model was the best among the studied models.

Key Words: 3D wall printing - wall gaps - thermal modeling - energy savings..

1.مقدمة:

شـهد قطاع البناء خلال العقد الأخير تحولاً جذرياً بسـبب ادخال تقنيات الطباعة ثلاثي الأبعاد في مجال التشييد البناء، حيث لم تعد الطباعة مقتصرة على النماذج الأولية والأجزاء الصـناعية الصـغيرة، بل امتد تطبيقها ليشـمل إنشـاء وحدات سـكنية ومبانٍ متكاملة.

ظهرت أولى المحاولات التجريبية للطباعة ثلاثي الأبعاد في البناء في بدايات العقد الأول من القرن الحادي والعشـرين، حين قدم الباحث B. Khoshnevis أفكار أولية لهذه التقنيات، وبذلك يكون هو من وضـع حجر الأسـاس لاسـتخدام الطابعات الضخمة لإنتاج الجدران الخرسانية بصورة آلية ومتواصلة [1]. ومنذ ذلك الوقت تطورت هذه التقنية بشـكل ملحوظ، لكن الانتشـار التجاري الحقيقي بدأ بعد عام 2014 مع قيام شـركات مثل Winsun الصـينية بطباعة منازل باسـتخدام طابعات عملاقة، بالإضـافة للصـين فقد انتشـرت هذه التقنية في هولندا، الإمارات العربية المتحدة والولايات المتحدة الأمريكيـة، لتتحول هـذه الأفكـار من مجرد فكرة بحثيـة إلى أداة عمليـة لإنتـاج منـازل اقتصادية وسريعة التنفيذ.

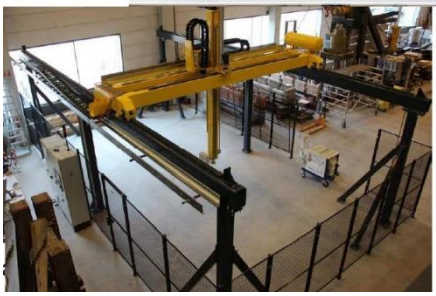
تكمن أهمية الطباعة ثلاثية الأبعاد في البناء في أنها تقدم حلولاً مبتكرة لتقليل الزمن اللازم للبنـاء، وخفض تكـاليف العمـالـة، وتقليل الهـدر في المواد، مع القدرة على تشـكيل تصـاميم معقدة وهياكل غير تقليدية يصـعب تنفيذها بالطرق التقليدية. كما أنها تدعم التوجهات العالمية نحو الاسـتدامة، من خلال تقليل اسـتهلاك الطاقة والمواد، وإمكانية دمج مواد بناء جديدة وصديقة للبيئة ضمن الخلطة المستخدمة.

من الناحية التقنية، تعتمد الطابعات الإنشـائية على مبدأ البثق، حيث يتم دفع مادة البناء (عادة خليط إسـمنتي خاص أو مزيج جصـي –أسـمنتي) عبر فوهة متحركة

تتحكم بها ذراع روبوتية أو رافعة جسرية. يتم صب المادة طبقة فوق طبقة وفق المسار الرقمي المبرمج مسبقاً، مما يشكّل الجدران أو العناصر الإنشائية تدريجياً.

تتكون طابعة الجدران ثلاثي الأبعاد من **عدة أنظمة أهمها:**

النظام الميكانيكي: يتكون من ذراع روبوتية أو جسر متحرك ثلاثي المحاور (X, Y, Z) يحدد مسار الطباعة.



الشكل (1) يبين بعض نماذج طابعات الجدران ثلاثي الأبعاد [1]

رأس الطباعة: توزع مونة البناء بشكل منتظم، مع إمكانية التحكم بسماكة وعرض الطبقة كما هو مبين في الشكل (2).

الشكل (2) يبين رأس الطباعة في طابعة الجدران ثلاثي الأبعاد [1]

وحدة خلط وضخ المواد: تضمن توفير خليط متجانس يتمتع بلزوجة وخواص تصلب مناسبة للطباعة.

نظام التحكم الرقمي: يعتمد على ملفات CAD ويترجمها إلى أوامر حركة دقيقة.

أما خطوات عملية الطباعة فتتضمن:

التصميم الرقمي: يتم إعداد نموذج ثلاثي الأبعاد باستخدام برامج التصميم (CAD).

إعداد المواد: تجهيز خلطة البناء الخاصة (إسمنت + إضافات كيميائية لضبط زمن التصلب والسيولة).

عملية البثق: تقوم الفوهة ببثق المادة على هيئة طبقات متتالية وفق المسار المحدد.

التصلب التدريجي: كل طبقة تكتسب صلابة كافية لتحمل الطبقات التالية. [1]

إحدى الخصائص البارزة للجدران المطبوعة ثلاثياً هي إمكانية التحكم في شكل المقطع العرضي للجدار، بما في ذلك وجود تجاويف داخلية أو أعصاب تقوية، ما يسمح بزيادة الصلابة الميكانيكية وتخفيف الوزن وتحسين العزل الحراري في آن واحد.

من أهم شروط نجاح هذه التقنية هو تطوير "حبر" بناء يتمتع بقابلية مناسبة للضخ وقابلية للبناء الرأسي دون أن ينهار، بالإضافة إلى القوة والمتانة بعد التصلب. كما

أن تصميم النموذج الرقمي أمر بالغ الأهمية، حيث يتيح الحرية في إنشاء أشكال هندسية معقدة غير تقليدية يصـــعب تنفيذها بالطرق التقليدية، بما في ذلك تصـــميم التجاويف الداخلية ونظم العزل المدمجة.

يُعَد انتقال الحرارة عبر الجدران المطبوعة ثلاثياً أحد أهم التحديات التي تؤثر بشـكل مباشـر على الراحة الحرارية داخل المباني وكفاءتها الطاقية. فالجدار ليس مجرد عنصـر إنشـائي فحسـب، بل هو عنصـر فاعل في ضـبط الحمل الحراري على أنظمة التدفئة والتبريد. وتتحكم عدة عوامل في السـلوك الحراري لهذه الجدران، منها سـماكة الطبقات، شكل التجاويف الداخلية، نوع المادة المستخدمة، والتصميم الهندسي للأعصاب الفاصـلة بين الطبقات. وبالتالي، فإن تحسـين أداء الجدران من الناحية الحرارية يعد هدفاً محورياً في البحوث المرتبطة بتطوير تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في البناء.

وعلى الرغم من تزايد الدراسـات التي بحثت في الجوانب الميكانيكية والمتانة الإنشـائية للجدران المطبوعة، فإن الدراسـات التي ركزت على الأداء الحراري ما تزال محدودة نسـبياً. وعليه، تأتي هذه الدراسـة لتسـد فجوة معرفية مهمة، إذ تهدف إلى تحليل تأثير اختلاف تصـميم مقاطع الجدران المطبوعة ثلاثياً على انتقال الحرارة باسـتخدام النمذجة العددية والمحاكاة الحرارية. وتكمن أهمية هذا البحث في أنه يربط بين الجانب الهندسي للشكل الداخلي للجدار وبين الأداء الحراري للمبنى، بما يساهم في وضع أسس تصميمية تحقق توازناً بين العزل الحراري والمتطلبات الإنشائية.

2. أهمية البحث وأهدافه:

تنبع أهمية هذا البحث من خلال التوجه العالمي نحو دمج تقنيات البناء الحديثة مع تطبيق المعايير الهندسـية الفعالة لترشـيد الطاقة، وذلك من خلال دراسـة واختبار

مجموعة من التصـــاميم والنماذج المختلفة لجدران أبنية مطبوعة ثلاثية الأبعاد بهدف تحديد النموذج الأمثل الذي يحقق أعلى كفاءة حرارية وأفضل أداء وظيفي.

يهدف البحث بشكل أساسي إلى:

1- اختيار النموذج الهندســي الأفضــل من الناحية الحرارية لجدران بناء مطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد من بين عدة نماذج يتم دراســتها بالنمذجة الحرارية وفق الشــروط التصميمية لمدينة حمص.

2- تحديد كمية الحرارة المتدفقة من كل نموذج يتم دراســته وتحديد معامل انتقال الحرارة الكلي لكل نموذج.

3- اجراء تقييم لنتائج النمذجة للتصاميم المدروسة وتفسير هذه النتائج.

4- حســاب نســبة الوفر الطاقي الذي يحققه النموذج الأفضــل نســبةً لباقي النماذج ذات الفجوات.

4- حســـاب نســـبة الوفر الطاقي لكل نموذج بالنســـبة لنموذج مرجعي لا يحتوي على فجوات.

3. الدراسات المرجعية:

أُجريت العديد من الدراســات التي تناولت انشــاء الأبنية بتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، فمنها من كانت أهداف دراســته تتعلق بالخواص الميكانيكية والانشــائية للجدران المطبوع، ومنهم من اهتم بجوانب أخرى، ونذكر من تلك الدراسات:

قام خوشــنيفيس B. Khoshnevis في عام 2004 بتقديم أول تصــور تقني لطريقة البناء بالطباعة ثلاثية الأبعاد، حيث ركّزت دراســته على إمكانية التنفيذ والتطبيق الصــناعي، دون التطرق بشــكل عميق للجوانب الحرارية. لكن هذه الدراســة كانت بمثابة

الأساس الذي دفع لاحقاً إلى البحث في تحسين مقاطع الجدران بما يتناسب مع متطلبات العزل. [2]

أجرى بينغ اوو ورفاقه P. Wu et al في عام 2016 دراسة مرجعية شاملة، راجع فيها الكثير من الأبحاث والدراسات المتعلقة بتشييد الأبنية بتقية الطباعة ثلاثية الأبعاد، ووجد الباحث أن بناء المنازل بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد هي عملية مجدية من الناحية الاقتصادية لما فيها من ميزات من توفير في مواد البناء والاستغناء عن العمالة البشرية وسهولة وديناميكية في تطبيق تصاميم مختلفة من مقاطع الجدران التي ليس من الممكن تطبيقها بشكل تقليدي، كما شدد الباحث على ضرورة اجراء دراسات لاحقة تعتني بالجانب الحراري وتقليل التدفق الحراري عبر الجدران المطبوعة عبر دراسة الأحبار (مواد البناء) ودراسة التصاميم الهندسية لمقاطع الجدران. [3]

في دراسة أجراها بوسويل ورفاقه R. A. Buswell et al في عام 2018 من جامعة باث (المملكة المتحدة)، تم تقييم الخصائص الحرارية للجدران المنشأة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد من الخرسانة الإسمنتية، حيث أظهرت النتائج أن وجود تجاويف هوائية داخلية يؤدي إلى تقليل قيمة انتقال الحرارة بشكل ملحوظ، ما يشير إلى إمكانية تحسين الأداء الحراري من خلال التحكم في شكل المقطع العرضي للجدار. [4]

قام باول وزملائه Paul S Ch et al في 2018 بدراسة استعراضية، استعرض فيها تقنية طباعة الجدران ثلاثية الأبعاد من عدة جوانب، فعرض بعض النماذج للطابعات الثلاثية، وشرح طرق عملها واليتها وأجزاءها ومراحل الطباعة باستخدامها، من ثم ذكر مزايا العمل بهذه التقنية، وتوصل لنتائج أن استخدام هذه التقنية لها أثر إيجابي على الصعيد البيئي والتقليل من استنزاف مواد البناء وقلة الايدي العاملة، وشدد على ضرورة استكمال الدراسات من النواحي الحرارية والمتانة والميكانيكية وحبر الطباعة (مواد البناء). [1]

في عام 2021 قام سانتوس ورفاقه P. Santos et al بإجراء دراسة عددية لعدة نماذج من الجدران الافتراضية المطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثي الأبعاد، وركزت الدراسة على الأداء الطاقي لكل نموذج من النماذج المقترحة. اعتمد الباحثون في الدراسة على برنامج EnergyPlus لإجراء الدراسة الحرارية، ووجد الباحثون أن الجدران المنشأة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد تحقق أداء طاقي جيد وأن هذه التقنية سيكون لها أثر إيجابي على البيئة من خلال الوفر الطاقي، وأوصى الباحثون بدراسة المزيد من النماذج لمقاطع الجدران والمزيد من المواد التي تطبع بها هذه الجدران لتحقيق أفضل أداء طاقي ممكن، وأوصوا باستخدام برامج محاكاة أخرى لإجراء دراسات عددية في هذا المجال.[5]

4. طرائق البحث:

تم في هذا البحث الاعتماد على الطرق العددية لإنجاز هذه الدراسة، فتم استخدام برنامج النمذجة انسيس ANSYS وسيرفراته لنمذجة النماذج المدروسة حرارياً، كما تم الاعتماد على برنامج سوليد وركس SOLID WORKS لتصميم النماذج قبل تصديرها لبرنامج الأنسيس، وتمت الدراسة على عدة مراحل سنتناولها فيما يلي.

1.4. بعض الاعتبارات التي تم أخذت بعين الاعتبار عند النمذجة:

1.1.4. الاعتبارات من حيث الأبعاد والمساحات والحجوم:

1- تمت الدراسة على متر مربع واحد لجميع النماذج. و كانت الأبعاد الخارجية لجميع النماذج المقترحة متساوية، وهي 1X1X0.15 m .

2- نسبة الفراغ الهوائي في جميع النماذج المقترحة متساوية وهي 19.5 % .

3- مساحة سطوح الفجوات المقترحة متساوية.

4- عمق الفجوات في جميع النماذج المقترحة متساوية وهو 1 m .

5- جميع فجوات النماذج المقترحة تقع في نفس المجال وهو الثلث الثاني من سماكة الجدار، أي على بعد 5 cm من كل طرف من أطراف الجدار.

2.1.4. الاعتبارات الحرارية:

1- انتقال الحرارة بين طرفي الجدار مستقر.

2- ثلاثي الأبعاد.

3- انتقال الحرارة من السطح الساخن إلى السطح البارد.

4- انتقال الحرارة في الجزء المصمت هو انتقال حرارة بالتوصيل، وانتقال الحرارة ضمن الفجوات هو انتقال حرارة بالحمل.

5- الشروط الحدية الحرارية وفقاً لشروط مدينة حمص وفقاً لكود العزل الحراري السوري.

6- تم اعتبار درجتي حرارة الجو المحيط الخارجية والداخلية مساويتان لدرجتي حرارة سطحي النماذج الساخن والبارد على الترتيب.

7- تم اهمال انتقال الحرارة بالإشعاع لأن مجال درجات الحرارة الذي نعمل فيه منخفض وبالتالي سيكون تأثير الاشعاع صغير جداً لذلك يتم اهماله (عادةً يتم اهمال تأثير الاشعاع عندما يكون مجال درجات الحرارة المعمول به دون 200 c°)

8- خواص كل من المادة الصلبة والهواء لجميع العينات لها نفس القيمة:

a- معامل التوصيل الحراري والكثافة والسعة الحرارية للمادة الصلبة.

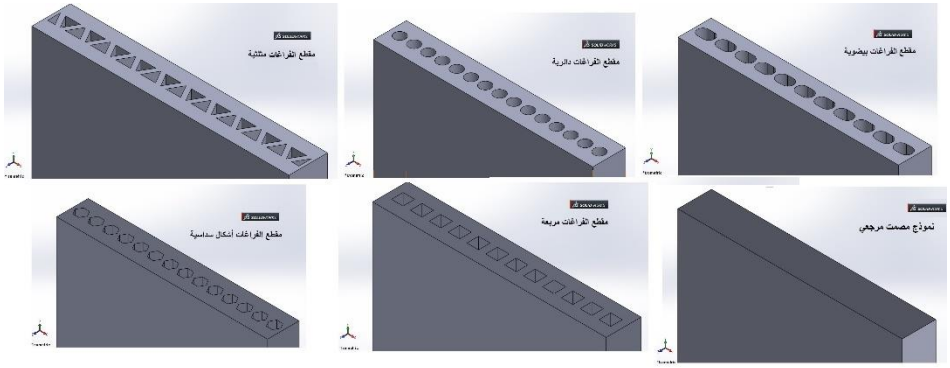
b- كثافة الهواء وتمدده الحجمي.

c- درجتي حرارة سطحي العينة ودرجة الحرارة التشغيلية ودرجة الحرارة الوسطية.

2.4. تصميم النماذج المدروسة:

تم اقتراح ستة نماذج خمسة منها يحتوي على فجوات بأشكال هندسية، والسادس هو نموذج مصمت لا يحتوي على أي فجوة أو فراغ (تم دراسته كنموذج مرجعي)، وتم

تصـميم هذه النماذج بالاعتماد على برنامج سـوليد وركس SOLID WORKS ، ويبين الشكل (3) النماذج المصممة المدروسة.



الشكل (3) يبين النماذج الجدران المدروسة وهي: مثلثية – دائرية – بيضوية – مربعة – سداسية – مصمت

3.4. النمذجة الحرارية:

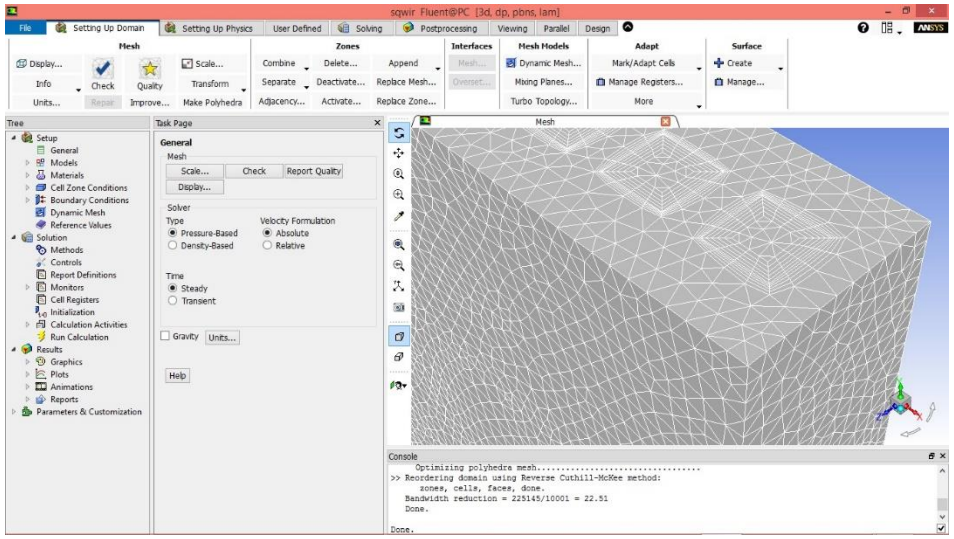
بعد الانتهاء من تصـميم النماذج، تم اجراء عملية تصـدير النماذج من برنامج السـوليد وركس إلى برنامج النمذجة ANSYS، وتم ذلك على عدة مراحل، وبالاسـتعانة بعدة سيرفرات من برنامج الانسيس، لأن عملية النمذجة تمر بمرحلتين رئيسيتين هما:

1- اعداد النموذج. 2- البدء بالحل.

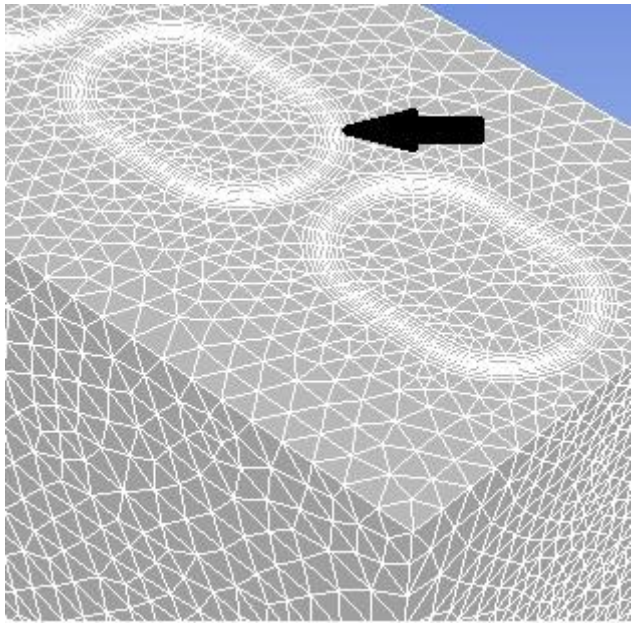
1.3.4. إعداد النموذج والبدء في الحل:

مرحلة إعداد النموذج فيها يتم تجهيز النموذج وتهيئته وتهيئة بيئة البرنامج ليقوم بالنمذجة، وتتضمن إدخال المعطيات اللازمة، كالشروط الحدية وتعريف الأسطح الداخلية والخارجية للنموذج وتحديد معادلات الحل وتحديد طريقة الحل ونموذج الحل بالإضـافة لبعض المعطيات الأخرى المطلوبة في الحل.

تم بدايةً تصـــدير كل نموذج على برنامج ANSYS Workbench فجرى فيه عملية تقطيع النموذج الى خلايا رباعية الوجوه (Tetra hydra) وتســمى هذه العملية بـ (mesh) حيث تم فيها تحديد نوع الخلايا وأحجامها يبين الشـــكل (4) عملية تقســـيم النموذج إلى خلايا رباعية، من ثم تم اجراء تنعيم للخلايا بجوار الجدار الملامس للمائع (inflation) كما هو مبين في الشكل (5)، وتم تعريف جميع الأسطح الخارجية والداخلية والهواء داخل الفجوات في كل نموذج، بالإضـــافة لبعض الإجراءات الخاصـــة في هذا السيرفر.

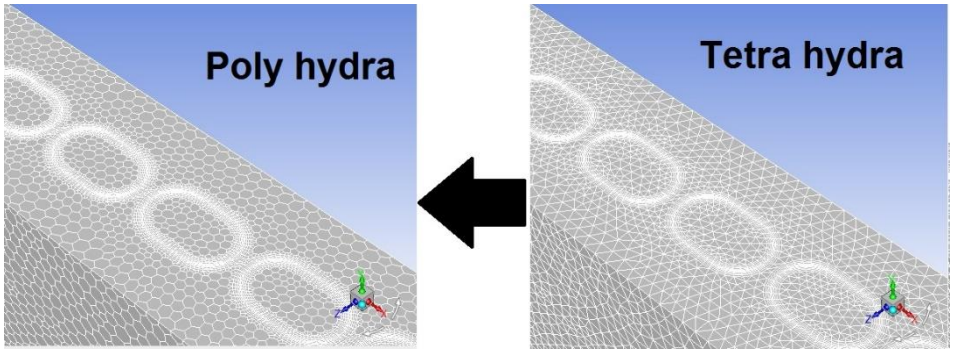


الشكل (4) يبين عملية تقطيع النموذج الى خلايا من نوع (Tetra hydra)



الشكل (5) يبين عملية تنعيم الخلايا بجوار الجدار الملامس للمائع (inflation)

تم بعد ذلك حفظ الملف وتصديره لسيرفر آخر وهو ANSYS Fluent حيث تم فيه تحويل نوع الخلايا من (Tetra hydra) إلى (Poly hydra) كما هو مبين في الشكل (6) وذلك لتحسين نوع الخلايا والحصول على دقة في الحل وتقليل كلفته الحسابية.



الشكل (6) تحويل الخلايا mesh من نوع Tetra hydra الى Poly hydra

تم بعد ذلك تحديد الشـروط الحدية أي درجة حرارة السـطحين السـاخن والبارد، ودرجة الحرارة التشـغيلية، معامل التمدد الحجمي للهواء، كما تم تحديد خصـائص المادة (الاسـمنت) وهي معامل التوصـيل الحراري والسـعة الحرارية والكثافة، من ثم تم تحديد خصـائص الهواء داخل الفجوات كالكثافة والتمدد الحجمي له وبعض الخواص الأخرى اللازمة، تم الاعتماد على تحديد الخواص المتعلقة بالجو بالاعتماد على درجات الحرارة في مدينـة حمص صـيفاً وفقاً لكود العزل الحراري السـوري، وتبع ذلك تحديد بعض الاعدادات الاخرى ليتم بعدها الانتقال على قسـم الحل، فتم تحديد عدد الحلول والضـغط على زر البدء بالحل، ليبدأ بعدها البرنامج بالحل.

الجدول (1) يبين بعض الخصائص الأساسية المستخدمة في الحل،
والمتعلقة بمادة حبر الطباعة (الاسمنت)

العينة	معامل التوصيل الحراري [w/m.K]	السعة الحرارية [J/kg.K]	الكثافة $[kg/m^3]$
جميع النماذج	1.4	900	2200

الجدول (2) يبين الشروط الحدية المستخدمة في الحل وفقاً لدرجات الحرارة في مدينة حمص صيفاً
بالاعتماد على كود العزل الحراري السوري [6]

الفصل	درجة الحرارة الداخلية [c°]	درجة الحرارة الخارجية [c°]	معامل التمدد الحجمي
الصيف	22	38	$3.3X10^{-3}$

تم استخدام المعادلات التالية في النمذجة [7]:

1- مبدأ حفظ الكتلة (معادلة الاستمرار):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla.\left(\rho \vec{V}\right)=0$$

يمثل الحد الأول في المعادلة المعدل الزمني بينما يمثل الحد الثاني المقدار الحملي ويعطى المؤثر ∇ بالعلاقة: $(\frac{\partial}{\partial x}\vec{\imath} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{\jmath} + \frac{\partial}{\partial z}\overrightarrow{k})$ و u و v و w تمثل مركبات السرعة على المحاور x و y و z على الترتيب.

2- مبدأ حفظ كمية الحركة (معادلة كمية الحركة):

على المحور X

$$\boldsymbol{\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right)} = -\boldsymbol{\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)}$$

على المحور Y

$$\boldsymbol{\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right)} = \boldsymbol{\rho . g . \beta . (T - T_\infty) + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)}$$

على المحور Z

$$\boldsymbol{\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)}$$

μ: اللزوجة الحركية m^2/Sec

β**:** عامل التمدد الحجمي $\beta \approx \frac{1}{T_\infty}$

T_∞: درجة الحرارة التشغيلية (المميزة) $T_\infty = \frac{T_H - T_C}{2}$ تقدر بـ K.

P: الضغط Pa.

3- مبدأ حفظ الطاقة (معادلة الطاقة):

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\frac{\lambda}{Cp.\rho}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$

$\frac{\lambda}{Cp.\rho}$: يمثل هذا الحد الانتشارية الحرارية.

λ: معامل التوصيل الحراري W/m.K

Cp: السعة الحرارية J/kg.K

ρ: الكثافة kg/m^3

2.3.4. اجراء الاختبارات:

تم البدء بالحل العددي وفقاً للمراحل المذكورة سابقاً، حيث استمرت عملية الحل فترة زمنية طويلة حتى تم الوصول إلى قيم التقاربات المطلوبة، وعند الوصول لتلك التقاربات تم حفظ ملف النمذجة وأخذ النتائج المطلوبة منه. ويبين الشكل (7) التقاربات التي تم الوصول إليها في نمذجة أحد النماذج المدروسة.

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	energy	surf-mon-1
7830	5.7248e-12	9.5536e-12	2.5532e-11	1.7248e-11	8.4955e-14	-5.2912e-02
7831	5.6373e-12	9.5442e-12	2.5524e-11	1.6373e-11	8.0042e-14	-5.2912e-02
7832	5.6227e-12	9.5448e-12	2.5519e-11	1.6227e-11	8.7248e-14	-5.2912e-02
7833	5.6179e-12	9.5473e-12	2.5515e-11	1.6179e-11	8.6373e-14	-5.2912e-02
7834	5.6125e-12	9.5327e-12	2.5512e-11	1.6125e-11	8.6227e-14	-5.2912e-02

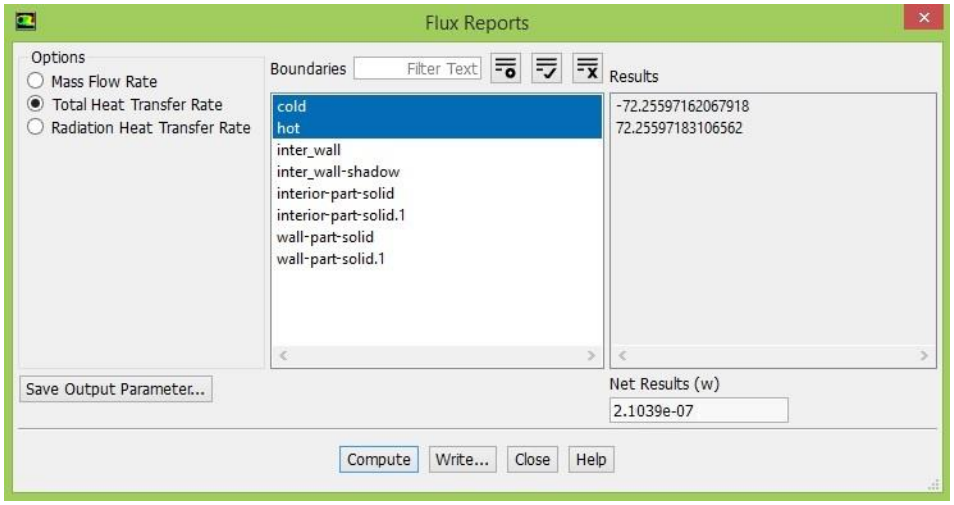
ويبين الشكل (7) التقاربات التي تم الوصول إليها في نمذجة أحد النماذج المدروسة

استمرت عملية الحل العددي للنماذج المقترحة فترة زمنية طويلة حتى الوصول إلى تقاربات جيدة، اختلفت هذه الفترة بين نموذج وآخر، ووصـــلت التقاربات في نهاية الحل إلى قيم مقبولة.

5.النتائج والمناقشة:

بعد الانتهاء من عملية النمذجة وانتهاء البرنامج من الحسابات العددية والوصول إلى تقاربات جيدة، أعطى البرنامج رسالة تشير إلى انتهائه من النمذجة، ليتم الانتقال بعدها إلى مرحلة قراءة النتائج وتقييمها.

تم تقييم النماذج المدروسة على أساس كمية الحرارة المتدفقة عبر كل نموذج، فتم اخذ قراءات لكميات الحرارة المتدفقة لكل نموذج وذلك من الخيارات الخاصة بذلك من خلال البرنامج، حيث يقوم البرنامج بحساب هذه الكمية بالإضافة لإظهار توازن الطاقة في كل نموذج من النماذج المدروسة. ويبين الشكل (8) توازن الطاقة في أحد النماذج المدروسة بعد الانتهاء من الحل.



الشكل (8) توازن الطاقة في أحد النماذج المدروسة بعد الانتهاء من الحل

نلاحظ من الشكل السابق أن كمية الحرارة المتدفقة عبر السطح الساخن متقاربة جداً مع الحرارة المتدفقة عبر السطح البارد، وأن الفرق بينهما هو عدد صغير جداً من مرتبة 10^{-7} ، وهذا يعطي مؤشر إلى أن عملية النمذجة سليمة، حيث يتم التأكد بالعادة من جودة عملية النمذجة من خلال الفرق في كمية الحرارة بين الطرف الساخن والطرف

البارد، فكلما كان العدد صـــغير كلما كانت النمذجة أكثر صـــحةً. تم أيضـــاً إيجاد كمية الحرارة المتدفقة عبر النموذج المصـمت بشـكل حسـابي بالاعتماد على نفس البارامترات، حيث انتقال الحرارة فيه يحدث بالتوصـيل فقط، فبلغت كمية الحرارة المتدفقة عبره حسـابياً $149.3333\ W/m^2$ ، وبمقارنة القيمة الحسابية مع القيمة التي تم الحصول عليها من البرنامج وهي $150.0166124\ W/m^2$ نجد بأن الفرق صـــغير جداً، وأن نســبة الخطأ هي $0.445\ \%$ وهي نسبة صغيرة، يمكن اعتماد النمذجة بناءً عليها.

تم أيضـــاً حســـاب معامل انتقال الحرارة الكلي لكل نموذج بالاعتماد على كمية الحرارة المقروءة من البرنامج لكل نموذج، وفقاً لمعادلة:

$$Q= U.A.\Delta T \Rightarrow U=Q/A.\Delta T$$

حيث:

Q: كمية الحرارة المتدفقة عبر النموذج يقدر بـــ [W]

U: معامل انتقال الحرارة الكلي يقدر بـــ $[W/m^2.K]$

A: مساحة سطح العينة التي تعبر الحرارة بين طرفيها تقدر بـ $[m^2]$

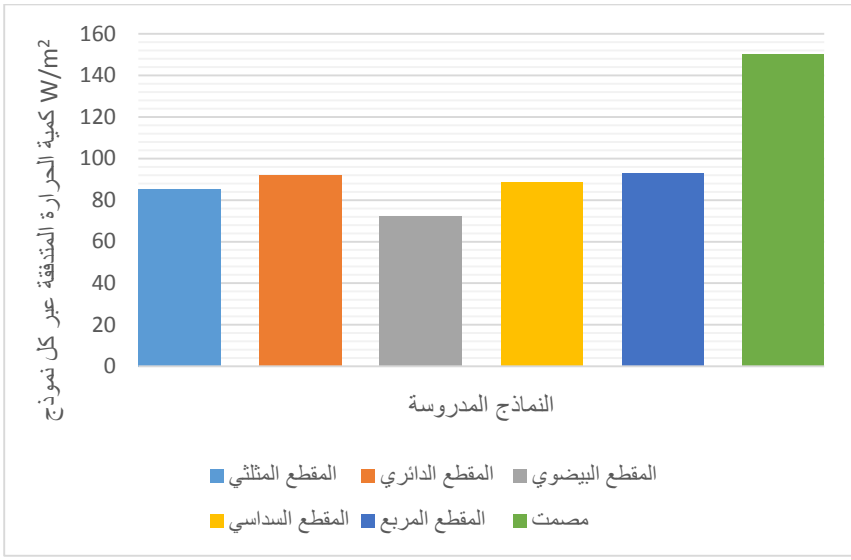
ΔT: فرق درجات الحرارة بين طرفي الجدار (T_h-T_C) يقدر بـ [K]

رتبت نتائج كمية الحرارة المتدفقة عبر كل نموذج المقروءة من البرنامج، ومعامل انتقال الحرارة الكلي الذي تم حسابه في باستخدام المعادلة السابقة لكل نموذج في الجدول (3) وفق الآتي:

الجدول (3) يبين كميات الحرارة المتدفقة عبر النماذج ومعامل انتقال الحرارة الكلي لكل نموذج

الرقم النموذج	النموذج	كمية الحرارة المتدفقة عبر النموذج [W/m^2]	معامل انتقال الحرارة الكلي [$W/m^2.K$]
1	مقطع الفراغات مثلثية	85.55191424	5.347
2	مقطع الفراغات دائرية	91.88510732	5.743
3	مقطع الفراغات بيضوية	72.25597	4.516
4	مقطع الفراغات سداسية	88.42128352	5.526
5	مقطع الفراغات مربعة	92.86441547	5.804
6	مصمت	150.0166124	9.376

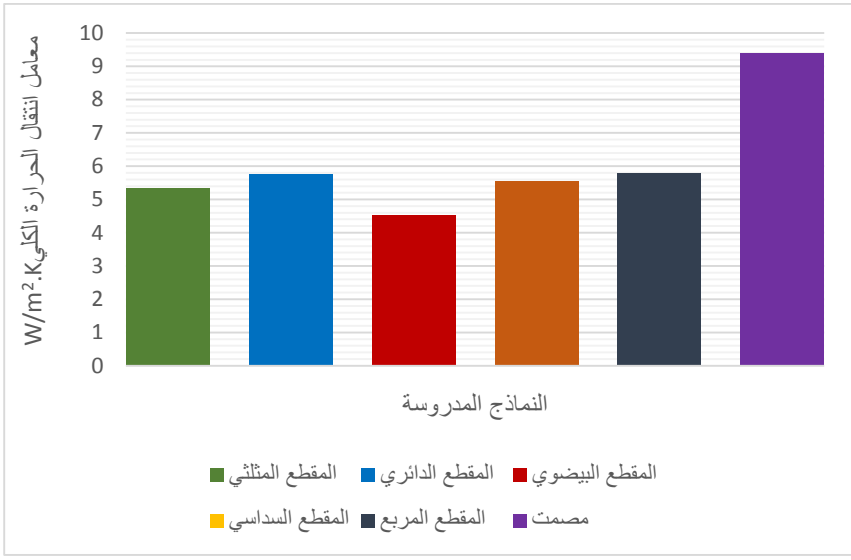
وتم اجراء مقارنة بين النماذج من خلال كمية الحرارة المتدفقة عبر كل نموذج والمبينة في الشكل (9).



الشكل (9) يبين مقارنة بين النماذج المدروسة من خلال كمية الحرارة المتدفقة عبر كل نموذج

تم مناقشـــة المقارنة بين النماذج التي تحتوي على فجوات فقط، فنلاحظ من خلال المقارنة في الشـكل السـابق أن النموذج الذي يحوي فتحات بيضـوية الشـكل هو النموذج الذي يحدث عبره أقل تدفق حراري، أي أنه الأفضل من بين النماذج المدروسة، وقد بلغت كمية الحرارة المتدفقة عبره $72.26\ W/m^2$ ، بينما كان النموذج الأسوأ هو النموذج الذي يحتوي على فراغات مربعة الشـــكل حيث بلغت كمية الحرارة المتدفقة عبره $92.86\ W/m^2$ ، وبالتالي كمية الحرارة المتســـربة عبر الجدران هي الأكبر، وتراوحت كميات الحرارة المتدفقة عبر باقي العينات بين أعلى قيمة وأصغر قيمة اللتان تم ذكرهما.

إن مقارنة نتائج معامل انتقال الحرارة الكلي لكل نموذج يظهر لنا مخططاً شـريطياً مشـابهاً لمخطط مقارنة كميات الحرارة، حيث يبين الشـكل (10) مقارنة بين النماذج من حيث معامل انتقال الحرارة الكلي.



الشكل (10) مقارنة بين النماذج من حيث معامل انتقال الحرارة الكلي.

من أجل إيجاد تفسير لتفوق النموذج ذو الفتحات البيضوية على باقي النماذج حرارياً (الأقل تدفقاً للحرارة عبره) تم اللجوء لتحليل تأثير عامل الشكل الهندسي للفجوات، وذلك لمعرفة أياً من النماذج تنتقل عبره الحرارة بالتوصيل أكثر من الآخر، حيث أن لانتقال الحرارة بالتوصيل الدور الأكبر في تحديد كمية الحرارة الكلية المنتقلة عبر كل نموذج، نظراً لارتفاع عامل التوصيل الحراري للمادة الصلبة مقارنةً مع معامل انتقال الحرارة للهواء الموجود في الفجوات الهوائية، لذلك كان لابد من التركيز على العوامل المؤثرة على انتقال الحرارة بالتوصيل، وبما أن معامل التوصيل الحراري ثابت لجميع العينات وباقي الخواص الفيزيائية (الكثافة والسعة الحرارية) الداخلة في الحساب ثابتة، كما أن سماكة النماذج المدروسة ثابتة وبارامترات الداخلة في الحسابات ثابتة (درجات الحرارة الداخلية والخارجية)، لم يبقى لنا إلا دراسة عامل مساحة السطح الذي تعبر منه الحرارة من الطرف الساخن الى الطرف البارد، حيث تختلف هذه المساحة من نموذج إلى آخر، وذلك وفقاً لمساحة سطح الأعصاب التي تنقل الحرارة وعددها، وإن ما يحدد مساحة

سطح كل عصب هو عرضه وارتفاعه، وعندما نريد معرفة المساحة الكلية نضربها بعدد الأعصاب، ولدراسة ذلك تم أخذ مقاطع افقية ومقاطع رأسية للنماذج في المنطقة التي تكون الأعصاب العرضية فيها أقل سماكةً وهي منطقة خط التناظر الافقي للمسقط الافقي(مستوي القطع A–A)، وتم فيها تحديد عرض الأعصاب وارتفاع الأعصاب وعدد الأعصاب ومساحة مقطع كل عصب ومساحة مقاطع الأعصاب الكلية بالإضافة لنسبة المادة الصلبة منسوبة لمساحة كامل المقطع في هذا المقطع وتم ترتيب هذه القراءات في الجدول (4)، ويبين الشكلين (11) و(12) المسقط الافقي للنماذج والمسقط الرأسي لها مقطوعاً على الترتيب ويظهر فيها الأعصاب ومكان تحديد عرض الأعصاب.

الجدول (4) يبين معلومات الأعصاب للنماذج المدروسة

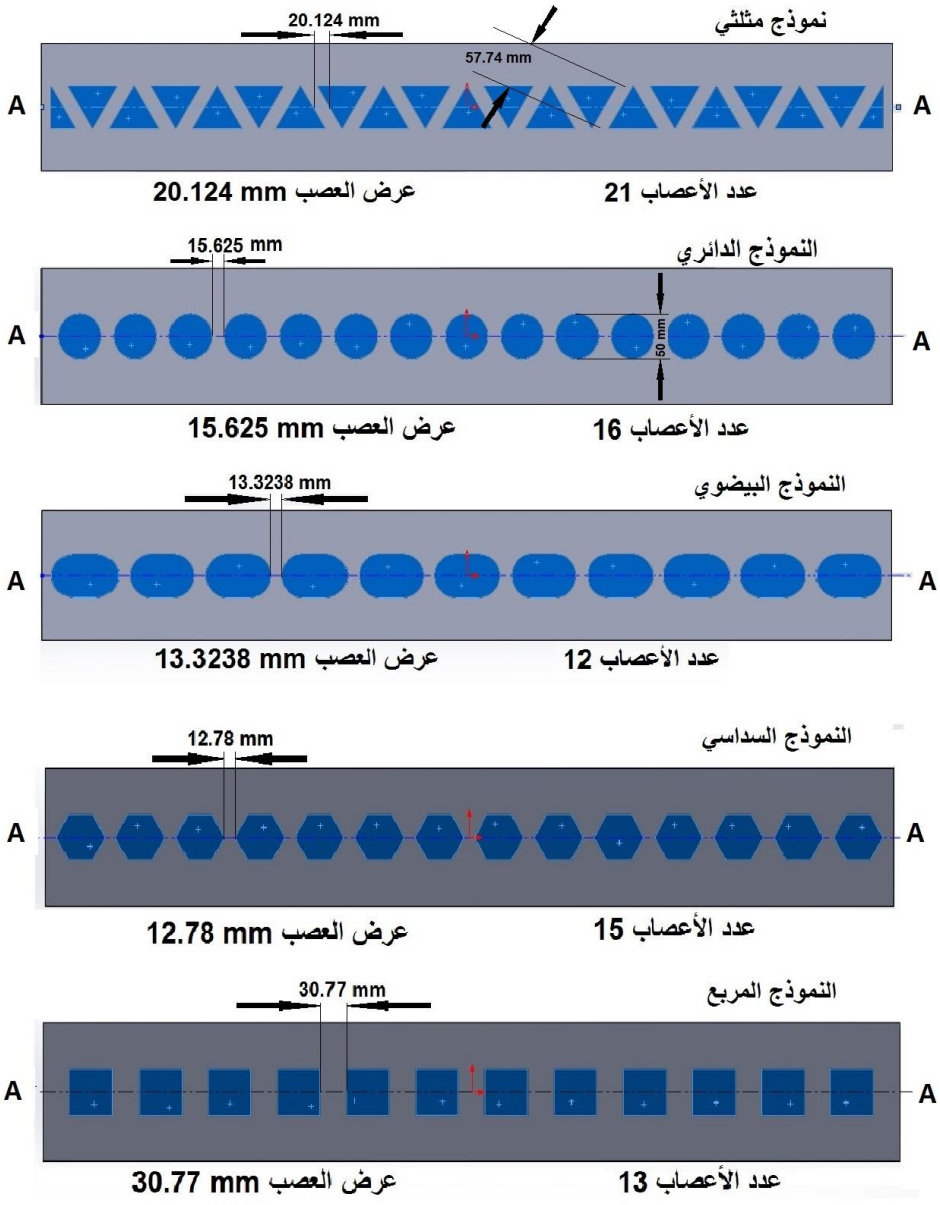
الرقم النموذج	النموذج حسب شكل الفراغ	عرض كل عصب m	ارتفاع الأعصاب m	عدد الأعصاب في النموذج	مساحة مقطع العصب m^2	مساحة مقاطع الأعصاب الكلية m^2	نسبة المادة الصلبة في المقطع %
1	مثلثي	0.020124	1	21	0.020124	0.4226	42.26
2	دائري	0.015625	1	16	0.015625	0.25	25
3	بيضوي	0.0133238	1	12	0.0133238	0.15988	15.988
4	سداسي	0.01278	1	15	0.01278	0.1917	19.17
5	مربع	0.03077	1	13	0.03077	0.4	40
6	مصمت	1	1	1	1	1	100

بمقارنة بيانات الجدول (4) للنماذج المدروسة مع بعضها البعض (النماذج التي تحتوي على فجوات فقط)، وبالنظر للعمود الخاص بعرض الأعصاب نجد بأن النموذج ذو فتحات سداسية الشكل هو الذي يحوي الأعصاب الأقل عرضاً، وبالتالي فإن مساحة مقطع هذا العصب هي الأقل من بين النماذج، يأتي بعده العصب بالنموذج ذو الفتحات البيضوية الذي يزيد عرضه عن السداسي بفارق بسيط، وبالتالي مساحة مقطعة تزيد عن مساحة مقطع البيضوي (الارتفاع موحد)، وبالرغم من ذلك فإن كمية الحرارة المتدفقة عبر النموذج البيضوي هي الأقل، وذلك لأنه يجب الأخذ بعين الاعتبار عدد أعصاب لكل نموذج لكي نعرف مساحة جميع أعصاب النموذج مجتمعة، فنلاحظ من عمود عدد الأعصاب أن النموذج البيضوي يحوي أعصاب أقل من النموذج السداسي، وبحساب مجموع مساحات مقاطع الأعصاب لكل نموذج بنفس الطريقة نجد بأن مساحة مقاطع الأعصاب للنموذج البيضوي الكلية هي الأصغر من بين جميع النماذج المدروسة،

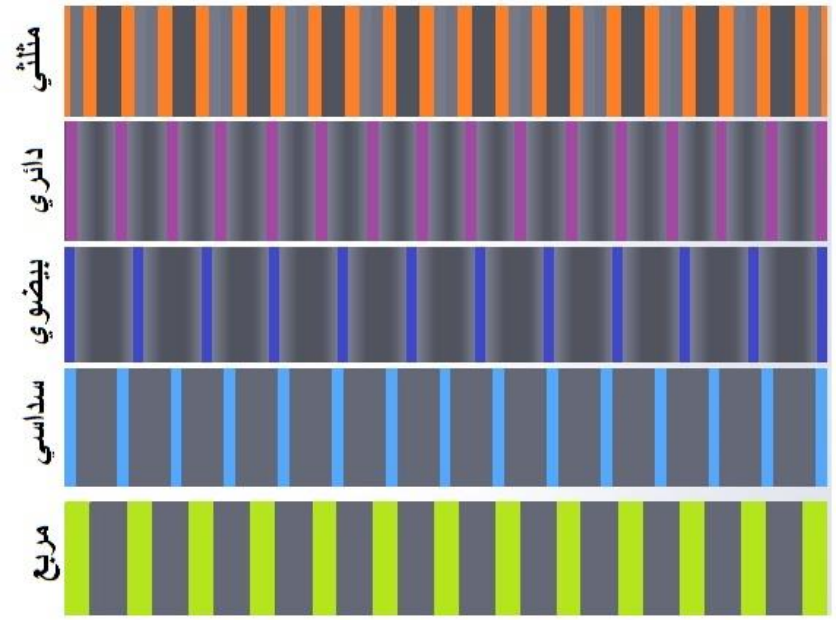
ويعتبر هذا سبب رئيسي في انخفاض تدفق النموذج البيضوي، إلا أن المساحة الكلية التي يعبر منها التيار الحراري لا يمكن اعتبارها دائماً العامل الذي يحدد كمية الحرارة العابرة، لأنه يوجد عوامل هندسية أخرى تلعب دوراً كبيراً في تحديد ذلك، مثل طول العصب الذي يعبر خلاله التيار الحراري، فكلما طال هذا المسار كلما ازدادت صعوبة انتقال التيار الحراري عبره لاسيما في حالة الأعصاب المحاطة فجوات هوائية، حيث تأخذ من الأعصاب قدر لا بأس فيه من الحرارة وتعمل على تشتيتها وتقليل وصولها للطرف الآخر، ونجد هذه الحالة في النموذج ذو الفجوات المثلثية، فبالرغم من أن مساحة مقطع الأعصاب الكلية هي الأكبر بين جميع النماذج المدروسة إلا أن هذا النموذج يأتي بالمرتبة الثانية كأفضل نموذج حراري، كون أن الأعصاب مائلة بزاوية 60° وهذا يعمل على زيادة طول العصب (57.74mm في النموذج المثلي و 50mm في باقي النماذج) وبالتالي زيادة مسار الحرارة العابرة، بالإضافة لذلك زيادة المساحة الجانبية للفجوات التي تلامس العصب، فجميع العوامل المذكورة فيما يخص طول العصب تلعب دوراً هاماً في تحديد كمية الحرارة الكلية العابرة عبر كل نموذج مدروس.

إن ما يحدد انتقال الحرارة هو جميع العوامل المذكورة مجتمعةً، إلا أنه دوماً يطغى عامل على عامل آخر في كل دراسة وفقاً للتصاميم وخصوصية الشكل الهندسي لكل نموذج من الفجوات، لذلك عند الدراسة تتم المفاضلة بين العوامل المدروسة بشكل نسبي ليحدد كل عامل دوره في طريقة وشكل وكمية انتقال الحرارة في كل نموذج.

نجد في حالة النموذج المصمت أن كمية الحرارة العابرة هي كبيرة مقارنةً بجميع النماذج، كونه لا يحتوي على فجوات وأن انتقال الحرارة يتم بالتوصيل بشكل كامل، وقد تم دراسة هذا النموذج لغايتين الأولى لمقارنة نتائجه مع نتائج باقي النماذج والغاية الثانية هي للتأكد من صحة عملية النمذجة وقد تم التأكد من ذلك كما ذكرنا سابقاً.



الشكل (11) يبين المسقط الافقي للنماذج المدروسة مبين عليها بعض عناصر الشكل الهندسي



الشكل (12) يبين جزء من المقطع الرأسي لكل نموذج من النماذج المدروسة

6. الاستنتاجات والتوصيات:

في ضوء نتائج الدراسة الحالية، يمكن استخلاص مجموعة من الاستنتاجات على النحو الآتي:

1. تفوق نموذج الجدار ذو شكل فجوات بيضوي من الناحية الحرارية على جميع النماذج التي تحتوي فجوات بأشكال اخرى، وحقق وفراً طاقياً (وفر حراري) بنسبة % 15.54 و % 21.36 و % 18.28 و % 22.19 على كل من المثلثي والدائري والسداسي والمربع على الترتيب، أي أن النموذج الأفضل حرارياً هو النموذج الذي يحتوي على فجوات بيضوية الشكل.

2. حققت جميع النماذج التي تحتوي على فجوات وهي (المثلثي والدائري والبيضـــوي و السداسـي والمربع) وفراً طاقياً على النموذج المصمت المرجعي بنسبة % 42.97 و % 38.75 و % 51.83 و % 41.06 و 38.09 % على الترتيـب، أي أن للفجوات دور أساسي في تحقيق الوفر وتقليل التدفق الحراري عبر الجدران وفقاً لشكل كل الفجوة.

3. يلعب الشـكل الهندسـي للفجوات ومفردات هذا الشـكل دوراً اسـاسـياً في تحديد الكفاءة الحرارية للجدران المطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد.

4. لا يحدد أحد عناصـــر الشـــكل الهندســـي بمفرده كفاءة انتقال الحرارة عبر أي نموذج مدروس، وان من يقوم بذلك هي العناصـــر مجتمعة، كل عنصـــر بنســـبة معينة تبعاً لخصوصية الشكل الهندسي.

التوصيات:

من خلال ما سبق يمكن أن نوصي بما يلي:

1- اسـتخدام الشـكل البيضـوي لفجوات الجدران عند بناء الجدران بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد لما يتمتع هذا الشكل من خواص تزيد من الكفاءة الحرارية للجدار.

2- ضرورة التأكد من الخواص الميكانيكية للجدران وإجراء دراسات في هذا الخصوص لتحديد مدى متانتها ميكانيكياً.

3- ضرورة اجراء دراسات تهدف لتحسين خواص حبر الطباعة (الاسمنت المستخدم في طباعة الجدران) الحرارية والميكانيكية.

4- دراسة تأثير توضع الفجوات بشكل عرضي في الجدران من الناحية الحرارية ومقارنة نتائجها بنتائج التوضع الشاقولي للفجوات.

7. المراجع

1. Paul S Ch et al. 2018- **A Review of 3D Concrete Printing Systems and Materials Properties: Current Status and Future Research Prospects**. Rapid Prototyping Journal, *(2018) 24 (4):Page 784–798.*
2. Khoshnevis B. 2004- **Predicting Compressive Strength of Recycled Concrete for Construction 3D Printing Based on Statistical Analysis of Various Neural Networks.** *Journal of Building Construction and Planning Research, Automation in Construction, 13, Page 5-19.*
3. Wu P et al. 2016- **A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry**. *Automation in Construction, ScienceDirect, ELSEVIER. Volume 68 ,April 2016 Page 21–31*.
4. Buswell R A et al. 2018 - **3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research**. *Cement and Concrete Research, ScienceDirect, ELSEVIER. Volume 112, October 2018, Pages 37-49.*
5. Santos P et al. 2021- **Energy Performance of 3D-Printed ConcreteWalls: A Numerical Study**. *Buildings 2021,* 11*(10), 432 Pages 22.*
6. **Syrian Arab Code for the design and implementation of installations in reinforced concrete.**
7. **Qarmo** A. **2021- The study of improving thermal performance of bricks manufactured from the recycling of rubble.** *PhD thesis, Pages 147-148.*

"مقارنة تأثير بعض بارامترات التصنيع على القساوة ومقاومة الشد لسبيكة الألمنيوم (AA7075) المُدعمة بالدقائق والمُحضرة بتقنيتي السباكة بالمزج (SCT)والسباكة بالعصر (SQT) باستخدام طريقة تاغوشي(Taguchi) "

الباحث: الدكتور المهندس: معتز الحصريه

الملخص

في ظل التطور المتسارع للقطاعات الصناعية أصبح البحث عن مواد هندسية متقدمة قادرة على تلبية المتطلبات الصارمة للتطبيقات الحديثة من خفة في الوزن مع سلوك ميكانيكي مميز بتكاليف منخفضة ضرورة حتمية لذا تُعتبر المواد المركبة المعدنية MMCs إحدى أبرز هذه الحلول ونظراً للمكانة الصناعية للألمنيوم وسبائكه يتم حالياً تقويته بمواد تدعيم مختلفة بتقنيات تصنيع منوعة للحصول على الألمنيوم المدعم (AMCs) بهدف تحسين خواصه الميكانيكية الأمر الذي من شأنه توسيع مساحة الاستخدام الصناعي له.

في هذا البحث تم تدعيم سبيكة (AA7075) بدقائق قاسية ميكروية من كربيد السليكون (SiC) بنسب وزنية متغيرة (X= 5,10 and 15 wt%) و من كربيد البورون (B4C) بنسبة ثابتة (5 wt%) بشكل هجين بتقنيتي السباكة بالمزج (SCT) والسباكة بالعصر (SQT) وقد تم الحصول على تسع عينات بتغير بارامترات تقنية التصنيع التالية : (سرعة الخلط $SP = 350 \rightarrow 550r.p.m$ وزمن الخلط $ST = 10 \rightarrow 20min$ ونسبة التدعيم $RE = 5 \rightarrow 15\%$) مع تطبيق ضغط أثناء عملية السباكة بالعصر $(P = 50Mpa)$.

وبعد إنجاز عملية التدعيم و الحصول على الألمنيوم المُدعم الهجين (HAMCs) بكلا التقنيتين(SCT&SQT) ، تم إجراء الاختبارات الميكانيكية وتحديد قيم القساوة (VHN) ومقاومة الشد العظمى(UTS) ، وقد بينت النتائج أن أفضل الخواص تم الحصول باستخدام تقنية السباكة بالعصر أما فيما يخص البارامترات المُستخدمة بعد تطبيق طريقة تاغوشي (Taguchi Method) كانت– العينة (S3) – ذات خواص أعلى بالمقارنة مع باقي العينات حيث وصلت قيمة القساوة في العينة المذكورة إلى (101HV) عند السباكة بالعصر وصلت عند السباكة بالمزج إلى (90HV) أما قيمة مقاومة الشد العظمى(213MPa) عند السباكة بالعصر ووصلت إلى عند السباكة بالمزج

إلى (197MPa) وأما فيما يخص البارامترات فإن نسبة التدعيم(RE) كانت أكثر العوامل تأثيراً ومن ثم زمن الخلط (ST) وأخيراً سرعة الخلط(SP) .

الكلمات المفتاحية: سبائك الألمنيوم(AA7075)، القساوة ، مقاومة الشد العظمى، السباكة بالمزج ، تقنية السباكة بالعصر، طريقة تاغوشي.

"Comparison of The Effect of Some Manufacturing Parameters on The Hardness and Tensile Strength of Aluminum (AA7075) Reinforced with Particles and Prepared using the Stir Casting (SCT) and Squeezing Casting (SQT) Techniques using the Taguchi Method."

ABSTRACT

With the rapid development of industrial sectors, the search for advanced engineering materials capable of meeting the stringent requirements of modern applications, including light weight, excellent mechanical behavior, and low costs, has become an imperative. Metallic composite materials (MMCs) are one of the most prominent solutions. Given the industrial status of aluminum and its alloys, it is currently being reinforced with variable materials by various manufacturing technologies and obtaining (AMCs) to improve its mechanical properties, which would expand the space of industrial use for it.

In This research an aluminum alloy (AA7075) was reinforced with hard particles having size of micron of Silicon Carbide with a weight percentage (X= 5, 10 and 15 wt%) and Boron Carbide particles are added in fixed weight percentages (5 wt%) hybrid reinforced in both types of carbide by Stir and Squeeze casting technique (SCT&SQT).

Nine samples were obtained by changing the manufacturing technology parameters (Stir speed $SP = 350 \rightarrow 550 r.p.m$ Stir time $ST = 10 \rightarrow 20 min$ Reinforcement percentage $RE = 5 \rightarrow 15\%$) with pressure applied during the squeezing casting process $(P = 50 Mpa)$.

After completing the reinforcement process and obtaining hybrid reinforced aluminum (HAMCs) using both techniques (SQT & SCT), mechanical tests were conducted and determining the values of hardness (VHN) and Ultimate tensile strength (UTS). The results showed that the best properties were obtained using the squeeze casting technique. As for the parameters used after applying the Taguchi Method, the sample (S3) had higher properties compared to the rest of the samples, as the hardness value in the aforementioned sample reached (101HV) at (SQT) and (90HV) at (SCT) As

for the value of the Ultimate tensile strength(213MPa) when cast by(SQT) it reached (197MPa) when cast by (SCT) As for the parameters Reinforcement percentage RE was the most influential factor then the Stir time ST and finally the Stir speed SP.

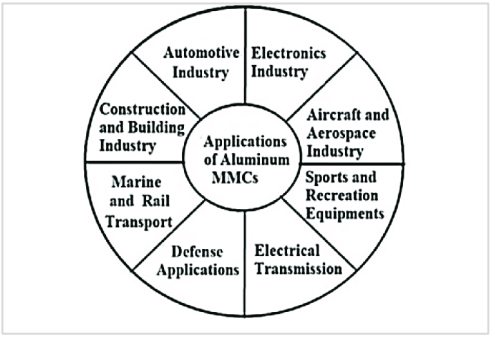
Keywords: AL-7075 alloys, Carbide, Hardness, Ultimate tensile strength, Stir Casting , Squeeze Casting , Taguchi Method.

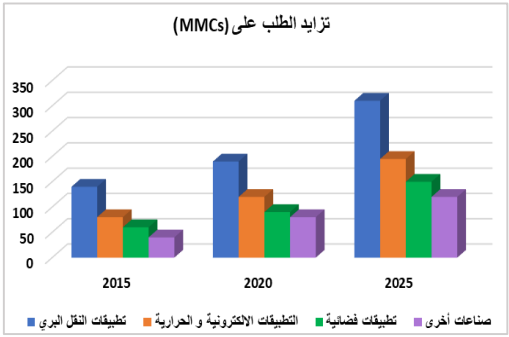
1. مقدمة:

تُعدُّ المواد المركبة المعدنية (**M**etal **M**atrix **C**omposite**s**) مواد مُرشّحة لتطبيقات هندسية واستخدامات صناعية عديدة في مجال هندسة الطيران والسيارات والصناعات العسكرية، وبديلة لمواد هندسية أخرى عالية التكلفة وغير مستقرة الخواص، ومواكبة لمتطلبات الثورة الصناعية الرابعة من مواد ذات خواص خاصة مميزة حيث تقدم كفاءة أداة ميكانيكية بموثوقية أعلى من المعادن التقليدية المُفردة نتيجة لخواصها المُحسنة وخفة وزنها.

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 كونه أهم المعادن الجاري تدعيمها وذلك سواء بإضافة العناصر السبائكية أو عمليات التشكيل المتنوعة أو المعالجات الحرارية أو طرائق التدعيم المختلفة. ومن هنا تبرز أهمية وقيمة البحث الحالي في اعتماد ونشر وتوطين تقنية التدعيم الهجين كوسيلة في تحسين السلوك الميكانيكي لسبائك الألمنيوم بما يحقق إمكانية التوسع في استخدامها الصناعي.

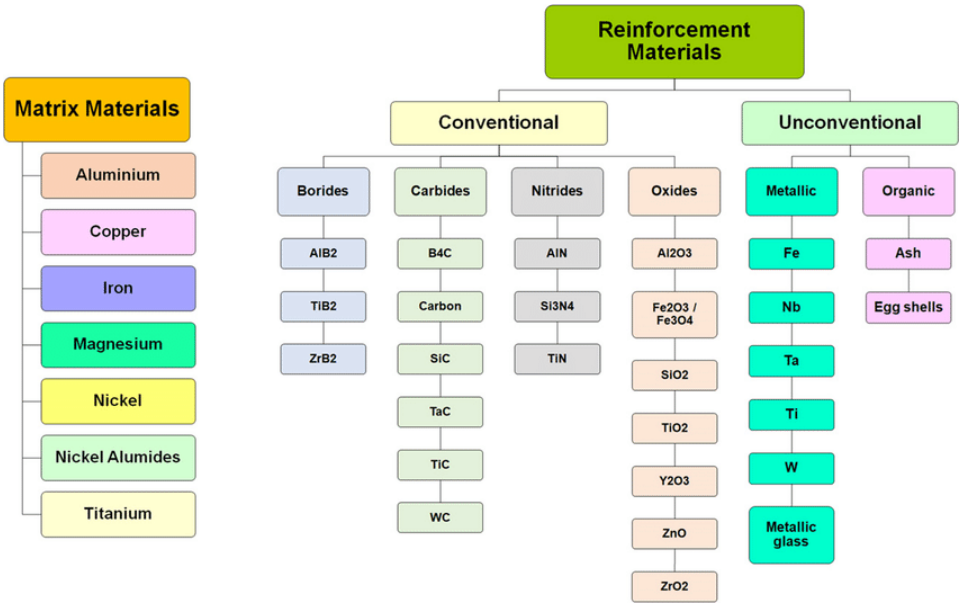
يوضح الشكل (1) تزايد الطلب على المواد المركبة ذات الأساس المعدني(MMCs) ما بين عامي (2015–2025) لأجل عديد التطبيقات الصناعية مع أمثلة على هذه التطبيقات من مختلف القطاعات الصناعية**[2] [3] [10].**





الشكل (1) تزايد الطلب على (MMCs) وأمثلة على تطبيقاتها الصناعية **[3]**

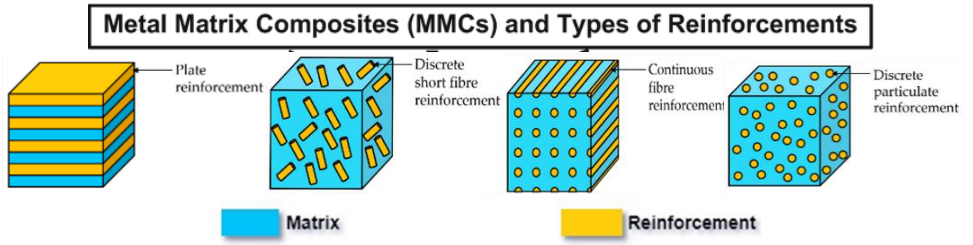
تكتسب سبائك الألومنيوم أهمية متزايدة**(موضوع البحث)** في التطبيقات الهندسية المُعاصرة كبدائل فعّالة للمواد الهندسية التقليدية، ويُعزى هذا التحول إلى المزايا العديدة التي يوفرها الألومنيوم وسبائكه، علاوة على ذلك، تتميز سبائك الألومنيوم بوزن نوعي أقل، بالإضافة إلى فعالية من حيث التكلفة، مما يجعلها خياراً جذاباً لمختلف الصناعات**[2] [3]** ، وهو ما جعله أهم وأول سبائك المعادن الملونة الجاري تدعيمها في الوقت الحالي ثم يليه النحاس وأخرهم التيتانيوم أما السبائك الأخرى الجاري تدعيمها بالإضافة لسبائك الألمنيوم والنحاس مع مختلف عائلات دقائق التدعيم المستخدمة فهي موضحة بالشكل(2) **[1][2] [8] [9]** .



الشكل (2) أهم أنواع سبائك المعادن الجاري تدعيمها ودقائق التدعيم المختلفة**[2]**

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

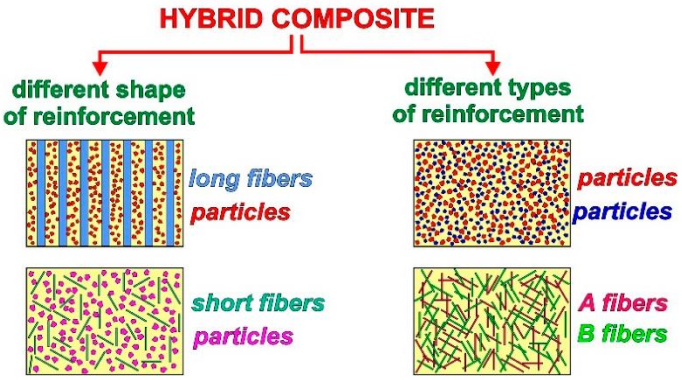
حيث إن الطرائق التقليدية للتدعيم تقوم على استخدام مادة تدعيم وحيدة (Single) بمقياس من مرتبة الميكرون (Micro scale) وبتموضع بسيط لمادة التدعيم ذات الطبيعية المعدنية أو السيراميكية أو الزجاجية لنحصل على : الألمنيوم المدعم بالدقائق (PAMCs) –الألمنيوم المدعم بألياف قصيرة أو شعيرات (SFAMCs) بشكل منظم أو عشوائي–الألمنيوم المدعم بألياف طويلة مستمرة (CFAMCs) – الألمنيوم المدعم بالطبقات(PLAMCs) **[1] [8]** . وهي موضحة كالتالي بالشكل (3):



الشكل (3) طرائق التدعيم التقليدية للألمنيوم

أما الطرائق المتطورة لتدعيم سبائك الألمنيوم : تعتمد على مواكبة التقنيات الحديثة والمُتقدمة في التدعيم والتصنيع للحصول على ألمنيوم بخواص مميزة ولتلافي العيوب والسلبيات في الطرائق التقليدية القديمة، ومن أهم الطرائق الحديثة لتدعيم سبائك الألمنيوم**[8] [10]**:التدعيم باستخدام تقنية التدعيم الهجين (Hybrid composites) (HAMCs) (التدعيم المُشترك) الطريقة (**المعتمدة في بحثنا**) والتي تعتبر تقنية هامة ومُتقدمة وقد بدأ الألمنيوم المُدعم 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 وله نوعين:

- النوع الأول: مواد تدعيم مختلفة بالشكل: الجمع بين التدعيم بالدقائق والتدعيم بالألياف الطويلة والدمج بين التدعيم بالألياف والقصيرة والتدعيم بالدقائق .



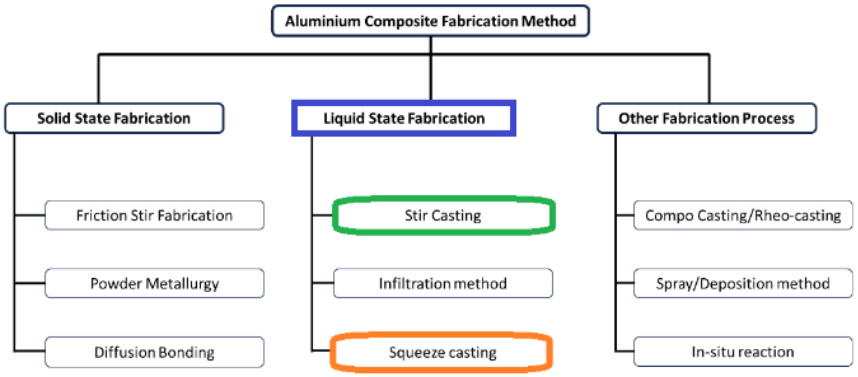
الشكل (4) طريقة التدعيم الهجين –المشترك–

- أما النوع الأخر مواد تدعيم مختلفة بالنوع: التدعيم بنوعين مختلفين من الدقائق أو الألياف أو أكثر(دقائق نانوية–دقائق ميكروية) (ألياف كربون–ألياف زجاج) (دقائق أكسيد–دقائق كربيد). وكيفية التدعيم الهجين موضح بالشكل (4)**[8] [10]** .

يتم تنفيذ التدعيم لسبائك الألمنيوم بتقنيات تصنيع متعددة أغلبها حديثة و متطورة، وقد تم تعديل العديد من تقنيات التصنيع التقليدية لتتناسب مع متطلبات تصنيع المعادن المُدعمة 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 (نوع ونسبة دقائق التدعيم، درجة الحرارة، الضغط المطبق، زمن المعالجة) إلى جانب نوعي المعدن الأساس والمادة الداعمة**[8]**.

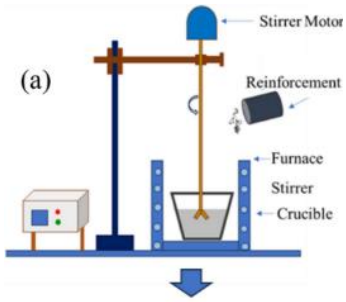
شهدت تقنيات تصنيع المواد المركبة تطوراً ملحوظاً على مر السنين، بهدف تحسين البنية المجهرية (الميكروية) والخواص الميكانيكية لـ (MMCs)، ويُعد التحدي الرئيسي في اختيار طريقة التصنيع المناسبة هو ضمان توزيع متجانس لأطوار التدعيم (سواء كانت دقائق أو ألياف أو خليط منهم) داخل المعدن الأساس، لتحقيق بنية خالية من العيوب المجهرية وضمان أداء عالي في التطبيقات النهائية. وبشكل عام تصنف أساليب التصنيع المستخدمة في صناعة (MMCs) تبعاً لدرجة حرارة المعدن الأساس أثناء عملية تصنيع (MMCs) كما في الشكل (5) الذي يُظهر بعض طرائق تصنيع (MMCs) **[1] [2] [8]**.



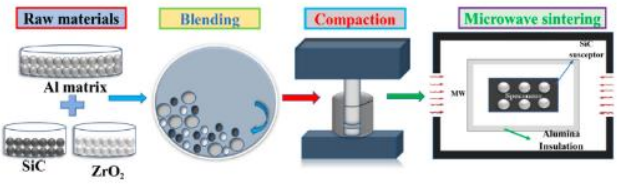
الشكل (5) طرائق تصنيع المواد المركبة المعدنية ذات أساس من الألمنيوم (AMCs) **[8]**

تقنية السباكة بالمزج(SCT= **S**tir **C**asting **T**echnique) بالإضافة لطريقة السباكة بالعصر أو بالضغط (SQT= **S**queeze **C**asting **T**echnique) تعتبران أهم طرائق تصنيع المعادن المدعمة وأكثرها استخداماً وانتشاراً في الحالة السائلة (تحتلان المرتبة الثانية من حيث تقنيات التصنيع عامةً بعد تقنية المساحيق PM) وفيهما تكون المواد الداعمة دقائق(P) أو ألياف قصيرة (SF) بنسبة وزنية محددة لا تتجاوز الـ (30%) تخلط مع مصهور المعدن الأساس بطرق التحريك الميكانيكية كما في الشكل (6) (7) يتم بعد ذلك يتم

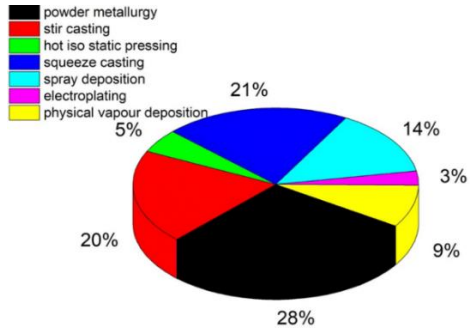
صب المواد المركبة المصهورة في قوالب الصب وتترك للتصلب وبالتالي نحصل على المعدن المدعم مباشرة وذلك في حال السباكة بالمزجSCT **أما عند السباكة بالعصرSQT** يتم صب خليط مصهور المعدن الأساس مع المواد الداعمة في قوالب مُجهزة تحت مكبس وتعريضها لضغط قبل التجمد وتعتمد التقنية على تجميد المعدن تحت الضغط أحادي الاتجاه عادة $(50 \rightarrow 150) MPa$ (في بعض الأحيان تُصنع المادة الداعمة على شكل وسادة Perform ويصب عليها المعدن المصهور ثم يطبق ضغط العصر) و قد يتم معالجة المسبوكات فيما بعد بتقنيات تشغيل والمعالجة الحرارية المعروفة التي غالباً ما تكون قليلة وأحياناً نحصل على منتجات مُشكلة نهائية .



Stir and Squeeze Casting (21&20%)



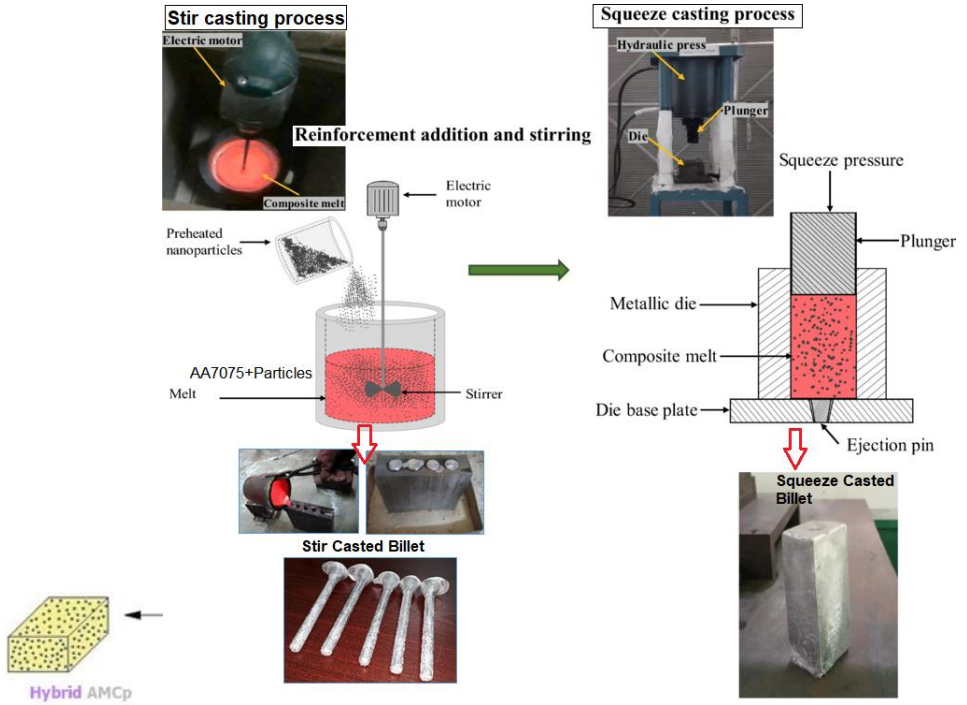
Powder metallurgy (28%)



الشكل (6) تصنيف طرائق تصنيع من حيث الاستخدام**[7] [8]**

و تتميز كلا الطريقتين (SQT&SCT) بالبساطة والسهولة والفعالية والحصول على بنية ناعمة دقيقة نتيجة سرعة التبريد والتغلب على مشكلة قابلية التبلل والتقليل من المسامية والغازات والحصول على إنهاء جيد للسطح وخواص ميكانيكية جيدة وانخفاض تكلفتها من خلال انخفاض الهدر في المعدن مقارنة بالطرائق الأخرى مما جعلهما من الأكثر انتشاراً وتطبيقاً بين باقي الطرق من أهم سلبيات هاتان الطريقتان كثرة المتغيرات والشروط وبالأخص

عند السباكة بالعصر (بحاجة إلى مكبس هيدروليكي مع إمكانية لضبط الضغط وقالب معدني حصراً مع آلية لفظ للمنتج) وإن ضبط والتحكم بهذه البارامترات سواء في (SQT&SCT) يعدّ مفتاحاً لنجاح العملية وتحقيق البنية والخواص المطلوبة **[8] [11]** .



الشكل (7) تقنية السباكة بالمزج (SCT) والسباكة بالعصر (SQT) **[8]**.

تبرز **مبررات وأهمية البحث** كما ذكرنا سابقاً نظراً للمكانة الاقتصادية العالية لسبائك الألمنيوم كونه يأتي بالمرتبة الثانية بعد الفولاذ من حيث الاستخدام ونظراً لتوافره وانخفاض سعره وخفة الوزن–مقاومة نوعية عالية – High Specific strength 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 ومتغيرات تقنية التصنيع لزيادة فعاليته ومساحة الاستفادة منه صناعياً –رفع الكفاءة ومستوى الأداء الكلي– بما يتوافق مع الحاجات في مجال السيارات والطائرات والتطبيقات الفضائية والتجهيزات الرياضية مع تحقيق التخفيض في التكلفة والوزن **[1] [3] [8]**.

إن تدعيم سبائك الألمنيوم بالصفائح والألياف بأنواعها المختلفة تقيده التكاليف الباهظة لمواد التقوية ولتصنيع الألمنيوم المدعم وصعوبة الوصول إلى الخواص المرجوة في كثير من الحالات وصعوبة التطبيق والحاجة إلى تجهيزات تصنيع خاصة و بالإضافة إلى تأخر في مواكبة التطورات التكنولوجية الحديثة نظراً لاستخدام تقنيات تصنيع محدودة كل ما سبق دفع إلى الاهتمام بتدعيم الألمنيوم بالدقائق المتنوعة من بين الطرائق التقليدية لانخفاض تكاليفه وسهولة تحقيق التدعيم باستخدامها وتعدد تقنيات تصنيع الـــ HAMCs المُتاحة سواء عند التدعيم بالدقائق سواء بشكل إفرادي(Single) أو هجين(Hybrid) **[8] [10].**

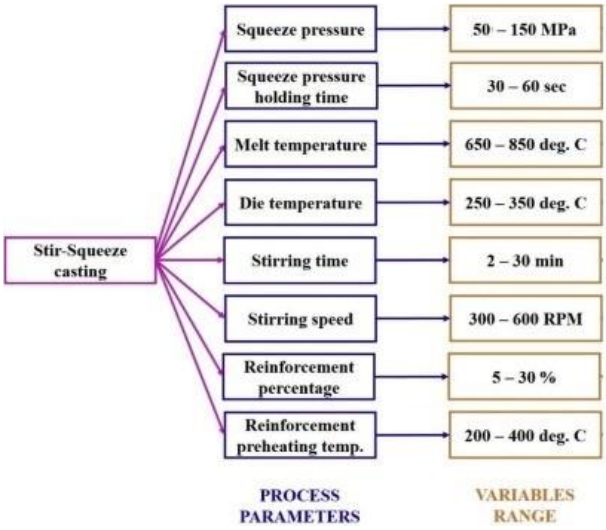
إن استخدام مواد تدعيم رخيصة وذات قابلية عالية للاندماج مع الأساس المعدني كالدقائق المتنوعة (مقارنة بمواد التدعيم الأخرى كالمواد النانوية NAMCs وشبكات التدعيم Woven والألياف المستمرةCF) عند التدعيم الهجين(Hybrid Reinforcement) أو ما يسمى التدعيم المزدوج(Daul Reinforcement) كطريقة تدعيم حديثة لسبائك الألمنيوم 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 وقابلية إعادة التدوير من خلال الصهر وإعادة تشكيل مرات كثيرة**[8]** .

وأن ما يحقق فعالية عملية تصنيع الألمنيوم المدعم بالدقائق (HAMCp) عند التدعيم الهجين اختيار طريقة ملائمة ومجدية للتصنيع مثل تقنية السباك بالمزج (SCT) أو السباكة بالعصر – بالضغط(SQT) وتتفوق طريقتي (SQT&SCT) على باقي تقنيات التصنيع بالحالة السائلة كما ذكرنا من حيث انخفاض التكلفة والبساطة والمرونة وسهولة التطبيق وتميّز خواص المنتج المُصنع بهما وهما معتمدتين تجارياً بسوق العمل **[7] [9] [11].**

تتميز منتجات(SQT&SCT) بإنها شبه نهائية يمكن أن نكتفي بالمعالجة الحرارية فقط كعملية لاحقة في حال أردنا تعديل خواص(AMCs) الميكانيكية دون تغيير شكلها.

إن استخدام الضغط خلال عملية تصنيع (HAMCs) بطريقة السباكة بالعصر يميزه عن طريقة السباكة بالمزج وهومن من شأنه تحسين الخواص الميكانيكية والتشكيل إلى الأجزاء

النهائية بدقة عالية وتقليل العيوب الناتجة عن السباكة وتصحيح عيوب البنية وتحسين التجانس وهذا ما يُعّزز من الأداء والسلوك الميكانيكي لمنتجات السباكة بالعصر **[3] [7]**.
وإن لطريقتي السباكة بالمزج والسباكة بالعصر عديد البارامترات التي يجب ضبطها والتحكم فيها لضمان نجاح عملية التدعيم وهي موضحة بالشكل (8) مع المجالات المحددة لها نذكر منها:(ضغط العصر– زمن تطبيق الضغط– درجة حرارة المصهور عند الخلط– درجة حرارة التسخين المسبق للقالب– زمن الخلط –سرعة الخلط –نسبة التدعيم– درجة حرارة تسخين دقائق التدعيم) **[7] [9]**.



الشكل (8) بارامترات تقنيتي (SCT) و (SQT) **[9]**

لذا في هذا البحث تم تصنيع مادة مركبة معدنية ذات أساس من سبائك الألمنيوم (AA7075) مدعمة تدعيماً هجيناً باستخدام دقائق كربيدية مختلفة من(SiC) بنسبة متغيرة ومن (B4C) بنسبة ثابتة بتقنيتي (السباكة بالمزج والسباكة بالعصر) وإجراء مقارنة ببعض الخواص الميكانيكية (مقاومة الشد الأعظمية–القساوة) للألمنيوم المدعم الهجين المُصنع عند استخدام كلا التقنيتين مع تغير ثلاث بارامترات للتصنيع (سرعة الخلط $SP = 350 \rightarrow 550 r.p.m$ وزمن الخلط $ST = 10 \rightarrow 20 min$ ونسبة التدعيم $RE = 5 \rightarrow 15\%$)مع تطبيق ضغط أثناء عملية السباكة بالعصر $(P = 50 Mpa)$.

بالعودة إلى بعض الأوراق البحثية الحديثة التي تمحورت حول تقوية مختلف سبائك الألمنيوم بالدقائق المتنوعة بتقنيات التصنيع العديدة ودراسة تأثير التدعيم الإفرادي والهجين وتغيير بارامترات طرائق التصنيع بطرق رياضية وتحليلية مختلفة على خواصها الميكانيكية نجد ما يلي:

في دراسة نُشرت في (2012) قام الباحثان (Vijaya and Venkataramaiah) باستخدام (Fuzzy Logic) في بيئة الماتلاب بدراسة تأثير عديد البارامترات (نوع المعدن الأساس– نوع الدقائق الداعمة–نسبة الدقائق الداعمة– حجم الدقائق) على مقاومة الشد ومتانة الصدم والقساوة والكثافة فوجدا أن نسبة الدقائق الداعمة ونوع المعدن الأساس أكثر البارامترات تأثيراً على الخواص المدروسة**[4]** .

في ورقة بحثية عام(2015) صنّع (Philip) وزملائه نموذج (ANN model) باستخدام الشبكات العصبونية (Artificial Neural Network) بهدف تقليل الوقت والتكلفة وذلك لعملية تصنيع ألمنيوم مدعم بكربيد السيلكون باستخدام طريقة(SCT) مع تغيير نسبة وحجم دقائق الكربيد وقد وجدا أن زيادة نسبة الدقائق%wt يؤثر بشكل أكثر من حجم الدقائقParticle size وأن زيادة هذه النسبة%wt يزيد من القساوة ومقاومة الشد وإجهاد الخضوع بينما حجم الدقائق لها تأثير مختلف**[5]**.

في مقالة عام (2017) تناول الباحثان (Ashok and Shanmugh) دراسة السبيكة الألمنيوم AA8011 المصنعة بطريقة (SCT) والمدعمة بدقائق مختلفة من كربيد السيلكون بثلاث نسب مختلفة (X =2, 4, 6%) مع استخدام ثلاث حجوم ميكروية مختلفة للدقائق وقد بينت النتائج بعد تطبيق التحليل الرياضي باستخدام (Taguchi, ANOVA) أن ازدياد نسبة التدعيم تحسن القساوة ومقاومة الشد العظمى مع انخفاض في الاستطالة والمتانة الصدمية وأن ازدياد حجم الدقائق يخفض من قيم القساوة ومقاومة الشد والاستطالة والمتانة الصدمية**[6]**.

في دراسة نُشرت في (2022) تطرق الدارس (Vijayakumar) وفريقه البحثي إلى دراسة تأثير أربع بارامترات على خواص سبيكة الألمنيوم6082 AA والمصنعة بطريقة السباكة بالمزج والضغط (SQT&SCT) مستخدمين طريقة (Taguchi) والتحليل باستخدام (ANOVA=Analysis of Variance) من خلال ست عشرة عينة(L16) وقد توصل البحث أن سرعة الخلط ثم ضغط العصر ثم زمن الخلط ونسبة الدقائق أكثر العوامل تأثيراً على مقاومة الشد الأعظمية والقساوة والمسامية**[7]**.

في (2024) قام الباحث(Mohammed) وآخرون بتدعيم الألمنيوم AA6105 بدقائق من كربيد السيلكون بنسبة ثابتة وكربيد التيتانيوم بنسبة متغيرة بشكل هجين بتقنيي (السباكة بالمزج SCT والسباكة بالعصر SQT) وإجراء المقارنة بين تأثير الطريقتين على مقاومة الشد والقساوة للعينات المدعمة عدا عن ذلك عمل الباحثون على دراسة تأثير مجموعة من متغيرات التصنيع على الخواص في كلا الطريقتين وقد وجد الباحثون أن تقنية (Squeeze Casting) مع تطبيق ضغط $(P = 60Mpa)$ أعطت نتائج أفضل من (Stir Casting) من حيث الخواص المدروسة وأن تأثير المتغيرات على الخواص اختلف من حيث الأهمية حسب تقنية التصنيع المتبعة**[9]**.

في أحدث الدراسات (2025) قام كل من (Imanze) (Omotehinse) بدراسة تأثير بارامترات السباكة بالعصر (Squeeze Casting) حيث بحثا في تأثير ضغط العصر ودرجة حرارة الصب ودرجة حرارة تسخين القالب على قساوة ومقاومة الشد العظمى للألمنيوم المصبوب المُصنع بطريقة (SQT) مستخدمين طريقة (Taguchi) لتحليل النتائج وبينت النتائج أن هذه الخواص تتأثر بشكل كبير بتغير هذه البارامترات وبالأخص مقاومة الشد وأن أكثر البارامترات تأثيراً هي ضغط العصر ثم درجة حرارة الصب وأخيراً درجة حرارة التسخين المسبق للقالب**[11]**.

مما تقدم في الدراسات الحديثة السابقة والمسح المرجعي نلاحظ أن اختيار طريقة تدعيم سبيكة الألمنيوم ونوع مواد التدعيم ونسبتها وطريقة التصنيع وضبط شروط كل ما سبق بالشكل

الأمثل يمثل تحدياً مهماً وأمر ضرورياً لتحسين وضبط السلوك الميكانيكي للألمنيوم وبالتالي رفع الأداء وزيادة الكفاءة الميكانيكية.

2. هدف البحث:

1. تصنيع الألمنيوم المُدعم الهجين بدقائق الكربيدات المختلفة (HAMCs) بتقنية السباكة بالمزج (SCT) وتقنية السباكة بالعصر(SQT) انطلاقاً من السبيكة الأساس (AA7075) ودراسة الخواص الميكانيكية –القساوة ومقاومة الشد العظمى– وإجراء المقارنة بينهم.
2. دراسة تأثير تغيير البارامترات (سرعة الخلط وزمن الخلط ونسبة دقائق التدعيم) باستخدام طريقة تاغوشي (Taguchi method) على الخواص الميكانيكية المدروسة لسبيكة (AA7075) ومقارنته مع بعضها عند التصنيع وتحديد الأكثر تأثيراً منها.
3. التوصل إلى مواد هندسية حديثة (ألمنيوم مدعم هجينHAMCp) بأساس من سبائك الألمنيوم(AA7075) والحصول على تصور أوضح حول ربط البارامترات من زمن الخلط وسرعة الخلط ونسبة الدقائق الداعمة وطريقة التصنيع (SQT– SCT) بتغير خواص الألمنيوم المُدعم الناتج وتحديد الأفضل والأمثل بما يتلاءم مع التطبيق المطلوب وبالتالي توقع مجال الاستخدام صناعياً.

3. مواد وطرق البحث :

1.3. المواد الأولية المُستعملة لتصنيع الألمنيوم المدعم الهجين (HAMCs):

1.3.1. المعدن الأساس (Metal Matrix):

تم استلام سبيكة (AA7075) موضوع البحث وكانت على شكل بيليت بقطر (20cm) تركيبها الكيميائي التجريبي (من جهاز التحليل الطيفي Spectrometer) والقياسي حسب ASTM كما في الجدول (1).

الجدول(1) التركيب الكيميائي لسبيكة (AA7075)

العنصر	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Cr	Ti	AL
التركيب القياسي	< 0.4	(2.1–2.9)	< 0.5	(1.2–2)	< 0.3	(5.1–6.1)	(0.18–0.28)	<0.2	Bal.
التركيب التجريبي	0.085	2.35	0.17	1.8	0.01	5.8	0.18	0.05	Bal.

1.3.2. مواد التدعيم (Reinforcement Materials):

هي عبارة عن بودرة ناعمة قاسية ميكروية من كربيد السيلكون (SiC) ومن كربيد البورون (B4C) حيث تم استخدام دقائق بحجم وسطي($20 \rightarrow 35\mu m$) بعد نخلها على جهاز المناخل الآلي نوع من (Rids dale & Co LTD, England) .

1.3.3. مواد مساعدة(Added Materials) :

هي 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) :

2.3.1. تجهيزات السباكة Stir–Squeeze Casting Set up:

تضم الأجزاء التالية الموضحة بالشكل(9) (10) **[7] [9] [11]:**

***آلية الخلط:** يتألف من محرك الخلط وهو محرك كهربائي باستطاعة $0.25Hp$ ومحور الخلط وشفرات الخلط التي تم تصنيعها من الستانلس ستيل لإنجاز عملية الخلط بعد إضافة دقائق إلى منصهر السبيكة AA7075.

***وحدة ضبط السرعة:** تم توصيله مع محرك الخلط للتحكم بسرعة الخلط مع إمكانية تغير سرعة الخلط $(0 \rightarrow 1200) r.p.m$.

***فرن الصهر:** النوع (CurboLite,Hope watt :3100 w) فرن كهربائي استطاعته $3Kw$ بحرارة قصوى $1200C^{\circ}$ لصهر الألمنيوم (AA7075) وضمنه تتم عملية الخلط وقد تم

تركيب قاعدة حاملة لآلية الخلط أعلى الفرن وتم تجهيز الفرن بمنظم حساس لضبط درجة الحرارة.

***البوتقة:** استخدمنا بوتقة مخروطية الشكل مصنوعة من الغرافيت المقاوم للحرارة تستوعب حوالي $3kg$ من الألمنيوم المراد صهره.

***المكبس:** مكبس هيدروليكي باستطاعة 20ton لتطبيق الضغط على مصهور الألمنيوم المخلوط مع دقائق الكربيد بعد صبه بالقالب المعدني.

2.3.1. قالب الصب المعدني Metal Mold :

2.3.2. ميزان إلكتروني حساس Weighing Machine :

الشكل (9) فرن الصهر – ميكانيزم الخلط– بوتقة الصهر –منظم الحرارة–وحدة ضبط السرعة–عبوات دقائق الكربيد

الشكل (10) مكبس الضغط –قالب الصب المعدني-حامل البوتقة– تطبيق ضغط العصر (50 MPa)

3.3. طريقة تنفيذ البحث:

3.3.1. تصنيع الألمنيوم المدعم [7] [8] [9] [11]:

يتم تقطيع بيليت الأساس(AA7075) إلى قطع صغيرة ووزنها وتحديد أوزان دقائق الكربيدات المُضافة بنوعيها حسب النسب الوزنية المطلوبة(wt%) في العينات المدروسة ثم وضع قطع الألمنيوم في البوتقة الغرافيتية داخل الفرن ورفع درجة حرارته إلى $850C^\circ$ لضمان انصهار السبيكة التام وبعد التأكد من انصهار الألمنيوم يتم خفض درجة الحرارة ضمن الفرن إلى درجة حرارة $750C^\circ$ليتم إضافة الدقائق الداعمة (B4C– SiC) المعلومة الحجم والوزن والنسبة (RE)المتغيرة والمُسخنة مسبقاً إلى درجة الحرارة حوالي $200C^\circ$ لخمس دقائق وذلك لإزالة الرطوبة والغازات الممتصة وتنظيف السطح من طبقة الأكاسيد وتحسين توزيع الدقائق داخل المصهور تتم الإضافة بشكل مشترك ويتم معها إضافة كمية قليلة من المغنزيوم (لا تتجاوز1%) 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 $(350 \to 450 r.pm)$ ولمدة-10) (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 الى داخل المصهور وتوزيعه خلاله وأثناء عملية الخلط يتم إعادة تسخين الخليط إلى درجة الحرارة $800C^\circ$ لتحسين انتشار وتوزيع الدقائق الداعمة ضمن المصهور وبعد انتهاء الخلط وعند درجة الحرارة $800C^\circ$ تتم عملية صب قسم من خليط الألمنيوم والدقائق الهجينة في القالب المعدني المُسخن مسبقاً لدرجة حرارة $200C^\circ$لتلافي التجمد المسبق للمصهور وللتقليل من عيوب السباكة عند السباكة بالمزج (**SCT**) والقسم الأخر من خليط الألمنيوم والدقائق الهجينة لأجل السباكة بالعصر (**SQT**) يصب في قالب معدني مُسخن مسبقاً وموضوع تحت المكبس وعند الانتهاء من الصب وامتلاء القالب بالخليط يتم تطبيق ضغط Squeeze Pressure مقداره (50MPa) لزمن Pressure time مقداره حوالي (50 sec) وأخيراً بعد التجمد (Solidification) يتم لفظ العينات من داخل القالب بعد تبريده الشكل(9) (10) وتكرر العملية عدة مرات وفقاً للنسب المطلوب إضافتها من الدقائق الداعمة

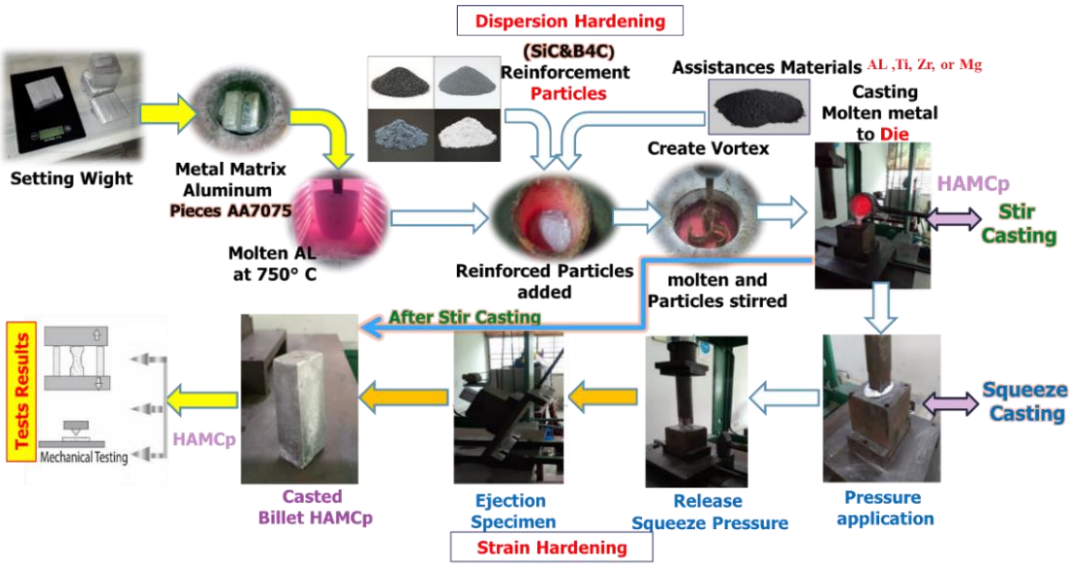
الأساس لنحصل على تسع عينات لكل اختبار (S1, S2, S3,... S9) والجدول (2) يوضح بارامترات (SCT&SQT) المُستخدمة أثناء التصنيع ومستويات تغيير البارامترات الثلاثة المعتمدة **[7] [9]**.

بعد عملية التدعيم ستكون المسبوكات مُجهدة نتيجة عملية التجمد لذا تم إجراء عملية المُجانسة (Homogenization) (إحدى عمليات التخمير) لجميع مسبوكات الألمنيوم المُدعمة لتحقيق التجانس وإزالة الإجهادات الداخلية بالتسخين لدرجة $410C^{\circ}$ وإبقاء لزمن $2 our$ ثم تبريد بطيء بجو الفرن لتكون العينات جاهزة للاختبارات**[8] [10]**.

الجدول (2) بارامترات (SCT&SQT) المطبقة أثناء التصنيع مع توضيح مستويات تغيير البارامترات الثلاثة المعتمدة

Stir–Squeeze Casting Parameters	
Squeeze Pressure	$(50MPa)$
Pressure time	$(60sec)$
Stirring temperature	$(750C^{\circ})$
Preheating temperatures of die	$(200C^{\circ})$
Level (1) Spindle speed	$(350-400-450r.p.m)$
Level (2) Stirring Time	$(10-15-20\min)$
Level (3) Reinforcement Percentage	$(5\%B_4C)\&(5-10-15\%SiC)$
Preheating temperatures of reinforcements	$(200C^{\circ})$

وبالتالي يمكن تلخيص خطوات تنفيذ البحث كما في المخطط التالي الشكل (11):



الشكل (11) مخطط تنفيذ البحث الذي أُنجز في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

4.3. التجهيزات المستعملة لإجراء الفحوصات والاختبارات الميكانيكية:

وهي موضحة بالشكل(12):

الشكل (12) أجهزة الفحص والاختبارات : (جهاز الشد –جهاز القساوة) في مخبر علم المواد والمعالجات الحرارية بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة حمص.

قبل إجراء الاختبارات على العينات المدعمة تم تقسيمها إل ثلاث مستويات الجدول (3) (3Levels) $[3^{rd}\&2^{nd}\&1^{st}]$ حسب البارامترات المتغيرة وفق طريقة تاغوشي(Taguchi method) مع الحساب وفق الخيار "larger the better " وبالتالي

الحصول على تسع عينات مختلفة (3 مستويات*3 بارامترات) وفقاً لما سبق كما يلي (S1, S2, S3.... S8, S9)وبعد ذلك تم تجهيز العينات (مع عينات إضافية عند نفس الشروط لتحقق من النتائج) بعمليات التشغيل للاختبارات وفق(ASTM standards) كما في الجدول (3) الذي يوضح تصنيف العينات ومستوياتها وفق Taguchi Method:

الجدول(3) تصنيف العينات ومستوياتها وفق Taguchi Method[7] [9] [11]

Control Parameters	Levels			Observed Values
	1	2	3	
Stirrer speed (SP)	350	450	550	1)Hardnes in VHN 2) Tensile strength in UTS
Stir Time (ST)	10	15	20	
SiC Wt. %(RE)	5%	10%	15%	

بعد ذلك تم تشكيل مصفوفة تاغوشيTaguchi L9 orthogonal array للعينات التسعة **[9] [11]** وفق الجدول (4):

الجدول(4)Taguchi L9 orthogonal array

Sample(ID)	(SP)	(ST)	(RE)
S1	1	1	1
S2	1	2	2
S3	1	3	3
S4	2	1	2
S5	2	2	3
S6	2	3	1
S7	3	1	3
S8	3	2	1
S9	3	3	2

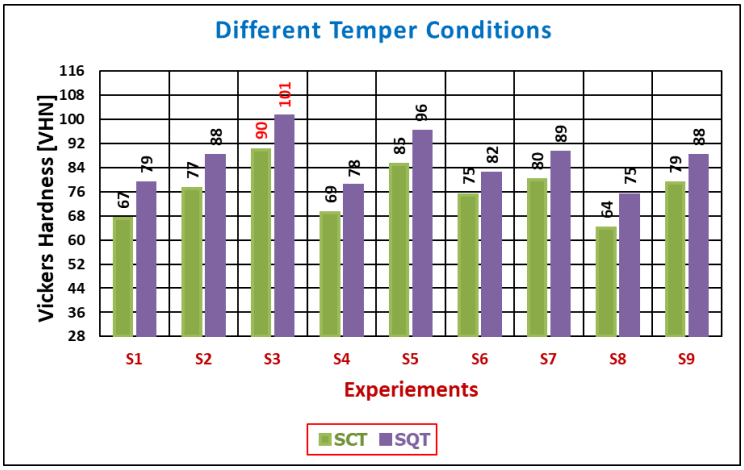
4. النتائج ومناقشتها (Results and Discussion):

النتائج:

1) نتائج اختبار القساوة Hardness test Results :

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

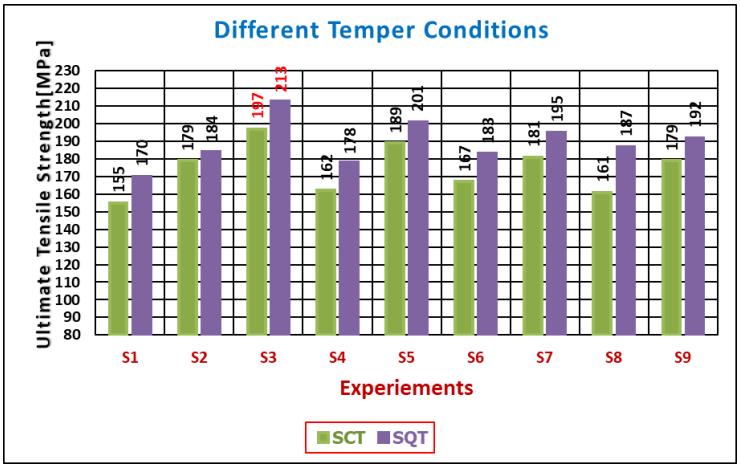
الهدف من إجراء القساوة مراقبة نجاح التدعيم بطريقتي(**SCT&SQT**) مع دراسة تأثير تغير البارامترات الثلاثة المدروسة (**SP&ST&RE**) وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (13) حيث أن أعلى قيمة للقساوة لعينات الألمنيوم المدعم كانت عند استخدام السباكة بالعصر(**SQT**) حيث ارتفعت القساوة وبلغت أعلى قيمة لها (101HV)العينة –S3 – أما عند السباكة بالمزج (**SCT**) كانت قيمها(90HV) وذلك عند استخدام البارامترات التالية عند التحضير :(**SP=350r.p.m&ST=20min&RE=15%SiC**).



الشكل (13) قيم القساوة لسبيكة الألمنيوم AA7075 عند تغيير البارامترات(**SP&ST&RE**)

2) نتائج اختبار الشد Tensile Test Results :

تم إجراء اختبار الشد 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 التسعة حسب المواصفة القياسية(ASTM– B557) وبمقاطع مسطحة (10X15mm) بطول قياس (36mm) وبعد الحصول على مخططات الشد للعينات تم تحديد قيم مقاومة الشد الأعظمية UTS كما هو موضح بالشكل (14).



الشكل (14) قيم مقاومة الشد الأعظمية لسبيكة الألمنيوم AA7075 عند تغيير البارامترات(**SP&ST&RE**)

وكانت قد بلغت أفضل قيمة لمقاومة الشد الأعظمية: (UTS=213MPa) عند التدعيم الهجين بتقنية السباكة بالعصر بنسبة تدعيم (Wt=15%SiC+5%B4C) العينة –S3– عند البارامترات التالية:(**SP=350r.p.m&ST=20min&RE=15%SiC**).

مناقشة وتفسير النتائج:

المناقشة والتقييم:

يوضح الجدول (5) العينات التسعة ومختلف مستويات البارامترات المدروسة (**SP&ST&RE**) مع قيم القساوة ومقاومة الشد العظمى التي حصلنا عليها لأجل طريقتي التصنيع بالسباكة بالعصر وبالسباكة بالمزج(**SCT&SQT**).

الجدول(5) العينات ومختلف البارامترات المدروسة مع قيم القساوة ومقاومة الشد

Sample Name(ID)	Process parameters			Stir Casting (SCT)		Squeeze Casting (SQT) at (50 Mpa)	
	Stirrer speed (SP)	Stir Time (ST)	Reinforcement (RE)	(UTS)	(VHN)	(UTS)	(VHN)
S1	350	10	5	155	67	170	79
S2	350	15	10	179	77	184	88
S3	350	20	15	197	90	213	101
S4	450	10	10	162	69	178	78
S5	450	15	15	189	85	201	96
S6	450	20	5	167	75	183	82
S7	550	10	15	181	80	195	89
S8	550	15	5	161	64	187	75
S9	550	20	10	179	79	192	88

A. تحديد بارامتر التصنيع الأمثل على قيم القساوة باستخدام طريقة تاغوشي:

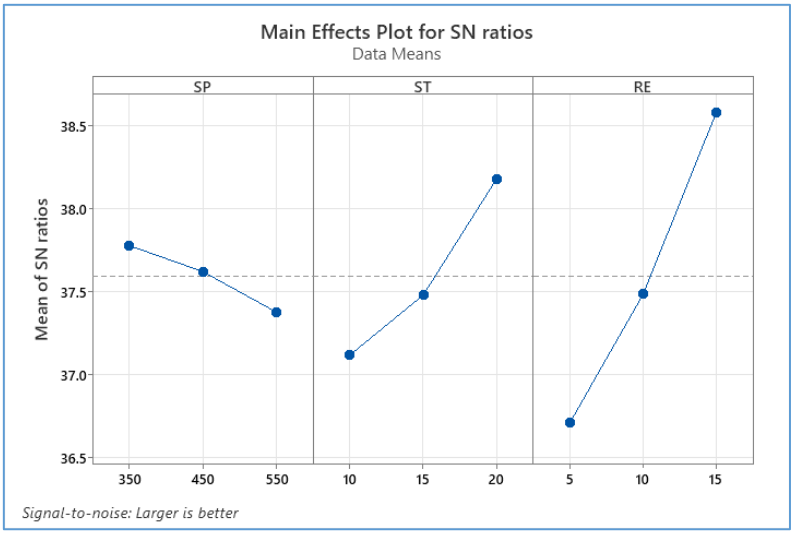
من الجدول (6) والشكل (15) بعد تحديد النسبة (S/N) من خلال برنامج (Minitab) وباستخدام طريقة تاغوشي(Taguchi method) وفق الخيار " larger the better " وجدنا (الحقلRank) أن تأثير المعاملات الأكثر على القساوة هي : نسبة التدعيم**(RE)** ثم زمن الخلط **(ST)** وأخيراً سرعة الخلط **(SP)**.

الجدول(6) قيم النسبة (S/N) بالديسبل (dB)لأجل قيم القساوة المدخلة عند تغيير البارامترات

Table (6) for Signal to Noise Ratios(S/N) for Hardness (Larger is better)

Level	SP	ST	RE
1	37.78	37.12	36.72

2	37.62	37.48	37.49
3	37.38	38.18	38.58
Delta	0.40	1.06	1.86
Rank	3	2	1



الشكل (15) دراسة تأثير تغيير البارامترات(**SP&ST&RE**) على قيم القساوة لسبيكة AA7075 **باستخدام النسبة** (S/N)**بواحدة** (dB)

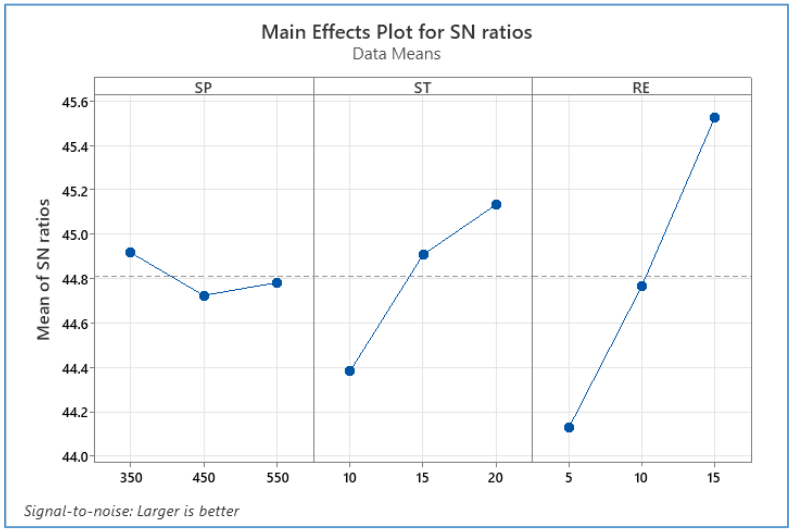
B. تحدد بارامتر التصنيع الأمثل على قيم مقاومة الشد باستخدام طريقة تاغوشي:

من الجدول (7) والشكل (16) بعد تحديد النسبة (S/N) من خلال برنامج (Minitab) وباستخدام طريقة تاغوشي(Taguchi method) وفق الخيار "larger the better" وجدنا (الحقلRank) أن تأثير المعاملات الأكثر على قيمة مقاومة الشد العظمى هي : نسبة التدعيم**(RE)** ثم زمن الخلط **(ST)** وأخيراً سرعة الخلط **(SP).**

الجدول(8) قيم النسبة (S/N) **بالديسبل** (dB)**لأجل قيم مقاومة الشد المدخلة عند تغيير البارامترات**

Table (7) for Signal to Noise Ratios(S/N) **for UTS Larger is better**

Level	SP	ST	RE
1	44.92	44.38	44.13
2	44.72	44.91	44.77
3	44.78	45.13	45.52
Delta	0.19	0.75	1.39
Rank	3	2	1



الشكل (16) دراسة تأثير تغيير البارامترات(**SP&ST&RE**) على قيم مقاومة الشد العظمى لسبيكة AA7075 **باستخدام النسبة** (S/N)**بواحدة** (dB)

نلاحظ بعد تطبيق Taguchi Method عند نسبة التدعيم الهجين (**15%SiC**+5%B4C) العينة (S3) كانت أعلى قيم للخواص الميكانيكية(القساوة ومقاومة الشد العظمى) عند البارامترات الأمثل التالية:(**SP=350r.p.m&ST=20min&RE=15%SiC**). وأن السباكة بالعصر أعطت قيم أعلى للقساوة ومقاومة الشد العظمى من السباكة بالمزج وبالتالي أصبح لدينا طيف واسع من العينات بخواص مختلفة تحقق(الكفاءة العالية والتكلفة المخفضة بالتصنيع) بما يتلاءم مع التطبيق الصناعي المفروض .

يجدر بنا الإشارة إلى أن النتائج والتي 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 ومُتغيرتها واختلاف الطرق الرياضية لدراسة تأثير هذه المتغيرات **[7] [9] [10] [11].**

تفسير النتائج:

يتعلق الميكانيزم المسؤول عن تحسن الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم المدعم الهجين بانتظام وحسن توزع 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)**:[8] [10]** :

*وفقاً لنظرية أوروان 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 تصطدم 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 وبالتالي زادت فعالية تقوية أوروان في تحسين مقاومة وقساوة المعدن.

*نقل الحمل (Load Transfer): 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 وقساوة المعدن المدعم.

* تنعيم 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 وتُسهم 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 التدعيم مع المعدن الأساس لتكوين أطوار مترسبة دقيقة جداً عند حدود الدقائق وداخل المعدن وبالتالي تعمل هذه الرواسب الدقيقى بنفس طريقة الدقائق الداعمة حيث تعيق وتعرقل حركة الانخلاعات وتزيد مقاومة المعدن.

من الجدير ذكره أن تطبيق الضغط أثناء عملية السباكة بالعصر يحقق تقوية المسبوكات المدعمة وتجعلها أقسى وذات مقاومة أعلى وذلك من خلال إدخال شبكة انخلاعات جديدة في المادة والتي تتداخل مع استمرار حركة الانخلاعات الأساسية وتكديسها وتكّون عوائق لحركة بعضها البعض عدا على أنها تساعد على التخلص من المسامية والفراغات الميكروية الموجودة ضمن البنية **وهذا ما جعل قيم الخواص عندها أعلى من السباكة بالمزج [11] [7] [8] [9].**

5. الاستنتاجات والتوصيات للأعمال المستقبلية:

<u>الاستنتاجات:</u>

1. من خلال هذه الدراسة توصلنا لتصنيع مادة مركبة معدنية (HAMCp) من أساس سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة تدعيماً هجيناً بنوعين مختلفين من الدقائق الكربيدية القاسية بشكل ناجح بتقنيتي (SQT) و(SCT) .
2. تحسن وارتفاع الخواص الميكانيكية للمادة المركبة المعدنية له صلة وثيقة بتقنية التصنيع (السباكة بالعصر كانت أفضل من حيث الخواص من السباكة بالمزج) وبالاختيار المناسب لبارامترات طريقة التصنيع بما يتلاءم مع الاستخدام المطلوب.
3. في ضوء الدراسة الحالية أدى تغير البارامترات المدروسة إلى تغير الخواص الميكانيكية للألمنيوم الأساس (AA7075) وهذا ظهر بشكل واضح من خلال تغير النسبة($\boldsymbol{S/N}$) Signal to Noise Ratio المحسوبة وفق طريقة تاغوشي وذلك عند كل مستوى من القساوة ومقاومة الشد العظمى .
4. من خلال التحليل الرياضي والدراسة وفق طريقة تاغوشي تبين ان أكثر البارامترات تأثيراً على قيمة القساوة ومقاومة الشد العظمى هي : نسبة التدعيم**(RE)** ثم زمن الخلط **(ST)** وأخيراً سرعة الخلط **(SP).**
5. حصول التحسن في الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم الأساس (AA7075) مرتبط بزيادة نسبة التدعيم وزمن الخلط وخفض سرعة الخلط.
6. أفضل قيم للخواص الميكانيكية للألمنيوم المدعم (القساوة ومقاومة الشد الأعظمية) تم الحصول عليها عند نسب تدعيم هجين(5%B4C+**15%SiC**)– العينة(S3)– عند البارامترات التالية:(**SP=350r.p.m&ST=20min&RE=15%SiC**) عند التصيع بكلا التقنيتين.

<u>التوصيات للأعمال المستقبلية:</u>

1. مقارنة النتائج التي توصلت لها الدراسة مع طرق وتقنيات تصنيع أخرى(تكنولوجيا المساحيق أو السباكة بالطرد المركزي) كما نوصي باستخدام دقائق داعمة نانوية في تحقيق التدعيم للألمنيوم واستخدام ومقارنة سبائك أخرى من الألمنيوم مع ما تناولناه في دراستنا الحالية.

2. التوسع بدراسة تأثير متغيرات وبارامترات تصنيع أخرى (درجة حرارة الخلط –ضغط العصر –تصميم مروحة الخلاط– نوع الدقائق–نوع المعدن الأساس.....) على الخواص الميكانيكية للألمنيوم المُدعم المُصنع.
3. نوصي في مجال توصيف سلوك هذا النوع من المواد بتوسيع النتائج لتشمل دراسة خواص ميكانيكية أخرى للألمنيوم بعد التدعيم(مقاومة الضغط والانحناء والتعب والزحف والاهتراء.....).
4. استخدام طرق رياضية وتحليلية أخرى لتحديد واستقراء البارامترات الأمثل مثل: –ANOVA analysis –Artificial Neural Network – Artificial Intelligence (AI) .Fuzzy Logic

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] Vijaya, G and Venkataramaiah , P, **2012-Development of Aluminum metal matrix composite through selection of influential factors by using fuzzy logic**. Vol.9, Issue 53, Elixir International Journal (Elixir), India, 11905-11909p.

[5] Philip, O., Bolu, A., and Anthony, O., **2015 - Artificial Neural Network Prediction of Aluminium Metal Matrix Composite with Silicon Carbide Particles Developed Using Stir Casting Method,** Vol (15), No:02 International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS, Nigeria, 1- 9p.

[6] Ashok ,N and Shanmugh ,P, **2017**- **Influence of Particle Size on the Mechanical Properties of Al8011-SIC Composites-Taguchi Approach**. Vol.10, No 5, International Journal of Chem Tech Research, USA, 293-300p.

[7] Vijayakumar, S., Kumar ,P., Pappula,S., and Pydi ,H., **2022**-**The Effect of Stir-Squeeze Casting Process Parameters on Mechanical Property and Density of Aluminum Matrix Composite**, Vol ,(22), Issue 04, Journal of Advances in Materials Science and Engineering (Hindawi), India&Ethiopia, 1-10p.

[8] Gaurav ,M,Kafaltiya,S and Chauhan ,S, **2024**-**Fabrication and Mechanical Strengthening of Aluminium Composite Material**. Volume 15, Issue 11,Journal of Materials and Environmental Science, India, 1526-1548p.

[9] Habelalmateen,M, R. Srinivasan, Ruby ,P and SHERIL,S **2024**-**Mechanical Property Evaluation of Stir-Squeeze Cast Al-Based Nano SiC Composites**. Vol.26, 491 International Journal of Web of Conferences (EDP Sciences), Iraq, China, 19-28p.

[10] 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.

[11] Imanze ,K and Omotehinse ,S, **2025**-**Effect of Squeeze Casting Parameters on Tensile Strength and Hardness of Aluminum Cast Part**. Vol.1, Issue 1, International Journal of Tropical Engineering and Computing, , Nigeria, 9-17p.

دراسة تأثير إضافة فرشة أنابيب مياه بلاستيكية في الأداء الحراري لمجفف شمسي للبصل

اعداد: علي عبدو اشراف:د.محمد باكير

الملخص :

استخدام المجففات الشمسية من أهم الوسائل للحفاظ على الأغذية ، وتخزينها بأقل التكاليف الممكنة ، وعدم الإضرار بالبيئة ، ولكن تكمن مشكلة المجففات الشمسية في المدة الزمنية الطويلة اللازمة للانتهاء من عملية التجفيف، ومعدل التجفيف القليل، وبالإضافة لضعف الأداء الحراري ، لذلك كان من الضروري إجراء المزيد من الدراسات لرفع درجة حرارة هواء التجفيف . فقد تم تصميم مجفف شمسي منخفض التكلفة، ودراسة تأثير إضافة فرشة أنابيب مياه بلاستيكية في الأداء الحراري لمجفف شمسي للبصل الذي لم يستخدم من قبل لتسخين هواء التجفيف، حيث يعتبر البصل من الخضراوات الهامة في العالم. يتكون المجفف الشمسي من: مجمع شمسي ،غرفة تجفيف، مدخنة وانابيب مياه بلاستيكية p v c . طول الانبوب 6 m وبقطر 2 inches ومجمعين من البلاستيك بطول 2 m و بقطر 4 inches ، حيث المجمع عبارة عن إطار مصنوع من الحديد على شكل شبه منحرف بطول 6 m وعرض2m مغطى بغطاء بلاستيكي شفاف من البولي اتلين ، مقدمة المجمع بارتفاع 0.6 m اما ارتفاعه من الجهة الأخرى 1 m ، غرفة التجفيف مغطاة بالكامل بغطاء بلاستيكي شفاف من البولي اتلين أبعاد غرفة

التجفيف: الطول 2 m والعرض 0.5 m , وتحتوي على ثلاثة رفوف بطول 2 m وعرض 0.5m، توضع فوق بعضها البعض المسافة بين الرفوف0.5 m المدخنة بارتفاع 3m وقطر0.15m . تم تقطيع البصل الى شرائح دائرية بعد تقشيره بسماكة 3 mm ، وتحميله على الرفوف الثلاثة بمعدل3.3 kg/m2 . تم إجراء خمس اختبارات على المجفف ، الاختبار الأولي كان في حالة أرضية المجمع رمل فقط ، أما الاختبار الثاني كانت النسبة لفرشة الأنابيب البلاستيكية إلى مساحة المجمع 25%, الاختبار الثالث كانت النسبة 50% , الاختبار الرابع % 75 ,اما الاختبار الخامس فأن النسبة 100%، وأظهرت النتائج أن إضافة فرشة الأنابيب البلاستيكية قد سرع عملية التجفيف للوصول لمحتوى رطوبة مناسب من 23h في الاختبار الاول الى12h في الاختبار الخامس ، وتحسن معدل التجفيف من128.7 g/h الى246.5 g/h ، وكذلك ارتفع فرق درجات الحرارة بين مخرج ومدخل المجمع من15 c^0 الى24.7 c^0، وازدادت كفاءة المجمع من 46% الى 72% وقت الذروة .

الكلمات المفتاحية (مجفف شمسي; بصل ; مردود مجمع ; محتوى الرطوبة ; فرشة أنابيب مياه بلاستيكية).

A study of the effect of adding a plastic water pipe mattress Thermal of a solar dryer for onions

Abstract :

Using solar dryers is one of the most important methods for preserving and storing food at the lowest possible cost and without harming the environment. However, the problem with solar dryers lies in the long drying time required, the low drying rate, and their poor thermal performance. Therefore, further studies were necessary to increase the drying air temperature. A low-cost solar dryer was designed, and the effect of adding a plastic water pipe bed on the thermal performance of a previously unused onion dryer was studied. Onions are considered one of the most important vegetables in the world. The solar dryer consists of: a solar collector, a drying chamber, a chimney, and plastic water pipes. The PVC pipe is 6 m long and 2 inches in diameter, and there are two plastic collectors, each 2 m long and 4 inches in diameter. The collector is a trapezoidal iron frame, 6 m long and 2 m wide covered with a transparent polyethylene plastic sheet. The front of the collector is 0.6 m high, while the other side is 1 m high. The drying chamber is completely covered with a transparent polyethylene plastic sheet. The dimensions of the drying chamber are 2 m long and 0.5 m wide and

it contains three shelves each 2 m long and 0.5 m wide, stacked on top of each other with a distance of 0.5 m between the shelves. The chimney is 3 m high and 0.15 m in diameter. The onions were peeled, sliced into rounds 5 mm thick, and loaded onto the three shelves at a rate of 3.3 kg/m². Five tests were conducted on the dryer. The initial test was conducted with the collector floor being sand only. The second test had a ratio of plastic pipe bed to collector area of 25%. The third test had a ratio of 50%. The fourth test had a ratio of 75%. The fifth test had a ratio of 100%. The results showed that adding the plastic pipe bed accelerated the drying process to reach a suitable moisture content from 23 hours in the first test to 12 hours in the fifth test. The drying rate improved from 128.7 g/h to 246.5 g/h. The temperature difference between the collector outlet and inlet also increased from 15°C to 24.7°C. The collector efficiency increased from 46% to 72% at peak time.

Keywords: (Solar dryer ;Onion; Moisture content; Collective returns; Water pipe brush; Plastic).

1- المقدمة:

يُعدّ التجفيف عملية أساسية في حفظ المحاصيل الزراعية وأيضا في العديد من الصناعات وتعرف بأنها عملية إزالة الرطوبة من المنتج، ويمكن تنفيذها على مرحلتين، في المرحلة الأولى تزال الرطوبة الموجودة داخل المنتج إلى السطح وتجفف في الهواء بمعدل ثابت على شكل بخار ماء. أما المرحلة الثانية فتتضمن معدل تجفيف بطيء، وتعتمد هذه العملية على خصائص المادة المراد تجفيفها ويمكن تجفيف المواد المختلفة، وهي الغازات والسوائل والمواد الصلبة، بطرق مختلفة يُعد التجفيف الشمسي مناسبا" بشكل خاص للدول الواقعة في الحزام الشمسي للأرض، يُعد استهلاك الطاقة أحد أهم الاعتبارات في أنظمة التجفيف. ويعتمد استهلاك الطاقة على نوع المنتجات المراد تجفيفها. ويؤدي استخدام المجففات التقليدية إلى ارتفاع استهلاك الطاقة والتكاليف [1]. إن استخدام المجففات الشمسية من أهم الوسائل للحفاظ على الأغذية وتخزينها بأقل التكاليف الممكنة وعدم الإضرار بالبيئة ، فقد تم تصميم مجفف شمسي منخفض التكلفة ودراسة تأثير إضافة فرشة أنابيب مياه بلاستيكية في الأداء الحراري لمجفف شمسي للبصل الذي لم يستخدم من قبل لرفع درجة حرارة هواء التجفيف، حيث يعتبر البصل من الخضراوات الهامة في العالم ، و يحتل المرتبة الثانية بين جميع الخضروات في الاقتصاد العالمي بقيمة تقدر $ 6 billionسنويا، وازداد إنتاج البصل في العالم بنسبة 25%على الأقل خلال السنوات العشرة الماضية ، حيث بلغ الإنتاج العالمي من البصل حوالي 44 million tons ،مما يجعله ثاني أهم محصول زراعي بعد الطماطم[2].أما انتاج سوريا من البصل الجاف الاحمر

فقد بلغ لعام 2021 حوالي 76700 tonالى مساحة 6882 hectare.[3] تنقسم الورقة على النحو الآتي : يقدم القسم الثاني مشكلة البحث، ويعرض القسم الثالث والرابع هدف البحث وأهميته أما القسم الخامس فيبين النموذج المقترح، بينما يوضّح القسم السادس الإعدادات التجريبية ، ويناقش القسم السابع النتائج وتفسيراتها، ويختتم القسم الثامن بالاستنتاجات والتوصيات.

2- مشكلة البحث:

- المدة الزمنية الطويلة اللازمة لعملية التجفيف- معدل التجفيف القليل
- ضعف الأداء الحراري- ضرورة إجراء المزيد من الدراسات حول عملية رفع درجة حرارة هواء التجفيف.

3-هدف البحث :

- تصميم مجفف شمسي مختلط منخفض التكلفة ،التحقق من النموذج تجريبياً، دراسة الأداء الحراري للمجفف المقترح ، تسريع عملية التجفيف بإضافة فرشة أنابيب مياه بلاستيكية في أرضية المجمع.

4-أهمية البحث :

استخدام المجففات الشمسية من أهم الوسائل للحفاظ على الأغذية ، وتخزينها بأقل التكاليف، وعدم الإضرار بالبيئة ، وهذا النظام يستخدم ميزة أنابيب الماء البلاستيكية كتخزين حراري ، التي لم تجرب قبل في أنظمة التجفيف بالإضافة للرمل ايضا" كتخزين حراري. كما تعمل استخدام المجففات الشمسية على تقليل استهلاك مصادر الطاقة التقليدية ، وبالتالي ترشيد استهلاك الطاقة .

5-الدراسات المرجعية :

قامت الدراسة (4) بدراسة التجفيف الحراري للبصل باستخدام سخان الهواء الشمسي مسطح أبعاده 1.82 m× 0.92 m ×0.32m غرفة التجفيف أبعادها كالتالي

1 m × 0.72 m× 0.66 m كانت الرطوبة الأولية في البصل 93% وانخفضت إلى 5% .الزمن اللازم للتجفيف 16h. الكمية المجففة 6 kg .خلصت الدراسة إلى أن سخان الهواء الشمسي المسطح المصمم جفف البصل في فترة زمنية قصيرة.

قدمت الدراسة (5) تصميم لمجفف شمسي يغطي مساحة 3 m × 3 m من الأرض يستخدم $1m^2$ منها لغرفة التجفيف . تم تقطيع شرائح البصل بسماكة 3 mm .تم تجفيف الشرائح من محتوى الرطوبة الأولي 87.10% إلى محتوى رطوبة نهائي بنسبة 9.1% خلال زمن 10h في التدوير القسري، وكان معدل التجفيف الأقصى لشرائح البصل.6 kgh2o/kg. ms. بينما في التجفيف الشمسي في الهواء الطلق كان معدل التجفيف الأقصى.kgh2o/kg. ms 0.82. استغرق تجفيف شرائح البصل حتى محتويات الرطوبة النهائية 20h في التجفيف الشمسي بالحمل الطبيعي ، وثلاثة أيام التجفيف الشمسي في الهواء الطلق. كمية البصل المجففة 7.5 kg .

صممت الدراسة (6) نموذج اولي لمجفف شمسي معدل لتجفيف شرائح البندورة والتفاح والكشك واختباره ومقارنته مع التجفيف الشمسي المباشر. يعتمد عمل المجفف على مبدأ تسخين الماء باستخدام وحدة تسخين ماء بالطاقة الشمسية وثم تمريره ضمن حجرة تجفيف عبر مشعات ويجري الماء عن طريق مضخة 12 v مع بطارية ولوح شمسي لتأمين التغذية الكهربائية للجهاز. حيث قلل المجفف الشمسي زمن التجفيف للبندورة بحوالي 56% بالمقارنة مع التجفيف الشمسي المباشر المفتوح.

بحثت الدراسة (7) تصميم مجفف شمسي مختلط على شكل شبه منحرف مغطى بالزجاج بأبعاد 5 m × 6 m من مساحة الأرض. ارتفاع الجدار الجنوبي 1 m والشمالي 2 m .تم اختيار أربعة منتجات البصل والطماطم والملوخية والنعناع. وتم حساب الكمية المطلوبة من كمية الإشعاع الشمسي للوصول إلى محتوى الرطوبة النهائي للمنتج .وجد أن أوراق الملوخية تتطلب وقت أقل وجرعة إشعاع شمسي اقل لتجفيفها مقارنة بأوراق النعناع نظرا لمساحة سطحها الأكبر من أوراق النعناع .في المنتجات التي تحتوي على كمية كبيرة من محتوى الماء مثل الطماطم والبصل يتطلب التجفيف المزيد من الوقت وكمية الإشعاع الشمسي اكبر . لقد وجد أن الطماطم تتطلب وقت أقل وكمية إشعاع شمسي أقل من البصل حيث أن معدل انتقال الرطوبة من وسط المنتج إلى سطح الطماطم الخارجي أعلى من البصل

6- الجانب النظري :

6-1 دراسة الكفاءة الحرارية للمجمع الشمسي :

6-1-1 - حساب كمية الطاقة المفيدة التي يكتسبها الهواء من الاشعاع في المجمع :

$$Q_{us} = \dot{m} \times cp \times (Tco - Ti) \ldots . [8]$$

$\dot{m}$: معدل تدفق الهواء kg/s.

cp : السعة الحرارية النوعية للهواء $j / kg .c^0$.

Tco : درجة حرارة الهواء عند مخرج المجمع الشمسي c^0.

Ti : درجة حرارة الهواء الداخل الى المجفف c^0.

6-1-2 مقدار الطاقة الحرارية على المجمع الشمسي من الاشعاع الشمسي :

$$Q\,c = Ic \times Ac \quad \ldots.[8]$$

Ic : تدفق الاشعاع الشمسي على المجمع w/m^2

Ac : المساحة الفعالة للمجمع الشمسي m^2

6-1-3 حساب الكفاءة الحرارية للمجمع %:

$$\eta_c = \frac{ma \times cp \times (Tco - Ti)}{Ac \times Ic} \quad \ldots.[8]$$

6-2 - حساب معدل فقدان الرطوبة من شرائح البصل :

كمية الماء التي تزال من المنتج طوال فترة التجفيف هي :

$$m_w = \frac{m_i\,(M_{ci} - M_{cf})}{(100 - M_{cf})} \quad \ldots. [9]$$

m_w : كمية الماء المتبخرة ب Kg

mi : الكتلة الأولية للمنتج قبل التجفيف ب kg

M_{ci} : محتوى الرطوبة الاولي على أساس رطب%

M_{cf} : محتوى الرطوبة النهائي على أساس رطب %

3-6 - دراسة الانتقال الحراري في المجمع الشمسي :

صافي الإشعاع خارج الدفيئة:

$$R_{n.e} = R_a - R_{C.e}.$$

R_a :الاشعاع المنبعث من السماء w/m^2

$R_{C.e}$: الاشعاع المنعكس من السطح الخارجي للغطاء w/m^2

صافي الإشعاع داخل الدفيئة :

$$R_{n.i} = R_{C.i} - R_S$$

$R_{C.i}$:الاشعاع المنبعث من السطح الداخلي للغطاء w/m^2

R_S :الاشعاع المنعكس من سطح الارض w/m^2

توازن الطاقة على سطح التربة :

$$R_{n.i} + H_S + C_S + \lambda E_S = 0 \ldots [10]$$

H_S :الحمل الحراري بين الهواء الداخلي وسطح الأرض w/m^2

C_S : تدفق التوصيل على سطح التربة w/m^2

λ : حرارة التبخر الكامنة J/Kg

E_S : معدل تبخر التربة $kg/m^2.h$

معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الهواء الداخلي والتربة:

$$h_s = \frac{H_S}{T_{i-T_S}}$$

h_s : معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الهواء الداخلي والتربة

$W/m^2.k$

T_i : درجة حرارة الهواء داخل المجمع c^0

T_S : درجة حرارة سطح التربة c^0

توازن الطاقة على السطح الداخلي للغطاء :

$$H_{S+}\ H_{C,i+}\ H_{f.s=0} \quad \ldots[10]$$

$H_{C,i}$:الحمل الحراري بين الهواء الداخلي والسطح الداخلي للغطاء

w/m^2

$H_{f.s}$:انتقال الحرارة المعقولة عن طريق التسرب w/m^2

معامل الانتقال الحراري بالحمل بين الهواء الداخلي والغطاء الداخلي

$$h_{c.i} = \frac{A_g}{A_C}\ \frac{H_{C.i}}{T_i - T_{C.i}} \quad \ldots[10]$$

A_g : مساحة الارض للمجمع m^2

A_C : مساحة الغطاء m^2

$T_{C.i}$: درجة حرارة السطح الداخلي للغطاء c^0

توازن الطاقة على كامل الغطاء :

$$R_{n.i+}\ R_{n.e+}\quad H_{C.i+}\quad H_{C.e=0}$$

$R_{n.i}$: صافي الاشعاع داخل الدفيئة w/m^2

$R_{n.e}$: صافي الاشعاع خارج الدفيئة w/m^2

$H_{C.i}$: الحمل الحراري بين الهواء الداخلي و السطح الداخلي للغطاء

$H_{C.e}$:الحمل الحراري بين الهواء الخارجي والسطح الخارجي للغطاء

معامل الانتقال الحراري بالحمل بين الهواء الخارجي وسطح الغطاء الخارجي :

$$h_{c.e} = \frac{A_g}{A_C}\ \frac{H_{C.e}}{T_e - T_{C.e}} \quad \ldots[10]$$

T_e : درجة حرارة الهواء الخارجية c^0

$T_{C.e}$: درجة حرارة السطح الغطاء الخارجي c^0

7- مواد البحث وطرائقه:

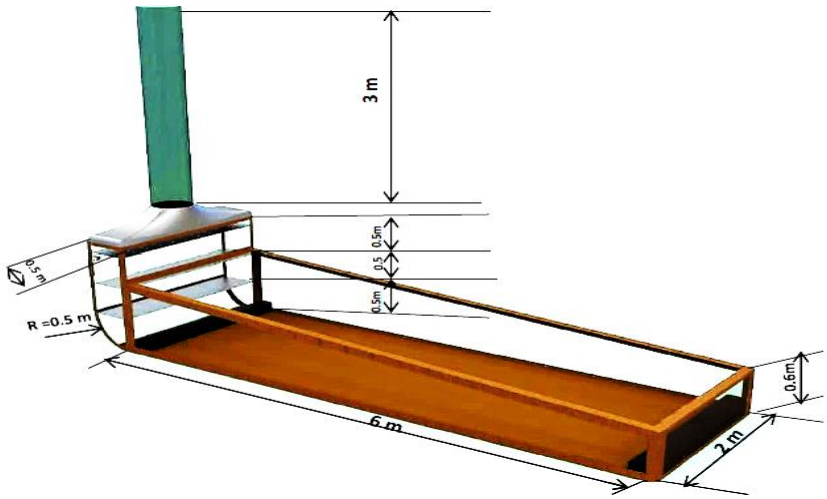
في بحثنا هذا، سنعمل على دراسة تأثير إضافة فرشة أنابيب مياه بلاستيكية في الأداء الحراري لمجفف شمسي للبصل ، وإجراء التجارب الخمس. أول تجربة أرضية المجمع فقط رمل. ثاني تجربة نسبة الأنابيب إلى أرضية المجمع 25%

والحالة الثالثة النسبة % 50 ، والحالة الرابعة النسبة 75%, والحالة الخامسة النسبة 100%.

المواد المستخدمة :

إطار معزول مصنوع من الحديد بطول 6 m وعرض 2 m ، رفوف بطول 2 m وعرض 0.5 m ، غطاء بلاستيكي مرن وشفاف للسماح بدخول الأشعة الشمسية ، رمل احمر أنابيب بلاستيكية p. v .c بقطر 2 inches ، ومجمعين بلاستيك بطول 2 m وقطر 4 inches ، مدخنة أسطوانية الشكل بقطر 0.15 m مصنوعة من البلاستيك الشفاف بطول 3 m.

7-1 حالة أرضية المجمع رمل فقط : تم تصميم المجفف الشمسي والتحقق منه تجريبياً وفق النموذج التالي بواسطة برنامج (solid) .



الشكل (1): المجفف الشمسي المقترح مصمم على برنامج solid في حالة أرضية المجمع رمل فقط.

في البداية تم شراء البصل الاحمر بكمية16 kg، وتقطيعه الى شرائح دائرية رقيقة بسماكة 3mm، وتم بعدها وضعه على الرفوف. بدأ التجفيف الساعة 9 صباحاً وانتهى الساعة 9 مساء. قيست درجات الحرارة والرطوبة النسبية للهواء عند مدخل المجمع و منتصف المجمع وكذلك عند الرفوف الثلاثة وعند مخرج المدخنة و سرعة الهواء كل ساعة وفق النموذج الحراري الذي وضع سابقاً حتى انتهاء زمن التجفيف للوصول الى مستوى التجفيف الآمن لشرائح البصل، وتم أخذ وزن شرائح البصل كل ساعتين . ووضع شرائح البصل بعد وزنها بواسطة بمقياس الكتروني ، حيث تم وضع 1100 g في كل رف من الرفوف

الثلاثة أي أن مقدار كتلة شرائح البصل في الرفوف الثلاثة 3300 g في كل اختبار من الاختبارات الخمسة .

الشكل (2): المجفف الشمسي المصمم حالة ارضية المجمع رمل فقط.

الجدول (1): تغير فرق درجات حرارة الهواء بين مخرج ومدخل المجمع وكفاءة المجمع خلال الاختبار الاول.

كفاءة المجمع %	فرق الحرارة بين مخرج ومدخل المجمع c^o	الوقت في اليوم
%19	6.7	9
%26	9.5	10
%33	11.4	11
%41	13.5	12
%46	15	13
%43	14.8	14
%32	9.7	15
%23	6.4	16
%21	5.7	17
-	4.8	18
-	3.7	19
-	2.9	20
-	1.7	21
%22	7.8	9
%31	10.4	10
%37	11.9	11
%45	14.8	12
%51	15.5	13
%47	14.9	14
%30	10	15
%23	7.9	16
%20	5.5	17

–	5.2	18
–	4.3	19
–	3.7	20

متوسط معدل التجفيف هو كتلة الماء المزال على الزمن الكلي بالساعات.

$$\frac{3300-339.8}{23} = \frac{2960.2}{23} = 128.7 \text{ g/h}$$

7 – 2حالة نسبة فرشة الأنابيب البلاستيكية الى ارضية المجمع 25% :

اختبار ثاني للمجفف مع و جود فرشة أنابيب مياه بلاستيكية عدد 10 أنبوب في أرضية المجفف بقطر inches 2 . أي نسبة فرشة الأنابيب الى مساحة ارض المجمع 25% وبالتالي سماكة الماء mm 10.

الجدول(2): تغير فرق درجات حرارة الهواء بين مخرج ومدخل المجمع وكفاءة المجمع خلال الاختبار الثاني .

كفاءة المجمع %	فرق الحرارة بين مخرج ومدخل المجمع c^o	الوقت في اليوم
%23	7.2	9
%32	10.5	10
%36	13.2	11
%44	15.1	12
%53	18.4	13

14	17	%50
15	14.6	%45
16	7.1	%27
17	6.9	%25
18	5.1	–
19	4.1	–
20	3.9	–
21	2.3	–
9	7.9	%25
10	10.8	%35
11	12.1	%41
12	15.1	%50
13	18.6	%53
14	17.2	%48
15	14.3	%44

متوسط معدل التجفيف هو:

$$= \frac{3300-339.6}{19} = \frac{2960.4}{19} = \quad 155.81 \text{ g/h}$$

7 – 3 حالة نسبة فرشة الأنابيب البلاستيكية إلى أرضية المجمع 50% :

اختبار ثالث للمجفف مع و جود فرشة أنابيب مياه بلاستيكية عدد H20 نبوب . نسبة فرشة الأنابيب إلى مساحة أرض المجمع 50% وبالتالي سماكة الماءmm 20 .

الجدول(3): تغير فرق درجات حرارة الهواء بين مخرج ومدخل المجمع وكفاءة المجمع خلال الاختبار الثالث.

الوقت في اليوم	فرق الحرارة بين مخرج ومدخل المجمع c^o	كفاءة المجمع %
9	8.1	24%
10	11.2	34%
11	14.5	43%
12	16.2	47%
13	20.8	61%
14	19.7	54%
15	16.9	52%
16	10.9	42%
17	8.7	35%

18	6.8	–
19	5.4	–
20	4.2	–
21	3.2	–
9	8.4	25%
10	11.5	35%
11	14.7	41%
12	16.9	50%
13	20.5	53%

.

متوسط معدل التجفيف هو:

$$\frac{3300-338.4}{16} = \frac{2960.4}{19} = 185.1 \ g/h$$

7 – 4 حالة نسبة فرشة الأنابيب البلاستيكية إلى أرضية المجمع 75% :

اختبار رابع للمجفف مع و جود فرشة أنابيب مياه بلاستيكية عدد 30 أنبوب. أي نسبة فرشة الأنابيب إلى مساحة أرض المجمع 75% وبالتالي سماكة الماءmm 30.

الجدول(4): تغير فرق درجات حرارة الهواء بين مخرج ومدخل المجمع وكفاءة المجمع خلال الاختبار الرابع.

الوقت في اليوم	فرق الحرارة بين مخرج ومدخل المجمع c^o	كفاءة المجمع %
9	9.3	30%
10	11.9	39%
11	15.4	49%
12	18.1	52%
13	22.1	64%
14	21	62%

15	18.9	58%
16	13.1	54%
17	11.3	50%
18	8.4	-
19	6.5	-
20	5.8	-
21	4.3	-
9	9.8	28%
10	12	39%

54%	14.9	11

متوسط معدل التجفيف هو:

$$=\frac{3300-337.3}{14} = \frac{29627}{14} = 211.5 \text{ g/h}$$

7 – 5 حالة نسبة فرشة الأنابيب البلاستيكية إلى أرضية المجمع 100%:

اختبار خامس للمجفف مع و جود فرشة أنابيب مياه بلاستيكية عدد 40 أنبوب.

أي نسبة فرشة الأنابيب إلى مساحة أرض المجمع 100% وبالتالي سماكة الماء 40 mm .

الجدول(5): يوضح تغير فرق درجات حرارة الهواء بين مخرج ومدخل المجمع وكفاءة المجمع خلال الاختبار الخامس

كفاءة المجمع %	فرق الحرارة بين مخرج ومدخل المجمع c^o	الوقت في اليوم
32%	11	9
40%	13.2	10
55%	17.4	11
69%	22.5	12
72%	24.7	13

14	23	68%
15	21	65%
16	15.7	56%
17	13.6	51%
18	12	–
19	9.4	–
20	7.1	–
21	5.5	–

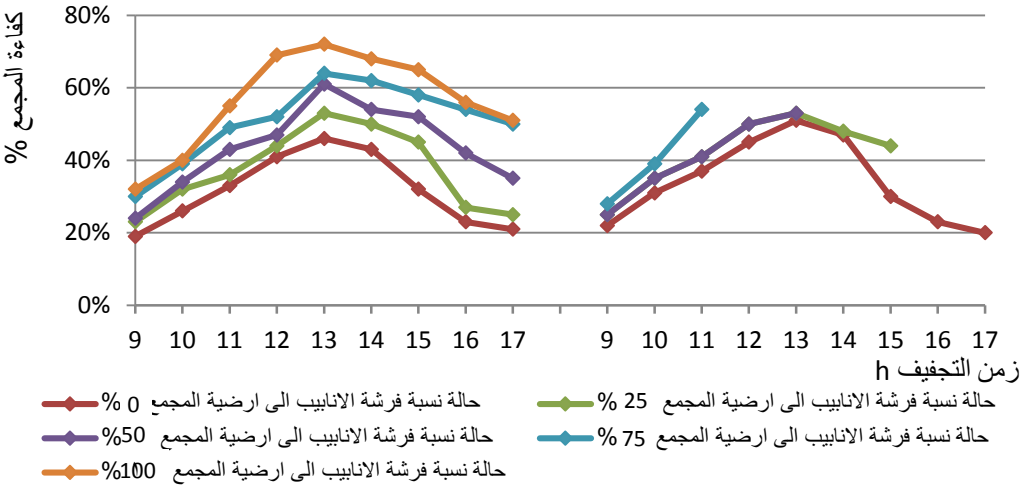
متوسط معدل التجفيف هو:

$$\frac{3300 - 341.6}{12} = \frac{2958.4}{12} = 246.5 \text{ g/h}$$

8- النتائج والمناقشة :

8-1 مقارنة كفاءة المجمع :

نلاحظ أن كفاءة المجمع ازدادت بزيادة نسبة فرشة الأنابيب البلاستيكية في أرضية المجمع ، وكانت أفضل كفاءة للمجمع في حالة نسبة فرشة أنابيب الماء البلاستيكية إلى أرضية المجمع % 100حيث وصلت كفاءة المجمع إلى % 72 وقت الذروة . بينما في حالة أرضية المجمع رمل فقط كانت كفاءة المجمع وقت الذروة 51% .

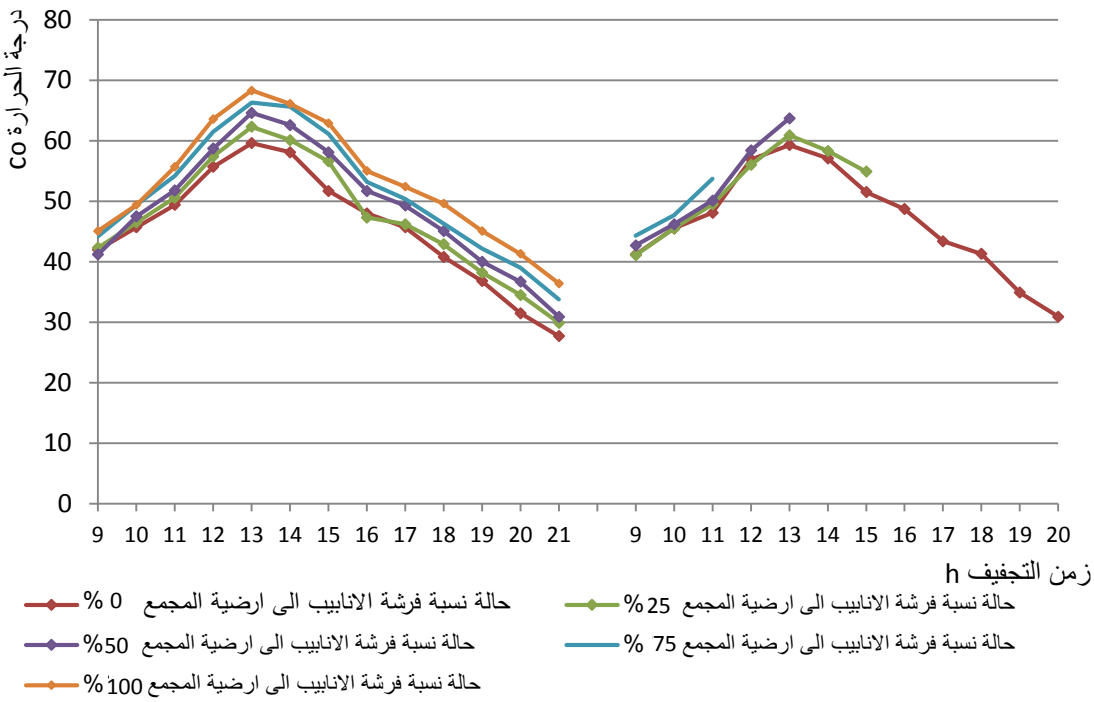


الشكل (3): مقارنة كفاءة المجمع خلال فترة سطوع الشمس في الاختبارات الخمسة

8-2 مقارنة درجة حرارة خروج الهواء من المجمع :

نلاحظ من التجارب ارتفاع درجة حرارة هواء عند مخرج المجمع من $60\ c^o$

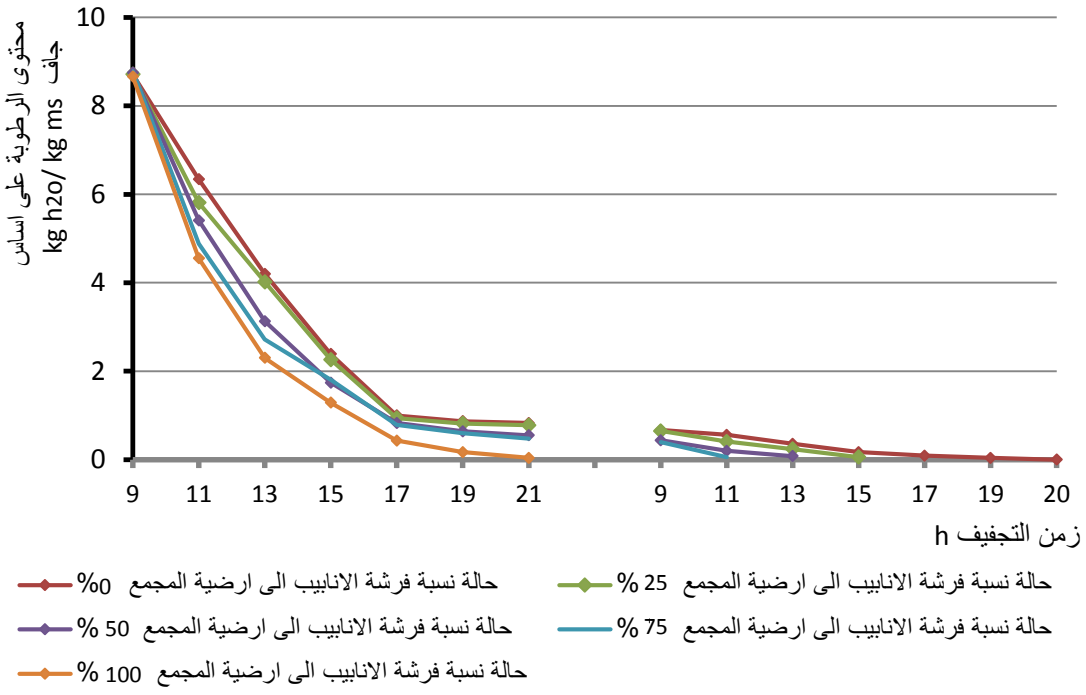
الى $68\ c^o$ في وقت الذروة.



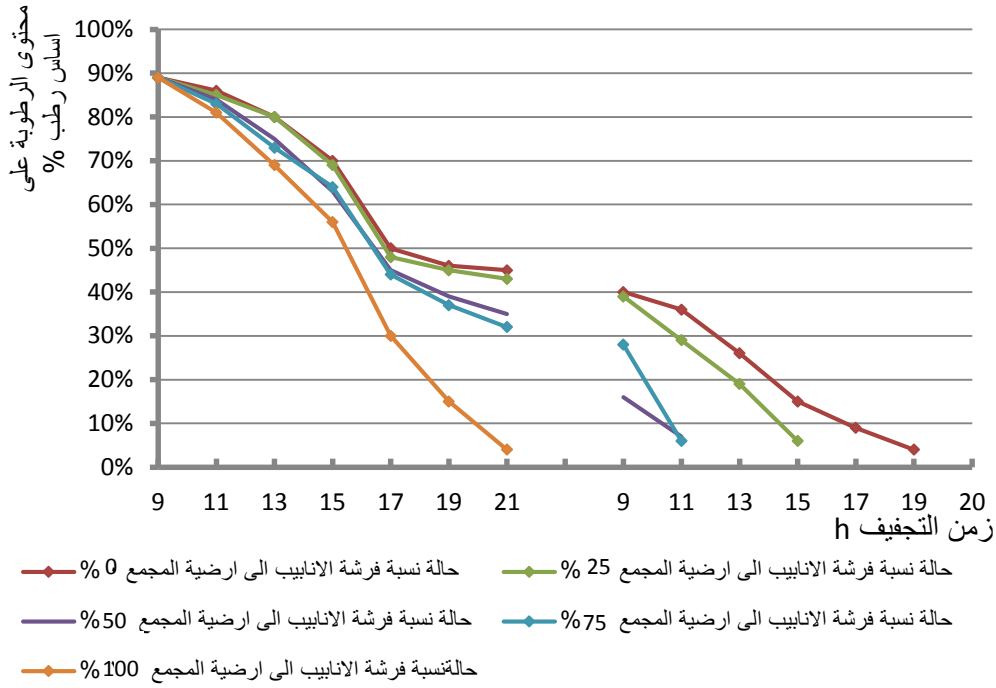
الشكل (4): مقارنة بين درجات حرارة الهواء عند مخرج المجمع في الاختبارات الخمسة.

8-3 مقارنة تغير محتوى الرطوبة لشرائح البصل :

أظهرت النتائج ان محتوى الرطوبة لشرائح البصل قد نقص بزيادة نسبة فرشة الأنابيب البلاستيكية في أرضية المجمع من 89% الى 4% .أظهرت النتائج أيضاً أن المجفف الشمسي المختلط الذي صمّم بتكلفة قليلة قد أعطى نتائج جيدة من حيث جودة شرائح البصل المجفف , وإمكانية تخزينه لفترات طويلة مع المحافظة على جودته .



الشكل (5): مقارنة محتوى الرطوبة على اساس جاف لشرائح البصل في الاختبارات الخمسة.



الشكل (6): مقارنة محتوى الرطوبة على اساس رطب لشرائح البصل في الاختبارات الخمسة.

8-4 مقارنة الزمن في الاختبارات الخمسة :

أثبتت التجارب أن إضافة فرشة الأنابيب البلاستيكية قد أدّى إلى تسريع عملية التجفيف ، وتقليل زمن الوصول إلى المحتوى الأمن لتخزين شرائح البصل ، حيث تمّ تقليل الزمن من23h في حالة أرضية المجمع رمل فقط إلى 12h في حالة نسبة فرشة الأنابيب إلى أرضية المجمع 100% .

5-8 مقارنة متوسط معدل التجفيف في الاختبارات الخمسة : نلاحظ أن معدل التجفيف قد زاد بزيادة نسبة فرشة الأنابيب البلاستيكية، حيث تحسّن متوسط معدل التجفيف من 128.7 g/h عندما كانت أرضية المجمع رمل فقط إلى 246.5 g/hعندما أصبحت نسبة فرشة أنابيب المياه البلاستيكية إلى أرضية المجمع% 100.

9- الاستنتاجات والتوصيات :

انطلاقا من النتائج الجيدة التي حصلنا عليها من البحث يمكننا اقتراح عدد من النقاط التي تسهم في تحسين أداء المجفف الشمسي :

- تصميم أشكال مختلفة من المجمع الشمسي ودراسة تأثيرها على تحسين الأداء الحراري للمجفف الشمسي المقترح.

- دراسة تأثير تغير سماكة الماء في أرضية المجمع فوق 40 mm على الأداء الحراري للمجفف الشمسي .

- محاولة إجراء تجارب تطبيقية على مجفف شمسي باستخدام فرشة أنابيب من نوع أخر غير البلاستيك وليكن النحاس مثلا .

- دراسة إضافة مواد أخرى للتخزين غير الرمل تحت فرشة الأنابيب البلاستيكية وليكن الصخور او الفحم .

- محاولة إمكانية استخدام الزجاج بدل الغطاء البلاستيكي الشفاف ودراسة تأثيره على الأداء الحراري للمجفف الشمسي

10 - المراجع :

[1]- Pirasteh, G, Saidur. R , Rahman, S.M.A, Rahim, N.A, 2013, "A review on development of solar drying applications ", **journal homepage**,31,2014,133-148

[2]-2021. **MARKET INTELLIGANCE REPORT ONION** A world class regulator of vibrant, diversified and sustainable crop industry. PUBLISHED BY Namibian Agronomic Board.

[3]-(2021) **مديرية الاحصاء في وزارة الزراعة السورية.**

[4]-Amin Muhammad ,Hanif Muhammad ,Khan Khattak ,Khan Ihanzeb,Rahman Masood and Ud Din Subhan. 2013- Convective Drying and Mathematical Modeling of Onions Dried Using a Flat Plate Solar Air Heater, **Pakistan Journal of Nutrition**,12,11,1003-1007.

[5]- Umara A, Abera S and Dubale B,2018, Design Development and Performance Evaluation of Solar Dryer for Drying Onion used as powder in Food,
International Journal of Sciences ,78,1,231-243.

[6]- العابدين , ن ,2021, **استخدام مجفف شمسي معدل لتجفيف بعض المواد الغذائية ومقارنتها مع التجفيف الشمسي المباشر** – جامعة حمص

[7]-Hassan,S,Ghetany,H,2018, Experimental Investigation and Performance Evaluation of an Efficient Trapezoidal Shape Greenhouse Solar Dryer, **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**,8,12,

[8]- Abdel-Galil,H,S and Mourad,R,I,A,2009, A SOLAR DRYER PERFORMANCE OF ONION SLICES UNDER FAYOUM CLIMATIC CONDITION **,Misr Journal of Agricultural Engineering,**26,2,953-976.

[9]- Lingayat A,B, Chandramohan V.P, Raju V.R.K, Meda V,2020, A review on indirect type solar dryers for agricultural crops Dryer setup, its performance, energy storage and important highlighs, **Applied Energy**,258,2020,114005.

[10]- Baille A, Lo´pez J,C, Bonachela S, Gonza´lez-Real M,MonteroJ.I.2006, Night energy balance in a heated low-cost

plastic greenhouse, **Agricultural and Forest Meteorology** ,137,2006,107-118.

تحسين كفاءة الاستطاعة والمساحة لدارة جامع كامل مصممة باستخدام ترانزستورات الأثر الحقلي ذات الأنابيب النانوية الكربونية (CNTFETs).

م. هلال احمد تكروني جامعة حمص – طالب دكتوراه في قسم هندسة الالكترونيات والاتصالات

الدكتور المشرف: مجد الدين العلي جامعة حمص – أستاذ مساعد في قسم هندسة الالكترونيات والاتصالات

الملخص

أدى تزايد الطلب في السنوات القليلة الماضية على الأجهزة المحمولة والأنظمة المضمّنة إلى الحاجة لتصميم دارة جامع كامل (Full Adder (FA)) منخفضة الاستطاعة وصغيرة المساحة دون المساس بأدائها وسرعة تشغيلها، إذ تُعد دارة الجامع الكامل هي الوحدة الأساسية في الدارات الإلكترونية عالية التكامل جداً (Very Large-Scale Integration (VLSI)). كما تُستخدم في العديد من التطبيقات المختلفة مثل معالجات الإشارات الرقمية (DSP) والمعالجات الدقيقة ووحدات الحساب والمنطق (ALU) ووحدات الفاصلة العائمة (FPU).

تم في هذا البحث اقتراح دارة جامع كامل هجينة (H-FA) تعتمد على تقنيتي (Pass Transistor Logic (PTL) و(Gate Diffusion Input (GDI))، وتتكون من 12 ترانزستوراً باستخدام ترانزستورات الأثر الحقلي ذات الأنابيب النانوية الكربونية (Carbon Nanotube Field-Effect Transistor (CNTFET)). تم مقارنة الدارة المقترحة مع عدة بنى مختلفة لدارة الجامع الكامل، وهي دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA و17T-FA و16T-FA و14T-FA و12T-FA من حيث استهلاك الاستطاعة وزمن التأخير ومضروب التأخير بالاستطاعة (PDP) وعدد الترانزستورات.

تم تنفيذ عملية المحاكاة باستخدام برنامج Cadence Virtuoso 6.1.7 عند تقنية تصنيع CNTFET 32 nm، وأظهرت نتائج المحاكاة أن الدارة المقترحة هي الأقل استهلاكاً للاستطاعة بين الدارات المدروسة بقيمة 4.213 nW، والأقل من حيث مضروب التأخير بالاستطاعة بقيمة 43.899 zJ، بالإضافة إلى كونها الأصغر مساحةً بالتساوي مع دارة 12T-FA نظراً لاستخدام كلا الدارتين 12 ترانزستوراً فقط.

الكلمات المفتاحية: جامع كامل (Full Adder)، منطق ترانزستورات التمرير (PTL)، تقنية (GDI)، ترانزستورات (CNTFET)، مضروب التأخير بالاستطاعة (PDP).

Power and Area Efficiency Enhancement of a Full Adder Designed Using Carbon Nanotube Field–Effect Transistors (CNTFETs).

Abstract

The increasing demand in recent years for portable devices and embedded systems has created a need for designing low-power and area-efficient full adder circuits without compromising performance or operating speed. The full adder is considered a fundamental building block in very-large-scale integration (VLSI) electronic circuits and is widely used in various applications, such as digital signal processors (DSPs), microprocessors, arithmetic and logic units (ALUs), and floating-point units (FPUs).

In this research, a hybrid full adder (H-FA) circuit is proposed based on Pass Transistor Logic (PTL) and Gate Diffusion Input (GDI) techniques. The proposed design consists of 12 transistors implemented using carbon nanotube field-effect transistors (CNTFETs). The performance of the proposed circuit was compared with several existing full adder architectures, including the conventional full adder circuit 28T-FA, 17T-

FA, 16T-FA, 14T-FA, and 12T-FA, in terms of power consumption, propagation delay, Power-Delay Product (PDP), and transistor count. Simulations were carried out using Cadence Virtuoso 6.1.7 at the 32 nm CNTFET technology. Simulation results demonstrate that the proposed circuit achieves the lowest power consumption among the studied designs, with a value of 4.213 nW, and the minimum power–delay product of 43.899 zJ. In addition, the proposed design exhibits the smallest area, equal to that of the 12T-FA architecture, as both designs utilize only 12 transistors.

Keywords: Full Adder (FA), Pass Transistor Logic (PTL), Gate Diffusion Input (GDI) Technique, Carbon Nanotube Field-Effect Transistors (CNTFETs), Power-Delay Product (PDP).

1. المقدمة:

تتطلب العديد من التطبيقات المهمة مثل معالج الإشارة الرقمية DSP ووحدة معالجة الرسوميات GPU استخدام دارات متكاملة قادرة على تحقيق استهلاك استطاعة منخفض وسرعة معالجة عالية وكثافة شريحة مرتفعة، وهو ما كان يتم تحقيقه في البداية عن طريق تصغير أبعاد الدارات وفقاً لقانون مور، وذلك عن طريق تصغير حجم الترانزستور[1]. حيث توقع الدكتور جوردن مور عام 1965 زيادة عدد الترانزستورات المتكاملة المستخدمة في الدارات المتكاملة وأنها ستتضاعف كل عام [2]. ولقد برزت تقنية CMOS على مدى عقود كتقنية رئيسية لتحقيق دارات إلكترونية عالية التكامل جداً (VLSI) تتميز بالكفاءة من حيث الطاقة والكثافة العالية. إلا أنه أدى التقليص المستمر لحجم ترانزستورات (MOSFET) إلى ظهور مشاكل تأثير القناة القصيرة وانخفاض قدرة التحكم في البوابة وزيادة تيارات التسرب، وهذا ما دفع المصممين إلى البحث عن بدائل لترانزستورات

MOSFET التقليدية [3]، ومن أبرز البدائل المقترحة هي ترانزستورات ((CNTFET) Carbon Nanotube Field-Effect Transistor) القائمة على استخدام انابيب الكربون النانوية بسبب خصائصها الكهربائية الفائقة [4]، حيث قد أوصت خارطة الطريق الدولية للتكنولوجيا في أنصاف النواقل (ITRS) باستخدام ترانزستورات CNTFET كتقنية واعدة لاستبدال ترانزستورات MOSFET، وذلك نظراً للمزايا التي تتمتع بها ترانزستورات CNTFET من امتلاك كثافة تيار أعلى وحركة ناقلات أسرع وسعة طفيلية أقل، كما تتميز ترانزستورات CNTFET بجهود تشغيل أقل وطاقة تبديل منخفضة ونسبة (Ion/Ioff) أعلى مقارنة بترانزستورات MOSFET [5]، بالإضافة إلى أن التشابه بين (CNTFET) و(MOSFET) في البنية ومبدأ التشغيل ساعد على تنفيذ تصاميم CMOS الموجودة باستخدام تقنية (CNTFET) بسهولة [2].

شهدت السنوات الأخيرة تزايداً في الطلب على الأجهزة المحمولة بما في ذلك الهواتف الذكية والأجهزة اللوحية وأجهزة الكمبيوتر المحمولة والحساسات، وهذه التجهيزات التي تعمل بالاعتماد على البطاريات دفعت المصممين لاكتشاف العديد من التصميمات الجديدة للدارات الإلكترونية منخفضة الاستطاعة [5]. وتعتبر دارة الجامع الكامل من أهم هذه الدارات التي تم اقتراح العديد من البنى المختلفة لها وذلك نتيجة استخدامها في العديد من الأنظمة الرقمية الحديثة، حيث تعتبر دارة الجامع الكامل جوهر العديد من العمليات الحسابية مثل الجمع والطرح والضرب والقسمة، وتستخدم أيضاً في توليد العناوين. ولذلك تؤثر الكفاءة الطاقية لدارة الجامع الكامل على الكفاءة العامة للأجهزة المحمولة [5]. من البنى التي تم اقتراحها للحصول على دارة جامع كامل منخفضة الاستطاعة دارة 15T-FA [6]، التي تستخدم بنية XNOR-XOR جديدة منخفضة الاستطاعة وتعتمد على تقليل عدد الترانزستورات التي تعمل في وقت واحد بين مساري الدخل والخرج، مما يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في استهلاك الاستطاعة. كما تم اقتراح دارة PTL-FA والتي تتميز باستهلاك استطاعة منخفض نتيجة استخدام تقنية ((Pass Transistor Logic (PTL) في بنيتها، مما يقلل من عدد الترانزستورات المستخدمة في تصميم الدارة [7]. وتم اقتراح دارة 17T-FA القائمة على استخدام ترانزستورات CNTFET والتي تعتمد في بنيتها على استخدام بوابتي

XOR تتميزان بتوفير جهد خرج متأرجح بشكل كامل في الخرج، وعلى دارة ناخب (MUX) تعتمد على استخدام تقنية GDI مما يساعد على تحقيق استهلاك استطاعة منخفض في الدارة [8].

أما بالنسبة للتطبيقات عالية السرعة وصغيرة المساحة، فقد تم اقتراح العديد من بنى الجامع الكامل والتي تعتمد على استخدام عدد منخفض من الترانزستورات لزيادة السرعة وتقليل المساحة، مثل دارة الجامع الكامل 14T-FA المكونة من 14 ترانزستوراً في بنيتها والتي تعتمد على استخدام كل من تقنيتي PTL و ((Transmission gate (TG) للحصول على إشارتي الخرج [1]، كما تم اقتراح دارة GDI-FA [9] المكونة من 10 ترانزستورات والتي تعتمد على استخدام تقنية (Gate Diffusion Input (GDI))، والتي تساهم في زيادة السرعة وتقليل المساحة عن طريق تقليل عدد الترانزستورات المستخدمة في تصميم الدارات والبوابات المنطقية. وتم اقتراح دارة 12T-FA [10] المكونة من 12 ترانزستوراً فقط، والتي تعتمد في تصميمها على بنية XNOR جديدة مكونة من 6 ترانزستورات، حيث يساهم هذا العدد المنخفض من الترانزستورات في تقليل مساحة الدارة وانخفاض تأخير انتشار إشارات الخرج.

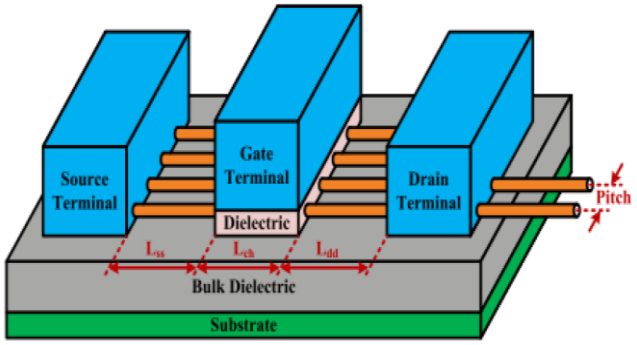
كما أنه لا بد من الإشارة إلى أهمية الحصول على إشارة خرج متأرجحة بشكل كامل في خرج دارة الجامع الكامل، حيث إن انخفاض في تأرجح جهد الخرج قد يتسبب في بطء عملية التبديل في حالة العمليات المتتالية، وقد يؤدي إلى خلل في عمل الدارة عند جهود التغذية المنخفضة [11]. وبناءً عليه تم اقتراح العديد من بنى الجامع الكامل التي اهتمت بالحصول على جهد خرج متأرجح بشكل كامل مثل دارة TG-FA [12] والتي تعتمد على استخدام تقنية بوابة الإرسال TG، وهي عبارة عن وصل ترانزستورين NMOS وPMOS على التفرع يعملان معاً لتجنب مشكلة هبوط الجهد وتمرير الإشارة ("0" منطقي و "1" منطقي) بشكل قوي. كما تم اقتراح دارة 18T-FA [13] التي تعتمد على استخدام بنية هجينة قائمة على استخدام تقنية GDI وتقنية استعادة مستوى الإشارة للتغلب على مشكلة هبوط الجهد في الخرج والحصول على جهد خرج كامل التأرجح.

تم في العديد من الأعمال السابقة استخدام تقنيات عديدة لتحسين أداء دارات الجامع الكامل، مثل GDI وTG وPTL وغيرها. وتم في هذا البحث دراسة ومحاكاة عدة بنى لدارات الجامع الكامل، واقتراح دارة جامع كامل هجينة H-FA باستخدام ترانزستورات CNTFET والتي تجمع بين عدة تقنيات لتقليل استهلاك الاستطاعة والمساحة والمحافظة على زمن تأخير جيد لإشارتي الخرج. وأُستخدم برنامج Cadence Virtuoso 6.1.7 لمحاكاة هذه الدوائر بتقنية CNTFET 32 nm لفهم ومقارنة خصائصها المختلفة.

2. ترانزستورات الأثر الحقلي ذات الأنابيب النانوية الكربونية (CNTFET):

تعتمد ترانزستورات CNTFET على استخدام أنابيب الكربون النانوية (CNTs) كقناة بين المنبع والمصرف بدلاً من السيليكون المشاب بدرجة كبيرة في ترانزستورات MOSFET كما هو مبيّن في الشكل (1)، حيث إن أنبوب الكربون النانوي (CNT) هو عبارة عن هيكل أسطواني صغير مصنوع من الغرافيت، وتتميز أنابيب الكربون النانوية بالقدرة الفائقة على الناقلية الكهربائية والحركية العالية لحوامل الشحنة (الإلكترونات والثقوب) والقدرة على تحمل التيارات العالية، ويمكن تصنيف أنابيب الكربون النانوية إلى [14]:

- أنابيب الكربون النانوية أحادية الجدار (Single-Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs)).
- أنابيب الكربون النانوية متعددة الجدران (Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs)).



الشكل (1): ترانزستور الأثر الحقلي ذو الأنابيب النانوية الكربونية [15]

يمكن أن يعمل أنبوب الكربون النانوي أحادي الجدار (SWCNT) كناقل أو كنصف ناقل، ويتم تحديد ذلك عن طريق متجه الكيرالية (chirality vector) والذي يُعبّر عنه بالثابتين (n,m)، حيث إنه في حال كان n-m=3k (حيث إن k عدد صحيح)، فإن أنبوب الكربون النانوي سيعمل كناقل، وفي حال كان $n-m\neq 3k$ سيعمل أنبوب الكربون النانوي كنصف ناقل ويكون ملائماً للاستخدام كقناة في ترانزستورات الأثر الحقلي (FET) [16].

يتم تحديد جهد العتبة في ترانزستورات الأثر الحقلي ذات الأنابيب النانوية الكربونية من خلال المعادلة (1) [1]:

$$V_{th} \cong \frac{E_g}{2\times e} \cong \frac{0.436}{D_{CNT}(nm)} \qquad (1)$$

حيث إن:

E_g هي طاقة فجوة النطاق.

e شحنة الإلكترون.

D_{CNT} قطر الأنبوب الكربوني النانوي.

كما يمكن حساب قطر الأنبوب الكربوني النانوي D_{CNT} من خلال المعادلة (2) [1]:

$$D_{CNT} = 0.0783\sqrt{n^2 + m^2 + nm} \qquad (2)$$

3. هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى اقتراح دارة جامع كامل هجينة (H-FA) باستخدام ترانزستورات CNTFET، تتميز بمساحة صغيرة واستهلاك استطاعة منخفض وقيمة PDP منخفضة. ومن ثم مقارنة الدارة المقترحة مع بنى مختلفة لدارة الجامع الكامل من حيث استهلاك الاستطاعة والتأخير ومضروب التأخير بالاستطاعة (PDP) وعدد الترانزستورات المستخدمة في الدارة.

4. مواد وطرق البحث:

اعتمد البحث على طريقة البحث التجريبية، وتمت المحاكاة باستخدام برنامج Cadence Virtuoso 6.1.7 الذي يعمل على نظام Linux عند التقنية CNTFET 32 nm لإجراء عمليات المحاكاة لدارات الجامع الكامل المختلفة. وتمت عملية المحاكاة عند جهد تغذية V_{dd}=0.9 V ودرجة حرارة 27 C°.

تشمل الدراسة محاكاة ومقارنة عدة دارات للجامع الكامل مع الدارة المقترحة H-FA، وهي دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA و17T-FA و16T-FA و14T-FA و12T-FA، وتمت المقارنة ما بين الدارات المدروسة من حيث استهلاك الاستطاعة والتأخير ومضروب التأخير بالاستطاعة (PDP) وعدد الترانزستورات المستخدمة في الدارة. حيث يعتمد تحليل أداء دارة الجامع الكامل على إظهار منحنيات الدخل والخرج، وحساب البارامترات الأساسية المذكور سابقاً، وهي:

- **الاستطاعة:**

تنقسم مصادر تبدد الاستطاعة بشكل رئيسي إلى قسمين، وهما استهلاك الاستطاعة الستاتيكية واستهلاك الاستطاعة الديناميكية. ينتج استهلاك الاستطاعة الستاتيكية عن تيارات التسرب وأهمها

تيار تسرب دون العتبة، في حين ينتج استهلاك الاستطاعة الديناميكية عن الشحن والتفريغ أثناء نشاط التبديل للترانزستورات.

يمكن حساب استهلاك الاستطاعة المتوسطة في الدارة من خلال المعادلة (3) [17]:

$$P_{avgpower} = P_{dynamic\,power} + P_{static\,power} \qquad (3)$$

- **التأخير:**

يحدد زمن تأخير الدارة بأنه أسوأ حالة تأخير مقاسة لجميع الانتقالات في الخرج، حيث يتم قياس زمن التأخير لكل انتقال في الخرج بقياس الفترة الزمنية بين لحظة تجاوز إشارة الدخل 50% من قيمتها العظمى إلى لحظة تجاوز إشارة الخرج 50% من قيمتها العظمى [18].

- **مضروب التأخير بالاستطاعة (PDP):**

مضروب التأخير بالاستطاعة هو مقياس يحدد فعالية المقايضة ما بين التأخير واستهلاك الاستطاعة [12]، ويحسب من خلال ضرب استهلاك الاستطاعة المتوسطة في الدارة بأسوأ حالة تأخير كما هو مبيّن في المعادلة (4) [19]:

$$PDP = Power\,Consumption_{average} \times Delay_{worst_case} \qquad (4)$$

- **عدد الترانزستورات:** يحدد عدد الترانزستورات التي تم استخدامها في بنية الدارة، وهو عامل مؤثر بشكل مباشر على المساحة الكلية للدارة.

5. الجامع الكامل:

الجامع الكامل هو عبارة عن دارة تقوم بعملية جمع ثلاثة بتات على الدخل، حيث تحتوي على ثلاثة مداخل يرمز لها بـ A وB وCin، وعلى مخرجين هما المجموع والحمل ويرمز لهما بـ S وC. ويتم التعبير عن خرج دارة الجامع الكامل بالمعادلات (5) و (6) [20]:

$$S = A \oplus B \oplus C \qquad (5)$$

$$C = A.B + Cin.(A \oplus B) \qquad (6)$$

ويعبّر عن منطق دارة الجامع الكامل بجدول الحقيقة المبيّن في الجدول (1).

الجدول (1): جدول الحقيقة لدارة الجامع الكامل [20].

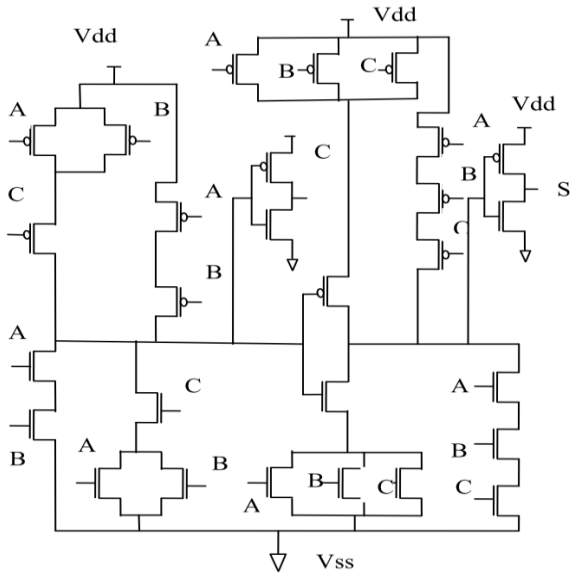
Input			Output	
A	**B**	**Cin**	**S (Sum)**	**C (Carry)**
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

ونظراً للأهمية الكبيرة لدارة الجامع الكامل في التطبيقات المتنوعة وتأثيرها الكبير على أداء الأنظمة الرقمية، يستمر العمل بشكل دائم على اقتراح بنى جديدة لتحسين بارامترات معينة وفقاً لمتطلبات هذه التطبيقات.

تم في هذا البحث دراسة وتحليل أداء عدة بنى مختلفة لدارة الجامع الكامل وهي:

1.5 دارة الجامع الكامل التقليدي القائم على CMOS (28T-FA):

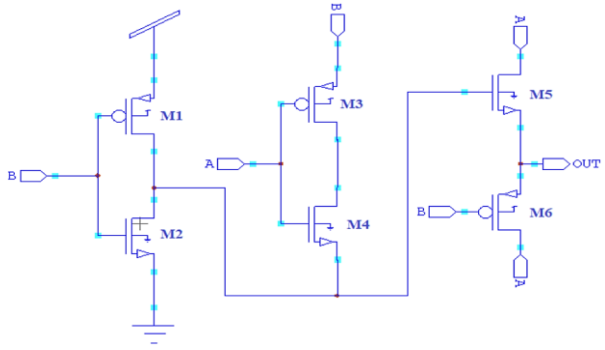
يتم تصميم دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA باستخدام مزيج من ترانزستورات PMOS و NMOS وعددها 28 ترانزستوراً كما هو مبيّن في الشكل (2)، حيث توفر ترانزستورات PMOS في شبكة الرفع "1" منطقي قوي، وتوفر ترانزستورات NMOS في شبكة الخفض "0" منطقي قوي، مما يوفر جهد خرج متأرجح بشكل كامل وقدرة قيادة جيدة. من عيوب هذا التصميم استخدام عدد كبير من الترانزستورات، مما يؤدي إلى استهلاك استطاعة عالٍ وزيادة التأخير وسعة الدخل [17].



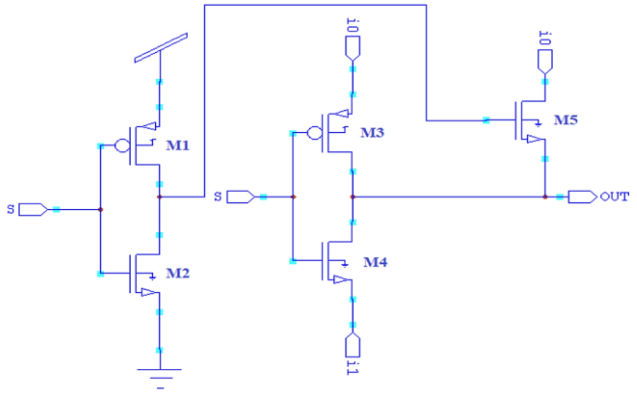
الشكل (2): دارة الجامع الكامل التقليدي القائم على CMOS [20].

2.5 دارة الجامع الكامل 17T (17T-FA):

تم تصميم دارة الجامع الكامل 17T-FA المكونة من 17 ترانزستوراً باستخدام ترانزستورات CNTFET. تتضمن هذه البنية بوابة XOR مكونة من 6 ترانزستورات، وتعتمد على استخدام تقنية GDI مع إضافة ترانزستورات للمحافظة على جهد خرج متأرجح بشكل كامل، كما هو مبيّن في الشكل (3). وتحتوي بنية الجامع الكامل على ناخب 1×2 مكون من 5 ترانزستورات، ويعتمد أيضاً على استخدام تقنية GDI، كما هو مبيّن الشكل (4) [8].

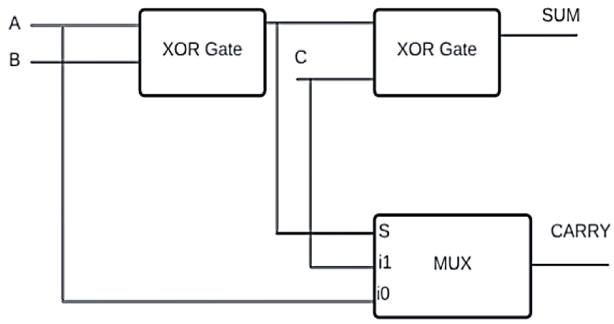


الشكل (3): بوابة XOR تتميز بجهد خرج كامل التأرجح [8].



الشكل (4): ناخب 1×2 [8].

يبيّن الشكل (5) المخطط المنطقي لدارة الجامع الكامل 17T-FA، التي تتكون من بوابتين XOR وناخب 1×2، وقد أظهرت دارة الجامع الكامل 17T-FA انخفاضاً في استهلاك الاستطاعة والتأخير بسبب استخدام تقنية GDI وترانزستورات CNTFET، كما تتميز هذه الدارة بجهد خرج متأرجح بشكل كامل بسبب الترانزستورات الإضافية التي تم استخدامها للحفاظ على مستوى إشارة الخرج [8].

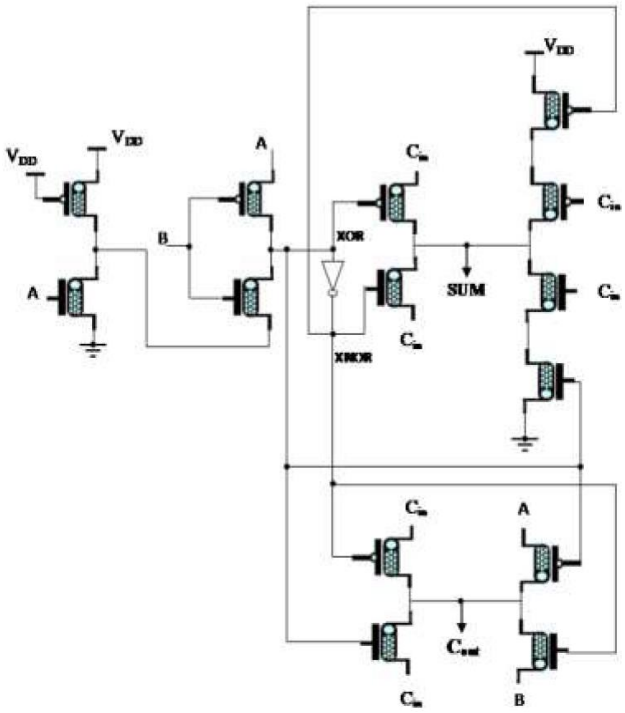


الشكل (5): المخطط المنطقي لدارة الجامع الكامل 17T (17T-FA) [8].

3.5 دارة الجامع الكامل 16T (16T-FA):

تتكون دارة الجامع الكامل 16T-FA من 16 ترانزستوراً كما هو مبيّن في الشكل (6)، وهي تعتمد على الجمع بين كل من تقنية منطق ترانزستورات التمرير (PTL) وتقنية بوابة الإرسال (TG)، مما يساعد على انخفاض كل من استهلاك الاستطاعة والتأخير ومضروب التأخير بالاستطاعة (PDP) في الدارة [21].

تعتمد هذه الدارة على استخدام بوابة XOR مكونة من 4 ترانزستورات، ومن ثم استخدام عاكس للحصول على إشارة XNOR من خرج البوابة XOR. وتتميز هذه الدارة بالحصول على جهد خرج متأرجح بشكل كامل لكلتا إشارتي الخرج، نظراً لاستخدام تقنية بوابة الإرسال (TG) التي تعالج مشكلة هبوط الجهد الناتج عن جهد العتبة [21].



الشكل (6): دارة الجامع الكامل 16T (16T-FA) القائمة على استخدام تقنيتي PTL وTG [21].

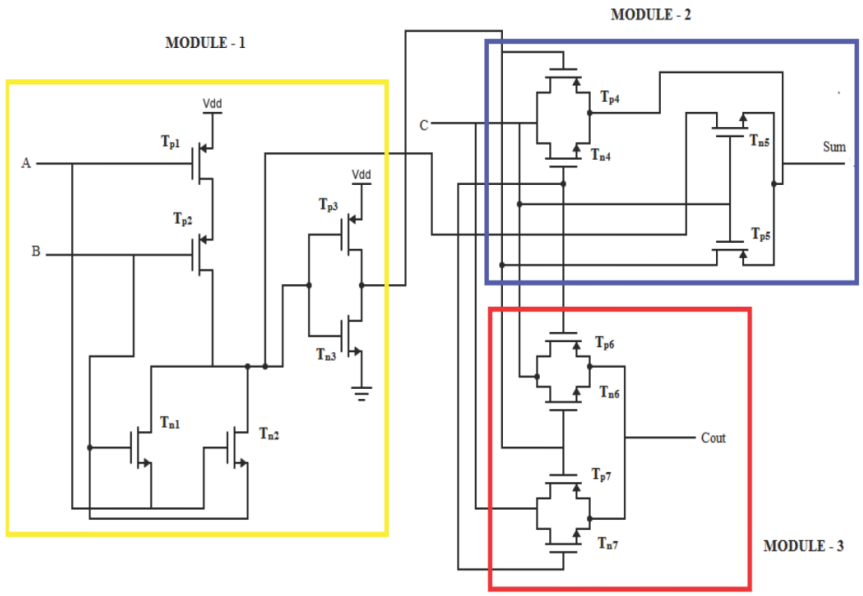
4.5 دارة الجامع الكامل 14T (14T-FA):

تعتمد دارة الجامع الكامل 14T-FA على استخدام دارة XOR-XNOR منخفضة الاستطاعة. حيث تتمثل ميزة دارة XOR-XNOR المستخدمة في أنها تقلل من تعقيد الدارة وعدد العقد الداخلية، وذلك لأن تصميمها يتطلب 6 ترانزستورات، وهو نصف عدد الترانزستورات التي تتطلبه دارة CMOS XOR التقليدية، مما يؤدي بدوره إلى تقليل استهلاك الاستطاعة [22].

كما تعتمد دارة الجامع الكامل 14T-FA على استخدام مزيج ما بين تقنيتي TG وPTL، حيث تُستخدم التقنيتان TG وPTL للحصول على إشارة المجموع (SUM) متأرجحة بشكل كامل، وذلك باستخدام 4 ترانزستورات فقط. في حين تُستخدم تقنية TG للحصول على إشارة الحمل

(CARRY)، وذلك لتجنب مشكلة هبوط الجهد والحصول على إشارة خرج متأرجحة بشكل كامل [22].

يهدف هذا التصميم إلى تقليل المساحة التي تشغلها الدارة عن طريق استخدام 14 ترانزستوراً فقط في تصميمها، كما هو مبيّن في الشكل (7). كما تتميز دارة الجامع الكامل 14T-FA بأنها تستهلك استطاعة منخفضة وذات جهد خرج متأرجح بشكل كامل لكلتا إشارتي المجموع (SUM) والحمل (CARRY) [22].



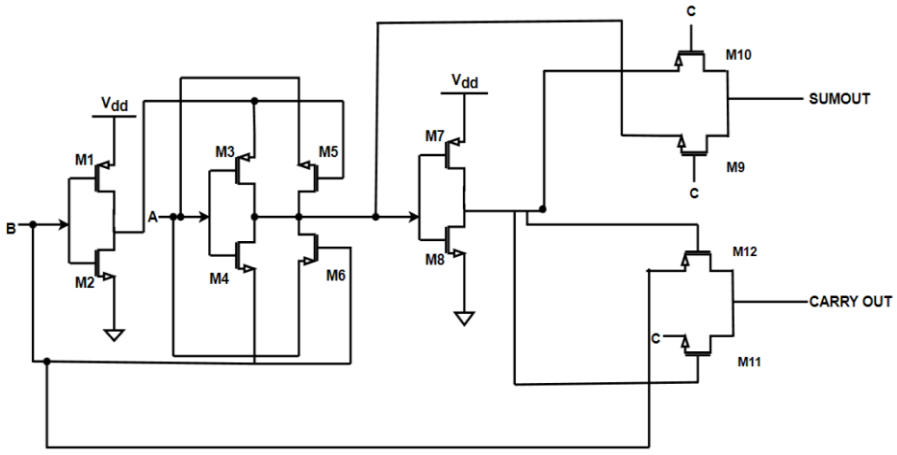
الشكل (7): دارة الجامع الكامل 14T (14T-FA) القائمة على استخدام تقنيتي PTL وTG [22].

5.5 دارة الجامع الكامل 12T (12T-FA):

يتم تصميم دارة الجامع الكامل 12T-FA باستخدام 12 ترانزستوراً، كما هو مبيّن في الشكل (8). حيث تعتمد بنية الجامع الكامل 12T-FA على استخدام بنية XNOR جديدة منخفضة

الاستطاعة، وتتميز بجهد خرج كامل التأرجح بسبب استخدام ترانزستورات إضافية للمحافظة على مستوى إشارة الخرج [10].

وللحصول على إشارتي الخرج SUM و CARRY يتم استخدام ناخبين 1×2، إلا أن جهد الخرج يعاني من عدم التأرجح بشكل كامل، وذلك لأن ترانزستور NMOS يُمرر قيمة 0 منطقي بشكل قوي وقيمة 1 منطقي بشكل ضعيف، بينما يُظهر ترانزستور PMOS سلوكاً معاكساً، ويُمرر قيمة 0 منطقي بشكل ضعيف وقيمة 1 منطقي بشكل قوي. تتميز دارة الجامع الكامل 12T-FA بالسرعة العالية والفعالية من حيث مضروب التأخير بالاستطاعة (PDP)، كما أنها تتميز بمساحتها الصغيرة وذلك لاستخدام عدد منخفض من الترانزستورات في بنيتها [10].



الشكل (8): دارة الجامع الكامل 12T (12T-FA) [10].

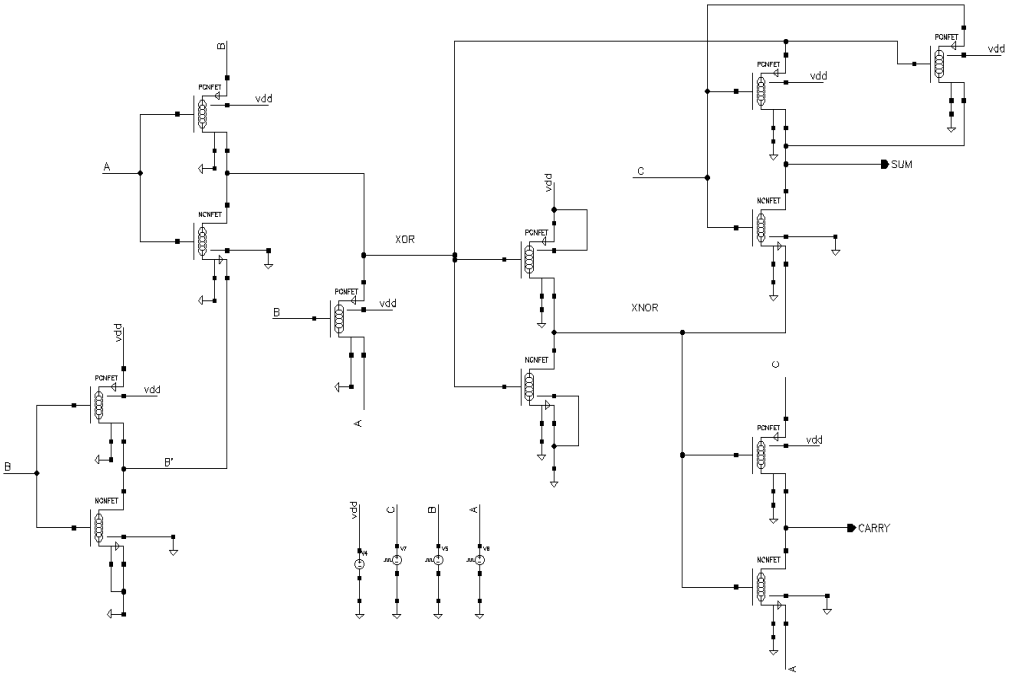
6.5 دارة الجامع الكامل الهجينة المقترحة (H-FA):

تم تصميم دارة الجامع الكامل الهجينة المقترحة H-FA باستخدام 12 ترانزستوراً من ترانزستورات الأثر الحقلي ذات الأنابيب النانوية الكربونية CNTFET، وبالاعتماد على المزج ما بين تقنيتي PTL و GDI كما هو مبيّن في الشكل (9). حيث تتكون دارة XOR من 5 ترانزستورات وتعتمد

في بنيتها على تقنيتي PTL وGDI، وذلك لتنفيذ البوابة المنطقية XOR بأقل عدد ممكن من الترانزستورات. ولذلك تتميز دارة XOR المستخدمة بأنها ذات استهلاك استطاعة منخفض ومساحة صغيرة.

تم الحصول على إشارة المجموع (SUM) باستخدام تقنية GDI بالإضافة إلى استخدام ترانزستور P-CNTFET إضافي للحصول على مستوى "1" منطقي قوي في الخرج، في حين تم استخدام تقنية GDI للحصول على إشارة الحمل (CARRY).

تتميز دارة الجامع الكامل المقترحة H-FA بأنها ذات استهلاك استطاعة منخفض ومساحة صغيرة، وذلك بسبب تقليل عدد الترانزستورات المستخدمة في بنية الدارة، مع المحافظة على أداء زمني جيد من حيث تأخير الانتشار. كما تتمتع الدارة المقترحة بجهد خرج كامل التأرجح أو قريب بشكل كبير من التأرجح الكامل، وذلك بسبب خصائص ترانزستورات CNTFET بنوعيها (P وN) التي تستطيع ان تمرر "0" و"1" منطقي بشكل ممتاز على عكس ترانزستورات MOSFET [23].

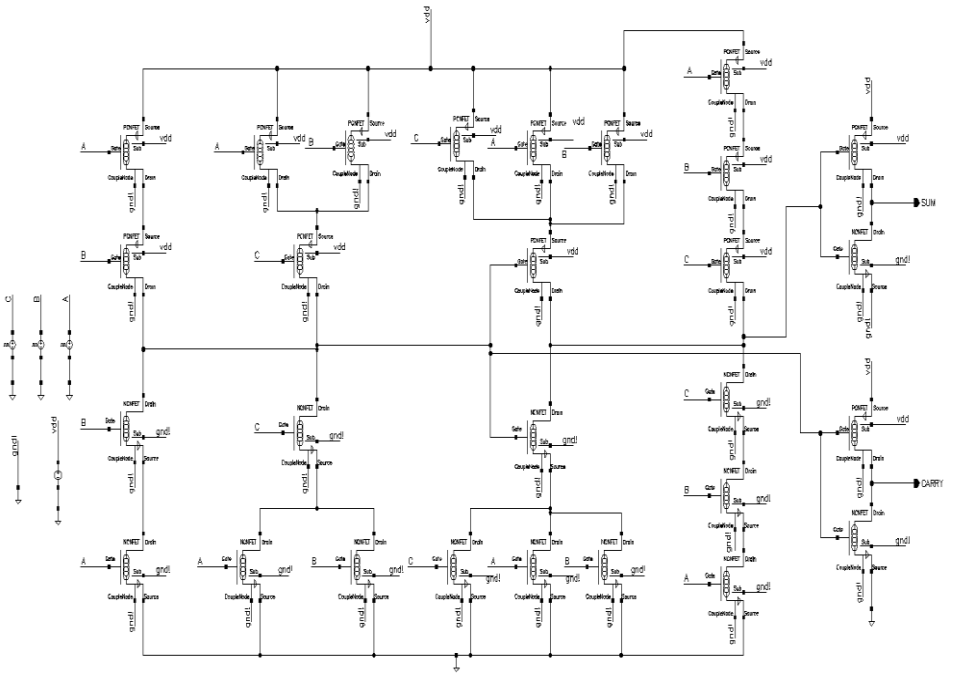


الشكل (9): دارة الجامع الكامل الهجينة المقترحة H-FA.

6. نتائج المحاكاة:

1.6 دارة الجامع الكامل التقليدي (28T-FA):

تمت محاكاة دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA بواسطة برنامج Cadence Virtuoso 6.1.7 وباستخدام تقنية CNTFET 32 nm كما هو مبيّن في الشكل (10)، وذلك عند جهد تغذية V_{dd}=0.9 V ودرجة حرارة (Celsius) □ T=27، وعند جهد عتبة للترانزستورات V V_{th}=0.289 وذلك عن طريق انتقاء متجه الكيرالية (19,0) بناءً على المعادلتين (1) و (2).

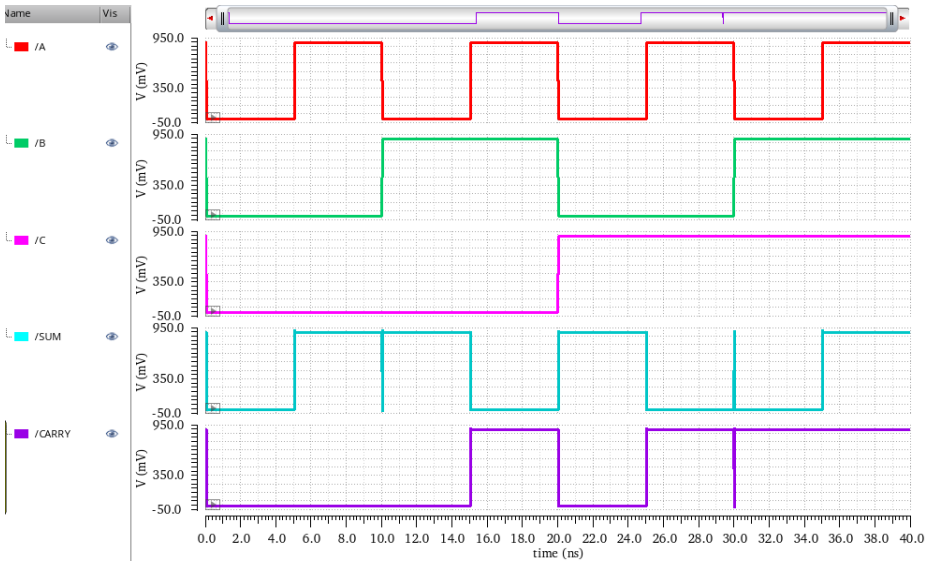


الشكل (10): مخطط دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA.

تم من خلال عملية المحاكاة حساب البارامترات التالية لكل دارة وهي:

1. **الاستطاعة المتوسطة (Average Power)**: والتي نقوم بحسابها من خلال أخذ القيمة المتوسطة للاستطاعة المستهلكة في الدارة خلال زمن المحاكاة.
2. **التأخير (Delay)**: والذي يحدد من خلال الحالة الأسوأ للتأخير لجميع انتقالات الخرج في الدارة.
3. **مضروب التأخير بالاستطاعة (PDP)**: والذي نحصل عليه من خلال ضرب الاستطاعة المتوسطة بأسوأ حالة تأخير.
4. عدد الترانزستورات المستخدمة في الدارة.

كما تم إظهار منحنيات الدخل والخرج لدارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA من خلال إجراء المحاكاة الزمنية المبيّنة في الشكل (11).



الشكل (11): المحاكاة الزمنية لمداخل ومخارج دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA.

يبيّن الجدول (2) نتائج محاكاة دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA:

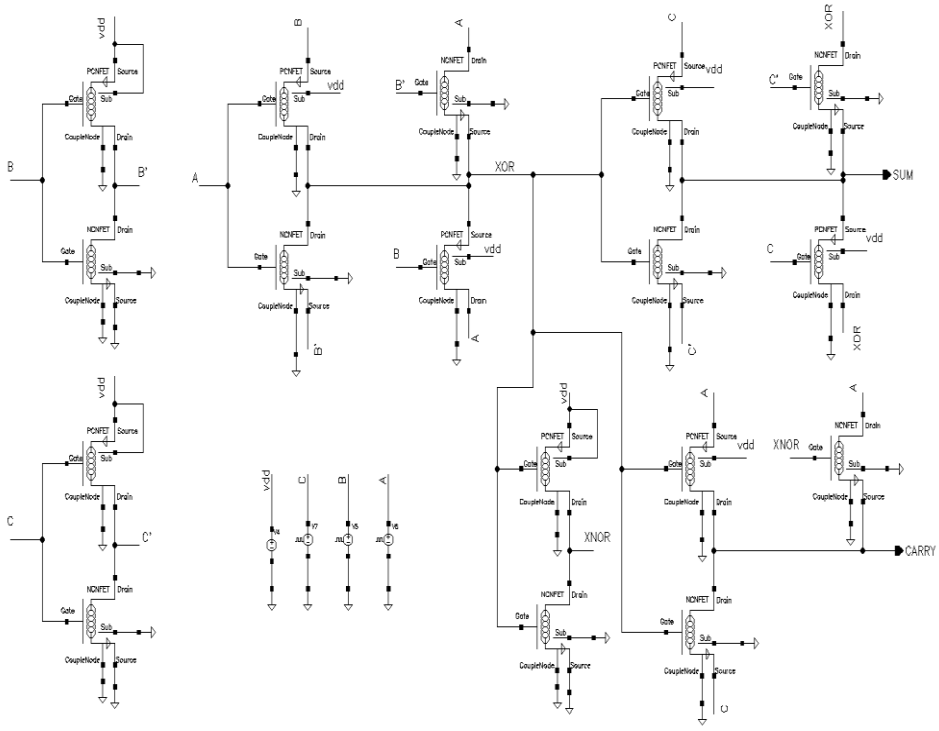
الجدول (2): نتائج محاكاة دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA.

	الاستطاعة المتوسطة (nW)	التأخير (ps)	مضروب التأخير بالاستطاعة (zJ)	عدد الترانزستورات
28T-FA	9.07	11.54	104.667	28

2.6 دارة الجامع الكامل 17T (17T-FA):

تمت محاكاة دارة الجامع الكامل 17T-FA المكونة من 17 ترانزستوراً، والمبيّنة في الشكل (12) باستخدام بارامترات تشغيل مشابهة لدارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA. وتتكون بنية الجامع

الكامل 17T-FA من بوابتين XOR وناخب2×1 للحصول على إشارتي الخرج، وتعتمد هذه الدارة على استخدام تقنية GDI مع ترانزستورات إضافية للحصول على جهد خرج كامل التأرجح [8]. تم استعراض نتائج المحاكاة في الجدول (3).

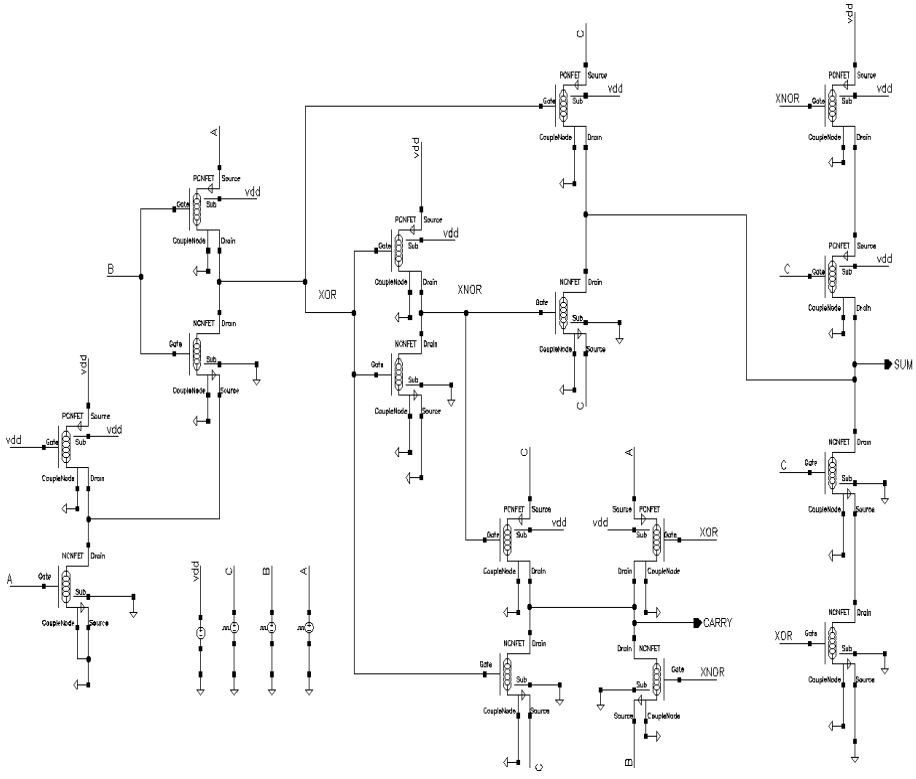


الشكل (12): مخطط دارة الجامع الكامل 17T-FA.

3.6 دارة الجامع الكامل 16T (16T-FA):

تمت محاكاة دارة الجامع الكامل 16T-FA المبيّنة في الشكل (13) باستخدام بارامترات تشغيل مشابهة لدارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA. تتكون هذه الدارة من 16 ترانزستوراً وتعتمد على استخدام تقنيتي PTL وTG، مما يساعد على انخفاض كل من استهلاك الاستطاعة والتأخير

ومضروب التأخير بالاستطاعة (PDP) في الدارة، ويساهم في الحصول على جهد خرج كامل التأرجح [21]. تم إظهار نتائج المحاكاة في الجدول (3).

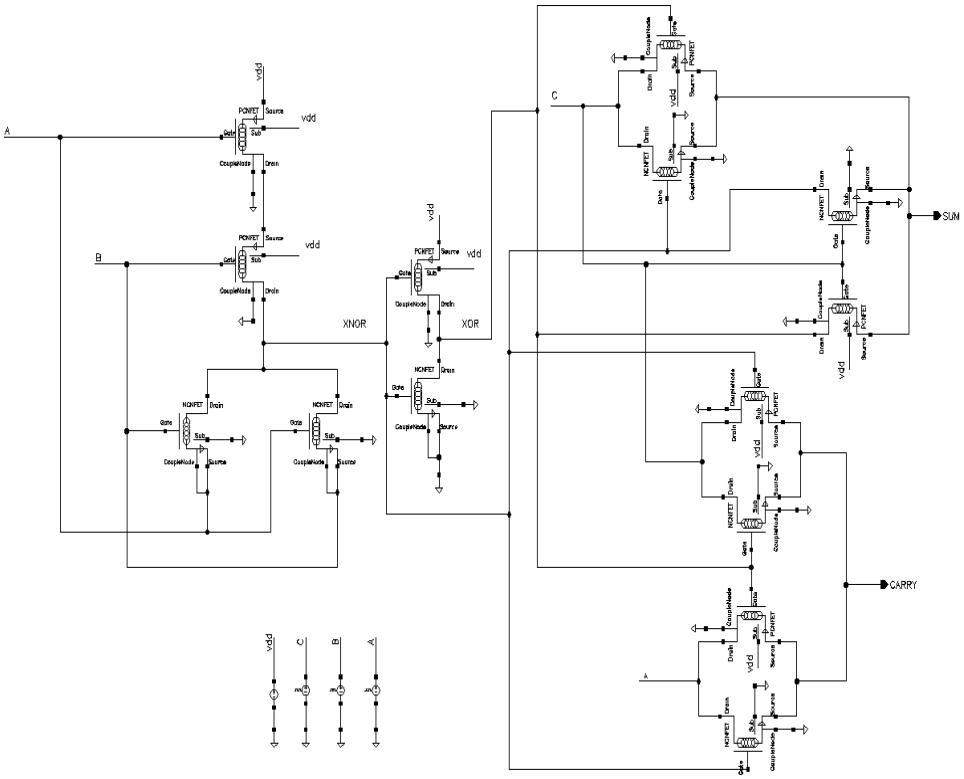


الشكل (13): مخطط دارة الجامع الكامل 16T-FA.

4.6 دارة الجامع الكامل 14T (14T-FA):

تمت محاكاة دارة الجامع الكامل 14T-FA المكونة من 14 ترانزستوراً، كما هو مبيّن في الشكل (14) باستخدام بارامترات تشغيل مشابهة لدارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA. وهي تعتمد على تقنية بوابات الإرسال TG للحصول على إشارة الحمل (CARRY)، وعلى تقنيتي PTL و TG

للحصول على إشارة الخرج (SUM) [22]. تم استعراض نتائج المحاكاة لدارة الجامع الكامل 14T-FA في الجدول (3).

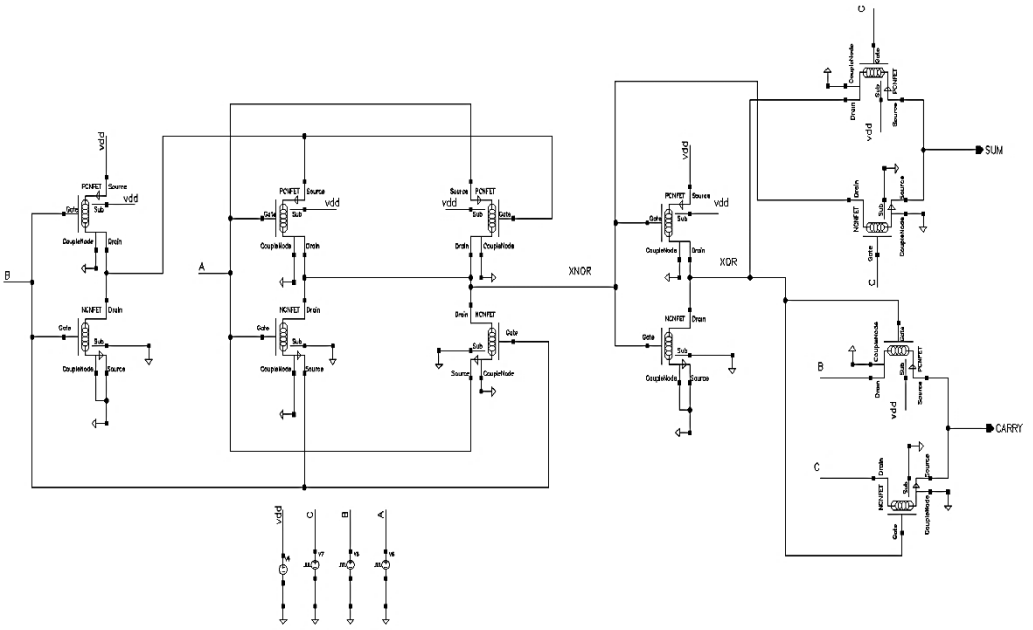


الشكل (14): مخطط دارة الجامع الكامل 14T-FA.

5.6 دارة الجامع الكامل 12T (12T-FA):

تم محاكاة دارة الجامع الكامل 12T-FA والتي تتكون من 12 ترانزستوراً، كما هو مبيّن في الشكل (15) باستخدام بارامترات تشغيل مشابهة لدارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA. تعتمد دارة الجامع الكامل 12T-FA على استخدام بنية XNOR جديدة منخفضة الاستطاعة وعلى استخدام

ناخبين 1×2 للحصول على إشارتي الخرج SUM وCARRY [10]. تم استعراض نتائج المحاكاة في الجدول (3).

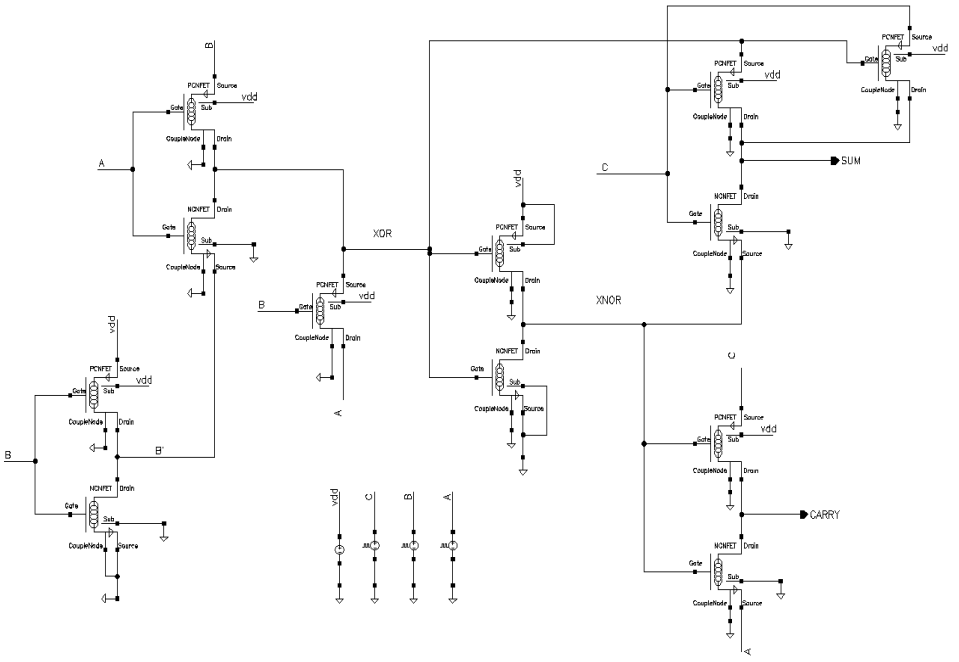


الشكل (15): مخطط دارة الجامع الكامل 12T-FA.

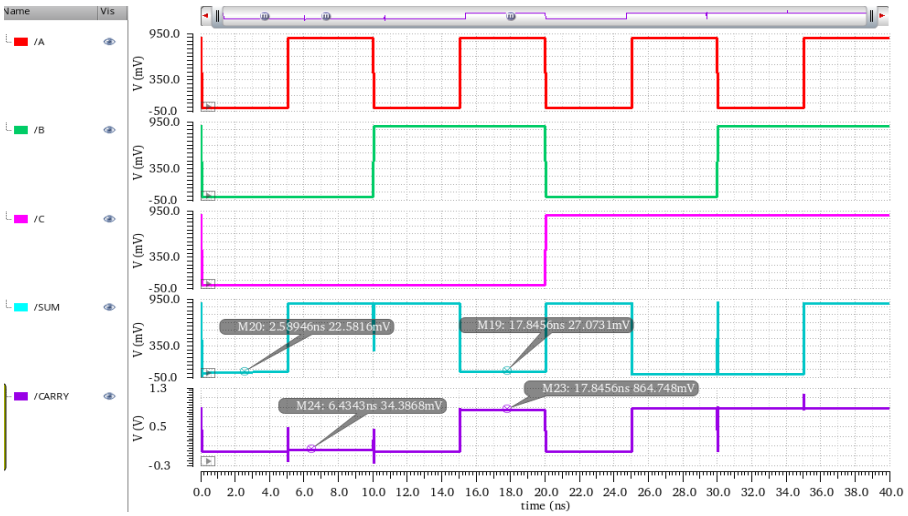
6.6 الجامع الكامل الهجين المقترح (H-FA):

تمت محاكاة دارة الجامع الكامل الهجينة H-FA المقترحة والمكونة من 12 ترانزستوراً، كما هو مبيّن في الشكل (16) عند بارامترات تشغيل مشابهة لدارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA، حيث تعتمد دارة H-FA المقترحة على تقليل عدد الترانزستورات المستخدمة في الدارة من خلال المزج ما بين تقنيتي PTL وGDI، والاستفادة من خصائص ترانزستورات CNTFET القادرة على تمرير "0" و"1" منطقي بشكل ممتاز بنوعيها (P وN). حيث نلاحظ من الشكل (17) الذي يُظهر منحنيات الدخل والخرج للدارة المقترحة أن إشارة المجموع (SUM) تتمتع بـ "1" منطقي

قوي (0.9 V) و "0" منطقي إما قوي (0 V) أو بزيادة طفيفة لا تتجاوز 0.027 V عند حالتين في الدخل، وهما ABC=000 وABC=110. كما نلاحظ من الشكل (17) أن إشارة الحمل CARRY تتمتع بـ "1" منطقي قوي (0.9 V) أو بانخفاض بسيط في الجهد ليصبح 0.864 V في حالة واحدة عندما يكون الدخل المطبق هو ABC=110، كما تتمتع إشارة الحمل CARRY بـ "0" منطقي إما قوي (0 v) أو بزيادة طفيفة في الجهد لا تتجاوز 0.034 V في حالة واحدة عندما يكون الدخل المطبق ABC=100. وعليه نلاحظ أن إشارتي الخرج للدارة المقترحة H-FA متأرجحتان بشكل كامل تقريباً. تم استعرض نتائج المحاكاة للدارة المقترحة H-FA في الجدول (3).



الشكل (16): مخطط دارة الجامع الكامل الهجينة المقترحة H-FA.



الشكل (17): المحاكاة الزمنية لمداخل ومخارج دارة الجامع الكامل الهجينة H-FA المقترحة.

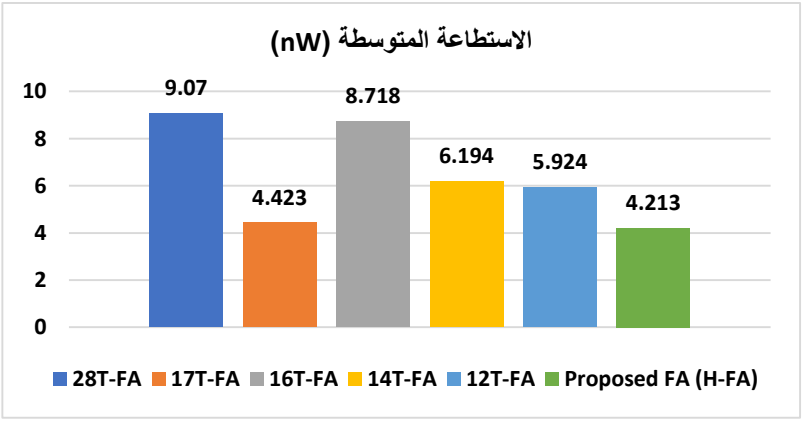
الجدول (3): نتائج محاكاة دارات الجامع الكامل 28T-FA و17T-FA و16T-FA و14T-FA و12T-FA و Proposed FA (H-FA) عند جهد تغذية Vdd=0.9 V

Proposed FA (H-FA)	12T-FA	14T-FA	16T-FA	17T-FA	28T-FA	
4.213	5.924	6.194	8.718	4.423	9.07	الاستطاعة المتوسطة (nw)
10.42	9.791	10.07	10.08	11.33	11.54	التأخير (ps)
43.899	58.001	62.373	87.877	50.112	104.667	مضروب التأخير بالاستطاعة PDP (zJ)
12	12	14	16	17	28	عدد الترانزستورات

7. الاستنتاجات:

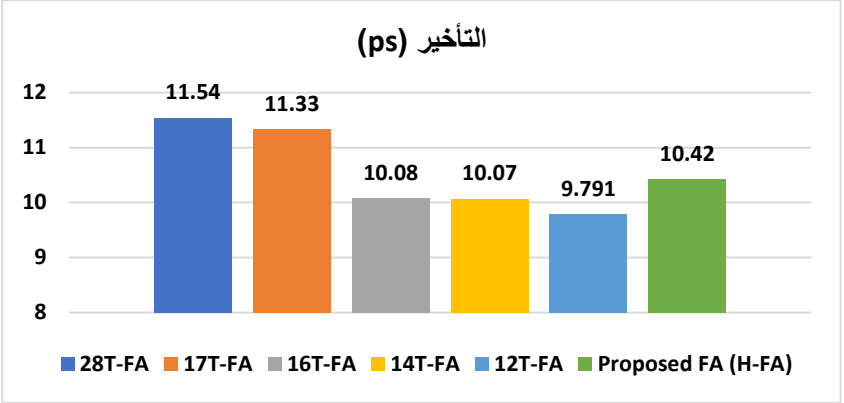
نستنتج من خلال عملية المقارنة ما بين دارات الجامع الكامل المدروسة ما يلي:

- نلاحظ عند المقارنة من حيث استهلاك الاستطاعة أن الدارة المقترحة H-FA هي الأقل استهلاكاً للاستطاعة كما هو مبيّن في الشكل (18)، بسبب تقليل عدد الترانزستورات المستخدمة في بنية الدارة الناتج عن استخدام تقنيتي PTL و GDI، حيث خفضت من استهلاك الاستطاعة بالمقارنة مع الدارات 28T-FA و17T-FA و16T-FA و14T-FA و12T-FA بنسبة 53.55 % و4.74 % و51.67 % و31.98 % و28.88 % على التوالي.



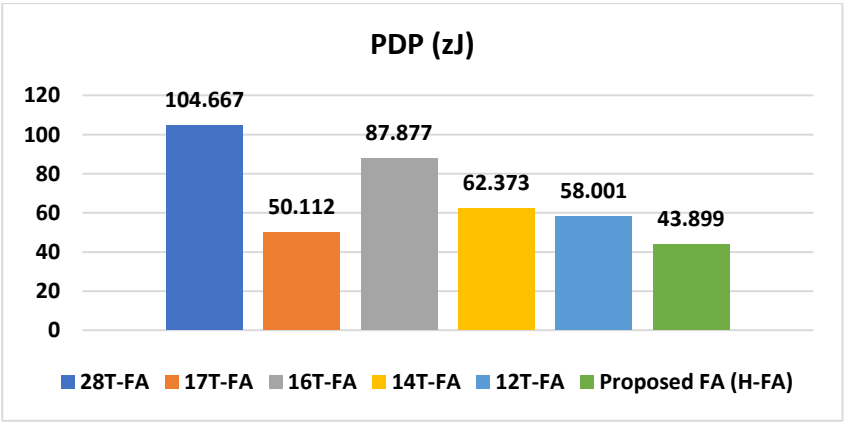
الشكل (18): مقارنة من حيث استهلاك الاستطاعة المتوسطة بين دارات الجامع الكامل المدروسة.

- نلاحظ عند المقارنة من حيث التأخير أن الدارة المقترحة H-FA أقل تأخيراً بالمقارنة مع الدارات 28T-FA و17T-FA بنسبة 9.7 % و8.03 % على التوالي، في حين تُظهر الدارات 16T-FA و14T-FA و12T-FA تأخيراً أقل بقليل من الدارة المقترحة بنسبة 3.26 % و3.35 % و6.03 % على التوالي كما هو مبيّن في الشكل (19).



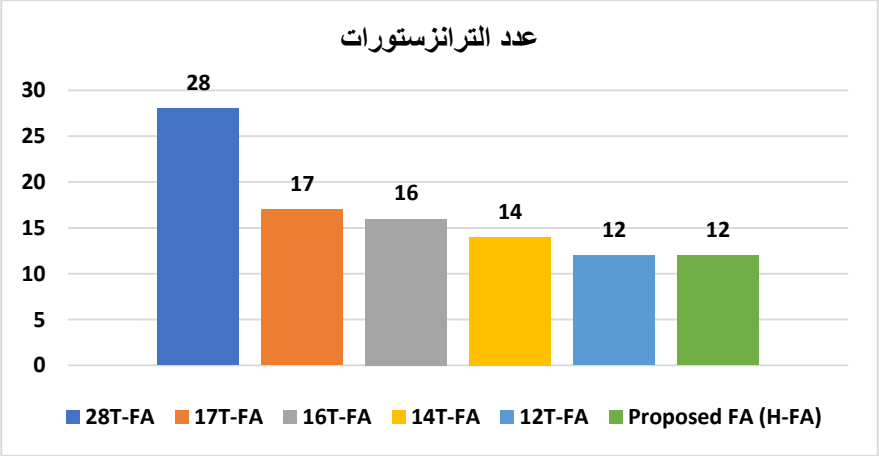
الشكل (19): مقارنة من حيث التأخير بين دارات الجامع الكامل المدروسة.

- نلاحظ عند المقارنة من حيث مضروب التأخير بالاستطاعة (PDP) أن الدارة المقترحة H-FA تمتلك قيمة PDP هي الأقل بين الدارات المدروسة كما هو مبيّن في الشكل (20)، حيث خفضت الدارة المقترحة من قيمة PDP بالمقارنة مع الدارات 28T-FA و17T-FA و16T-FA و14T-FA و12T-FA بنسبة % 58.06 و% 12.41 و% 50.05 و% 29.63 و% 24.33 على التوالي.



الشكل (20): مقارنة من حيث مضروب التأخير بالاستطاعة (PDP) بين دارات الجامع الكامل المدروسة.

- نلاحظ عند المقارنة من حيث عدد الترانزستورات ان الدارة المقترحة H-FA وبالتساوي مع دارة 12T-FA هما الأقل في عدد الترانزستورات المستخدمة في البنية بـ 12 ترانزستوراً كما هو مبيّن في الشكل (21)، حيث خفضت الدارة المقترحة H-FA من عدد الترانزستورات بالمقارنة مع الدارات 28T-FA و17T-FA و16T-FA و14T-FA بنسبة % 57.14 و% 29.41 و% 25 و% 14.28 على التوالي.



الشكل (21): مقارنة من حيث عدد الترانزستورات بين دارات الجامع الكامل المدروسة.

نستنتج من خلال المقارنة السابقة ونتائج المحاكاة الموضحة في الجدول (3) أن الدارة المقترحة H-FA تُظهر تفوقاً واضحاً مقارنةً بالتصاميم الأخرى، فهي الأقل استهلاكاً للاستطاعة والأصغر مساحةً بسبب تقليص عدد الترانزستورات المستخدمة في بنيتها. كما أظهرت النتائج أن الدارة المقترحة قد سجّلت أدنى قيمة لمضروب التأخير بالاستطاعة (PDP)، مما يدل على التوازن ما بين استهلاك الاستطاعة والتأخير، وهو ما يضمن استهلاك استطاعة منخفض مع الحفاظ على

سرعة المعالجة. بناءً على هذه الخصائص فإن دارة الجامع الكامل المقترحة H-FA تعتبر مناسبة للتطبيقات التي تفرض قيوداً صارمة على المساحة واستهلاك الاستطاعة، ومن أهمها:

- الأجهزة المحمولة والأجهزة القابلة للارتداء: وذلك لزيادة عمر البطاريات وتصغير حجم الأجهزة كما في الهواتف والساعات الذكية.
- حساسات إنترنت الأشياء (IoT): والتي تتطلب استهلاك استطاعة منخفض واستدامة تشغيلية طويلة.
- المعالجات منخفضة الاستطاعة والعالية الكثافة.

8. الخاتمة:

تم في هذا البحث اقتراح دارة جامع كامل هجينة H-FA باستخدام ترانزستورات الأثر الحقلي ذات الأنابيب النانوية الكربونية CNTFET بتقنية تصنيع 32 nm. يعتمد التصميم المقترح على دمج تقنيتي PTL وGDI، ويستخدم في بنيته 12 ترانزستوراً فقط. أجريت عمليات المحاكاة باستخدام برنامج Cadence Virtuoso 6.1.7 عند جهد تغذية V_{dd}=0.9 V، وتمت مقارنة الدارة المقترحة مع عدة بنى مختلفة وهي دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA و17T-FA و16T-FA و14T-FA و12T-FA، وذلك من حيث استهلاك الاستطاعة والتأخير ومضروب التأخير بالاستطاعة (PDP) وعدد الترانزستورات.

تبيّن من خلال نتائج المحاكاة أن دارة الجامع الكامل المقترحة H-FA تتميز باستهلاك استطاعة منخفض، حيث انخفضت الاستطاعة المستهلكة مقارنة بالدارات 28T-FA و17T-FA و16T-FA و14T-FA و12T-FA بنسبة % 53.55 و% 4.74 و% 51.67 و% 31.98 و 28.88 % على التوالي. كما سجلت الدارة المقترحة أدنى قيمة لمضروب التأخير بالاستطاعة (PDP)، حيث انخفضت قيمة PDP مقارنة مع الدارات 28T-FA و17T-FA و16T-FA و14T-FA و12T-FA بنسبة % 58.06 و% 12.41 و% 50.05 و% 29.63 و% 24.33 على

التوالي. كما تُعد الدارة المقترحة بالتساوي مع دارة 12T-FA هما الأقل في عدد الترانزستورات المستخدمة في البنية بـ 12 ترانزستوراً، حيث حققت الدارة المقترحة انخفاضاً في عدد الترانزستورات مقارنة بالدارات 28T-FA و17T-FA و16T-FA و14T-FA بنسبة % 57.14 و% 29.41 و% 25 و% 14.28 على التوالي. وبناءً على هذه النتائج، نستنتج أن دارة الجامع الكامل المقترحة H-FA هي الأصغر مساحةً والأقل استهلاكاً للاستطاعة، مما يجعلها مناسبة جداً للتطبيقات التي تفرض قيوداً صارمة على المساحة واستهلاك الاستطاعة، مثل الأجهزة المحمولة والأجهزة القابلة للارتداء وحساسات إنترنت الأشياء وتطبيقات الأنظمة المضمنة.

نخطط في أبحاثنا المستقبلية لاستكشاف استخدام ترانزستورات الأثر الحقلي ذات الأنابيب النانوية الكربونية (CNTFETs) في تصميم دارات الجامع الكامل عند تقنيات تصنيع أحدث مثل 22 nm و10 nm. وتحليل إمكانية دمج الدارة المقترحة ضمن وحدات حسابية أكبر مثل وحدة الحساب والمنطق (ALU) لتقييم كفاءتها على مستوى النظام.

9. المراجع:

1. Saini, J. K., Srinivasulu, A., & Kumawat, R. (2020). Fast and energy efficient full adder circuit using 14 CNFETs. *Solid State Electronics Letters*, *2*, 67–78. https://doi.org/10.1016/j.ssel.2020.09.002
2. Prakash, P., Mohana Sundaram, K., & Anto Bennet, M. (2018). A review on carbon nanotube field effect transistors (Cntfets) for ultra-low power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *89*, 194–203. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.021
3. Reddy Eamani, R., Nallathambi, V., & Asaithambi, S. (2023). A low-power high speed full adder cell using carbon nanotube field effect transistors. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *31*(1), 134-142. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v31.i1.pp134-142

4. عوض، ا.، & غندور، ع. (2024). تصميم ودراسة طوبولوجيا مرايا التيار باستخدام تقنية الأنابيب النانوية الكربونية CNTFET وتقنية ترانزستورات PTM_FET. مجلة جامعة حمص – سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية والكهربائية والمعلوماتية، *46*(2)، 103–134.

5. Taheri, M., Akbar, R., Safaei, F., & Moaiyeri, M. H. (2016). Comparative analysis of adiabatic full adder cells in CNFET technology. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *19*(4), 2119–2128. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.08.007
6. Hemanth, B. S., & Sathish Kumar, M. (2023). Low power, less area, and highly efficient hybrid 1-bit full adder. *Journal of Physics: Conference Series*, *2571*(1), 012026. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2571/1/012026
7. Yin, N., Pan, W., Yu, Y., Tang, C., & Yu, Z. (2023). Low-power pass-transistor logic-based full adder and 8-bit multiplier. *Electronics*, *12*(15), 3209. https://doi.org/10.3390/electronics12153209
8. Anjaneyulu, B., & Reddy, N. S. S. (2024). Design of low power high-speed full, swing 11T CNTFET adder. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, *8*, 100516. https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100516
9. Duanmu, Y., Yang, J., Li, J., Xue, X., Jing, M., & Zeng, X. (2020). A 16-bit arithmetic logic unit design by using gate diffusion input. *2020 IEEE 15th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, 1–3. https://doi.org/10.1109/ICSICT49897.2020.9278245
10. Venkat, D., Mendez, T., Samanth, R., & Nayak, S. G. (2023). Novel design of ripple carry adder using high speed 12t hybrid mos transistors. *Journal of Physics: Conference Series*, *2571*(1), 012025. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2571/1/012025
11. Aggarwal, P., & Garg, B. (2024). Energy efficient full swing gdi based adder architecture for arithmetic applications. *Wireless Personal*

Communications, *135*(3), 1663–1678. https://doi.org/10.1007/s11277-024-11140-0

12. Araújo, A. F. (2024). *Comparison of full-adder cell layouts for 90 nm CMOS technology* (Master's thesis, Universidade do Porto (Portugal)).
13. Srinivas, D., Reddy, N. S. S., & Naik, B. R. (2023). Design and analysis of hybrid 10T adder for low power applications. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, *6*, 100379. https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100379
14. بشور، خ.، العلي، م. د.، & العبود، ع. (2018). محاكاة البارامترات التي تؤثر على سلوك ترانزستورات الأثر الحقلي المصنعة من الأنابيب النانوية. *مجلة جامعة حمص – سلسلة العلوم للهندسة الميكانيكية والكهربائية والمعلوماتية*، *40*(64)، 133–160.
15. Takbiri, M., Navi, K., & Mirzaee, R. F. (2022). Systematic transistor sizing of a cnfet-based ternary inverter for high performance and noise margin enlargement. *IEEE Access*, *10*, 10553–10565. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3144981
16. Gireesh, N., Basha, S. J., & Elbarbary, A. (2024). CNTFET-based digital arithmetic circuit designs in ternary logic with improved performance. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, *7*, 100427. https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100427
17. Venkatesan, C., Thabsera, S. M., Sumithra, M. G., & Suriya, M. (2019). Analysis of 1- bit full adder using different techniques in Cadence 45nm Technology. *2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS)*, 179–184. https://doi.org/10.1109/ICACCS.2019.8728449
18. Wairya, S., Pandey, H., Nagaria, R. K., & Tiwari, S. (2010). Ultra low voltage high speed 1-bit CMOS adder. 2010 International Conference on Power, Control and Embedded Systems, 1–6. https://doi.org/10.1109/icpces.2010.5700479
19. Kandpal, J. (2020). Design and implementation of high-performance hybrid full adders using XOR–XNOR in 90 nm CMOS technology

(Doctoral dissertation, GB Pant University of Agriculture and Technology, Pantnagar, Uttarakhand).

20. Nigam, A., & Singh, R. (2016). Comparative analysis of 28T full adder with 14T full adder using 180 nm. *International Journal of Engineering Science Advance Research, 2*(1), 27–32. https://ramauniversityjournal.com/engineering/pdf_may/27-32.pdf
21. Tirumalasetty, V. R., Babulu, K., & Naidu, G. A. (2024). Efficient 32-nm cntfet-based 1-bit adder: A fast and energy-optimized design. *WSEAS TRANSACTIONS ON SYSTEMS*, *23*, 141–148. https://doi.org/10.37394/23202.2024.23.16
22. Upadhyay, R. M., Chauhan, R. K., & Kumar, M. (2023). Performance evaluation of efficient low power 1-bit hybrid full adder. *ADCAIJ: Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*, *11*(4), 475–488. https://doi.org/10.14201/adcaij.28558
23. Taheri Tari, H., Dabaghi Zarandi, A., & Reshadinezhad, M. R. (2019). Design of a high performance CNTFET-based full adder cell applicable in: Carry ripple, carry select and carry skip adders. *Microelectronic Engineering*, *215*, 110980. https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.110980