

مجلة جامعة البعث

سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية و
الكهربائية و المعلوماتية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 44 . العدد 11

1443 هـ . 2022 م

الأستاذ الدكتور عبد الباسط الخطيب

رئيس جامعة البعث

المدير المسؤول عن المجلة

رئيس هيئة التحرير

أ. د. ناصر سعد الدين

رئيس التحرير

أ. د. هائل الطالب

مديرة مكتب مجلة جامعة البعث

بشرى مصطفى

عضو هيئة التحرير	د. محمد هلال
عضو هيئة التحرير	د. فهد شريباتي
عضو هيئة التحرير	د. معن سلامة
عضو هيئة التحرير	د. جمال العلي
عضو هيئة التحرير	د. عباد كاسوحة
عضو هيئة التحرير	د. محمود عامر
عضو هيئة التحرير	د. أحمد الحسن
عضو هيئة التحرير	د. سونيا عطية
عضو هيئة التحرير	د. ريم ديب
عضو هيئة التحرير	د. حسن مشرقي
عضو هيئة التحرير	د. هيثم حسن
عضو هيئة التحرير	د. نزار عبشي

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

الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة البعث

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

. هاتف / فاكس : 2138071 31 963 ++

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

. البريد الإلكتروني : [magazine@ albaath-univ.edu.sy](mailto:magazine@albaath-univ.edu.sy)

ISSN: 1022-467X

شروط النشر في مجلة جامعة البعث

الأوراق المطلوبة:

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

- يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (الآداب - الاقتصاد - التربية - الحقوق - السياحة - التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):
- عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1. مقدمة.
 2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
 3. أهداف البحث و أسئلته.
 4. فرضيات البحث و حدوده.
 5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
 6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
 7. منهج البحث و إجراءاته.
 8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
 9. نتائج البحث.
 10. مقترحات البحث إن وجدت.
 11. قائمة المصادر والمراجع.
- 7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:
- أ- قياس الورق 25×17.5 B5.
- ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 - يمين 2.5- يسار 2.5 سم
- ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8
- ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20
- . كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي . العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.

- ج . يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.
- 8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.
- 9- تقديم أي بحث للنشر في المجلة يدل ضمناً على عدم نشره في أي مكان آخر ، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.
- 10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة

11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام 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 . الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة . سنة النشر . وتتبعها معترضة (-) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة . دار النشر وتتبعها فاصلة . الطبعة (ثانية . ثالثة) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة .
وفيما يلي مثال على ذلك:

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

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

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

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

ج . إذا كان المرجع أو البحث منشوراً باللغة العربية فيجب تحويله إلى اللغة الإنكليزية و
التقيد

بالبنود (أ و ب) ويكتب في نهاية المراجع العربية: (المراجع In Arabic)

رسوم النشر في مجلة جامعة البعث

1. دفع رسم نشر (20000) ل.س عشرون ألف ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.
2. دفع رسم نشر (50000) ل.س خمسون 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 (3000) ل.س ثلاثة آلاف ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.

المحتوى

الصفحة	اسم الباحث	اسم البحث
44-11	آية خطيب د. علي حسن د. علاء الدين سرحان	تصميم مقسم وجامع استطاعة قطري متعدد المداخل أو المخارج بنقنية الحجرة الطنينية
68-45	خليل عباس د.م المهندس مكي	بناء خوارزمية خاصة بالطباعة الهجينة وبرمجتها باستخدام مصمم التطبيقات في بيئة ماتلاب
98-69	أ.د. مريم ساعي أ.د. جبر حنا دارين محلا	استرجاع الصور باستخدام الخوارزمية <i>TFT2DMCM</i> وتقنيات التعلم الآلي
130-99	الدكتور المهندس رامي موسى	دراسة تأثير تردد الإشارات الحاملة في أداء المبدلات الثلاثية الطور المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية

تصميم مقسم وجامع استطاعة قطري متعدد المداخل أو المخارج بتقنية الحجرة الطنينية

طالبة الدراسات العليا: آية خطيب

المعهد العالي للعلوم التطبيقية و التكنولوجيا

اشراف الدكتور: علي حسن + د. علاء الدين سرحان

المخلص

تقدم هذه الورقة البحثية دراسة ومحاكاة لمجمع استطاعة قطري يعمل بتقنية الحجرة الطنينية، بثمانية منافذ دخل ومنفذ خرج وحيد، وذلك عند التردد 3.1 GHz وبالاعتماد على الكبل المحوري لتغذية المجمع. تم دراسة إدخال حواجز معدنية بين منافذ الدخل على السطح العلوي ثم السفلي للحجرة من ناحية طولها وعرضها وسماكتها، بهدف الوصول لأفضل أداء للمجمع. بينت نتائج المحاكاة للتصميم النهائي الوصول إلى نسب تقسيم استطاعة متساوية وتحقيق معامل انعكاس جيد عند مختلف المنافذ وكذلك عزل جيد جداً بين منافذ الدخل المتجاورة، وذلك مقارنة بالأبحاث المشابهة.

الكلمات المفتاحية: مجمع/ مقسم استطاعة قطري، حجرة طنينية، حواجز معدنية.

Design of a Multiway Radial Cavity Divider/Combiner with Coaxial Ports

Abstract

This paper presents a study and simulation of a radial cavity power combiner/divider, with 8-input ports and one output port, at center frequency of 3.1 GHz, and using coaxial cable to feed the combiner. The insertion of iris metal between input ports on the upper and lower surface of the cavity has been studied in terms of its length, width and thickness, in order to reach the best performance of the combiner/ divider. The simulation results for the final design show equal power division ratios, good reflection coefficient at different ports, as well as very good isolation between adjacent input ports, compared to similar research.

Keywords: Radial power combiner/ divider, resonant cavity, iris.

1- مقدمة

تعتبر الاستطاعة العالية مطلباً أساسياً في العديد من أنظمة الاتصالات الفضائية والرادارية، ولا تقتصر حاجتها على توليد استطاعة عالية بل تحتاج أيضاً لحجم صغير ووزن خفيف وأداء عالي.

أحد الحلول السائدة لتحقيق الاستطاعة المطلوبة هو مضخم صمام الموجة الراحلة [TWTA] travelling wave tube amplifier، وذلك لكونه يقدم أداءً موثوقاً واستطاعة خرج عالية بحيث تصل إلى عدة ميغاواط. لكن يعاني هذا المضخم من عدة سلبيات تتمثل بحجمه الكبير، وسعره المرتفع، وحاجته لزمّن إحماء، وإلى جهود مستمرة مرتفعة [1].

لذلك اتجه البحث لتطوير ودراسة أنواع أخرى من المضخمات، مثل المضخمات نصف الناقلية [SSPA] solid state power amplifier، التي تتميز بصغر الحجم والوزن ووثوقية الأداء، إضافةً إلى زمن إحمائها القصير، وفعاليتها العالية، وتقدم خطية أفضل، وجهد تغذية أقل. وذلك فضلاً عن رخص ثمنها وسهولة استبدالها في حالة الفشل. لكن تكمن العقبة الرئيسية في محدودية استطاعة خرجها، التي تختلف حسب تقنية التصنيع فمثلاً لا تتجاوز استطاعة الخرج في المضخمات Gallium Arsenide (GaAs) عشرات الواط، أما المضخمات Gallium Nitride (GaN) لا تتجاوز الاستطاعة المقدمة فيها مئات الواط [11].

حتى نستخدم النوع السابق من المضخمات لميزاتها المختلفة، كان لابد من التغلب على محدودية استطاعة خرجها من خلال تجميع إشارة الخرج لمجموعة منها بواسطة بنية

المجمعات التي تلعب دوراً هاماً في الدارات الميكروية ذات الاستطاعة العالية، وذلك لميزاتها المختلفة التي نذكر منها:

- (1)- الكلفة العامة للمجمعات أقل من كلفة مضخمات الاستطاعة العالية.
- (2)- ضجيج الصفحة للمجمع أقل بـ $1/N$ من ضجيج الصفحة في المضخم المفرد.
- (3)- يتميز المجمع بخاصية التراجع التدريجي، أي استمرار العمل حتى في حالة خروج أحد المضخمات عن الخدمة.
- (4)- تسهيل تنفيذ دارات التضخيم عريضة الحزمة التي تعد مرغوبة ببعض التطبيقات.

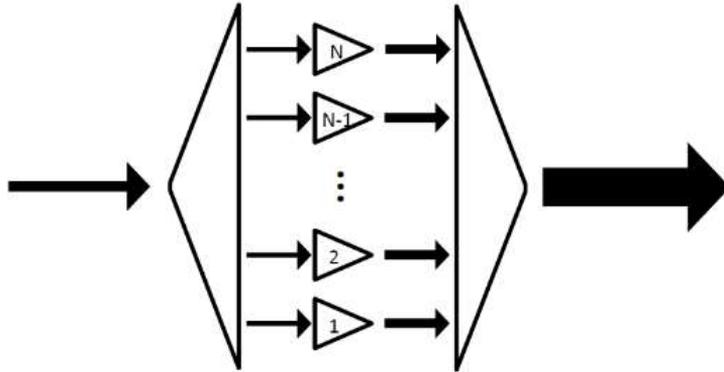
2- هدف البحث

يتحدد الهدف من هذا المشروع بدراسة بنية مجمعات الاستطاعة المكروية وطرق تنفيذها وخصائصها، ثم تبني الطريقة الأفضل للتجميع واختبارها في بيئة المحاكاة الإلكترونية وديناميكية وتنفيذها بشكل عملي.

نشأت فكرة المجمعات المكروية من الحاجة لزيادة الاستطاعة بأقل كلفة وأفضل أداء. فكلما زاد عدد المضخمات المجمع كلما زادت الاستطاعة الناتجة وقلّ ضجيج الصفحة الكلي، لكن بالمقابل سيزيد تعقيد البنية.

ينصح باستخدام مضخمات ذات الحجوم الصغيرة، وذلك للأسباب التالية: أنها تتمتع بفعالية استطاعة مضافة مقارنة بالأجهزة ذات الحجوم الكبيرة، وتصنيعها أسهل وكلفتها أقل، وسهولة تحقيق دارات عريضة المجال الترددي باستخدامها [12].

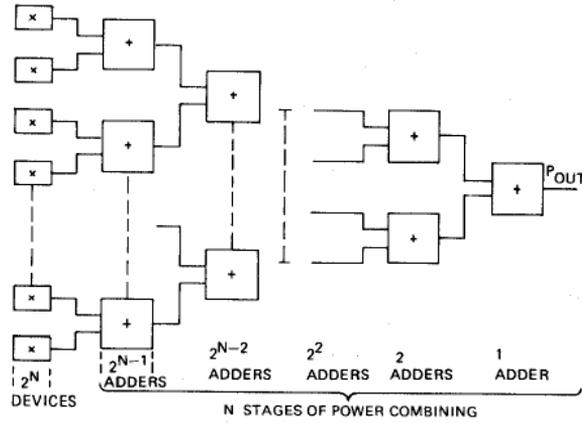
أما عن إجرائية عمل المجمعات/المقسمات، فيمكن شرحها بأن المقسم يقوم بتقسيم إشارة الدخل إلى N إشارة، كل منها سيتم تضخيمها باستخدام أحد المضخمات نصف الناقلية، ليتم تجميع N إشارة مضخمة باستخدام مجمع الاستطاعة، فنحصل على استطاعة خرج مرتفعة [4].



الشكل 1: رسم توضيحي لإجرائية عمل مجمعات/مقسمات الاستطاعة.

أما عن أنواع المجمعات/المقسمات، فتقسم مجمعات الاستطاعة المكروية من ناحية طريقة التجميع إلى نوعين: مجمعات ذات بنى تسلسلية (متعددة الخطوات)، ومجمعات ذات بنى تفرعية (بخطوة واحدة).

ومن أشهر مجمعات البنى التسلسلية أو متعددة الخطوات، مجمعات البنية الشجرية tree structure أو corporate structure، التي يشترط أن يكون عدد الأجهزة المجمعة من مضاعفات 2. وهي موضحة بالشكل 2:



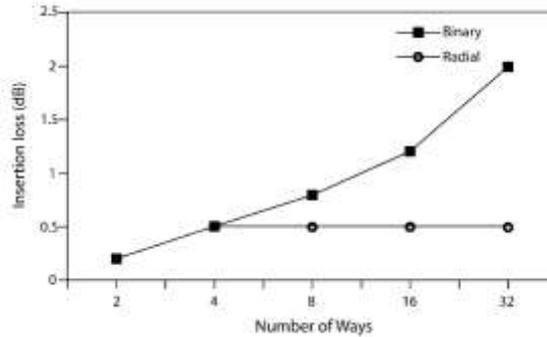
الشكل 2: مجمعات الاستطاعة ذات البنية الشجرية.

تكن مشكلة هذه المجمعات أن الجوامع تعاني من ضياعات، إضافةً لوجود عدد كبير من الوصلات ومقاطع خطوط النقل، التي تزيد من مستوى الضياعات وتؤدي إلى تدهور كبير في كفاءة التجميع الكلي، خاصة بالنسبة لعدد أكبر من المراحل [5].

ومن مجمعات البنى متعددة الخطوات أيضاً الجوامع المتسلسلة Chain combiner. تتميز هذه البنية بإمكانية إضافة مرحلة جديدة ببساطة، عن طريق توصيل المصدر الجديد.

نظرياً يمكن بناء مجمع من عدد كبير من العناصر، لكن الضياعات في الروابط الاتجاهية تقلل من كفاءة المجمع وعرض المجال الترددي، الذي يمكن تحقيقه باستخدام هذه الطريقة، إضافةً إلى أنه من الصعب بناء روابط اتجاهية ذات معاملات ربط عالية عند دمج عدد أكبر من الأجهزة [5].

النوع الثاني من المجمعات هي المجمعات ذات البنى التفرعية (بخطوة واحدة)، ويقصد بها توصيل منافذ الإدخال بالتوازي مع عقدة مجمعة، أي جمع استطاعة منافذ الدخل مباشرةً بخطوة واحدة دون الحاجة لمعالجتها عبر مراحل تجميع متعددة، وبالتالي ضياعات التوافق ستتناقص بشكل واضح مقارنة مع البنية التسلسلية وذلك بسبب قصر مسار التجميع [6]. كما يظهر في الشكل 3 (بحيث يقصد بالـ binary البنية التسلسلية، وبالـ radial البنية المتوازية).



الشكل 3: مقارنة البنية التسلسلية والبنية التفرعية للمجمعات من حيث ضياعات الإدخال. ومن إيجابيات هذه الطريقة أيضاً تدهور الأداء التدريجي graceful degradation في حال خروج أحد المنافذ عن الخدمة إضافة لإمكانية الاستبدال السريع، بمعنى استبدال الأجزاء المعطلة من النظام أثناء العمل.

علماً أنّ التصميم الحذر والدقيق لهذه البنى تمكنا من تحقيق عرض حزمة واسع والوصول إلى فعالية تجميع تصل حتى 90%. فضلاً عن أن فعالية التجميع لا تتعلق بعدد المضخمات على عكس الطريقة التسلسلية [6].

يمكن أن تكون هذه البنى قطرية أو غير قطرية، ولكن البنى القطرية هي السائدة بسبب استغلالها الذكي للمساحة مما يسمح باستخدام عدد أكبر من المنافذ للتجميع. وبما أننا نستخدم في هذا المشروع البنية القطرية، سنتحدث بتفصيل أكبر عن أنواعها المختلفة:

- **مجمعات قطرية تعتمد على الحجرة Radial Cavity–Based Combiner:** هذا النوع من المجمعات توجه الموجة الكهرطيسية ضمن الوسط بأقل ضياع. ونميز نمطين: مجمعات تعتمد على حجرة أسطوانية طنانة، ومجمعات تعتمد على أدلة موجة متكاملة على القاعدة [SIW] Substrate Integrated Waveguide. تتأثر فعالية مجمعات الحجرة الأسطوانية بالتسريب بين منافذ الدخول (العزل) الذي يحدث بسبب الأنماط الغير مرغوبة في الحجرة، ويمكن الحد منها من خلال الشقوق أو الحواجز، كما يمكن تحسين عرض الحزمة والتوافق بإضافة sub-cavity. يستخدم هذا النوع من المجمعات في حالة عرض حزمة محدود؛ حيث يتم تصميم الحجرة لتردد طنين معين [6].
- **مجمعات قطرية لا تعتمد على الحجرة Non–Cavity–Based Combiner:** تعتمد على تقنية microstrip أو Strip line، وذلك لكونها مناسبة للتوافق مع الدارات المتكاملة. ومن إيجابيات هذه التقنية هو إمكانية تحقيق العزل والموافقة باستخدام عناصر lumped مما يجعلها مناسبة للتطبيقات التي تحتاج متطلبات عزل عالية. من أمثلة هذه المجمعات Wilkinson N–way combiner.
- **المجمعات القطرية المكانية:** تستخدم هذه المجمعات واجهات الهوائي للتجميع، وتتميز بكونها توفر نطاقاً ترددياً عريضاً، وغالباً ما تُستخدم للترددات العالية، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات داخل الاتصالات، حيث يكون النقل العالي للبيانات أمراً مهماً [4].

الاختيار بين هذه الأنواع المختلفة يعتمد على مجموعة من المتطلبات مثل: عرض الحزمة المطلوب، والفعالية، والحجم، والعزل، وأخطاء الصفحة والمطال والتدهور التدريجي.

3- مواد وطرق البحث

تم في المرجع [7] تصميم مجمع حجرة طنينية مع 4 منافذ و 8 منافذ، باستخدام نواقل محورية. تتحدث المقالة أنه يتطلب لتصميم مجمع مع فقد تمرير أقل ما يمكن:

1- حجرة ذات معامل جودة عالي.

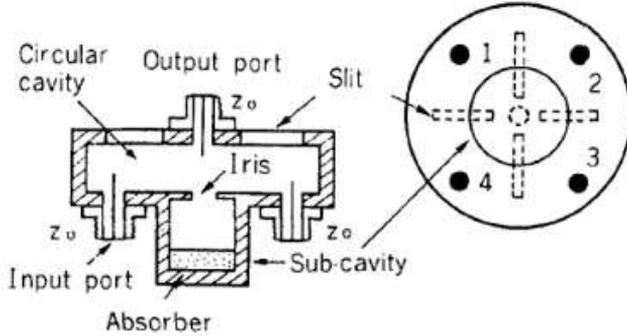
2- ضياعات دخل وخرج أقل ما يمكن.

تم دراسة العزل بين المنافذ من خلال مصفوفة الممانعة لتحديد شروط تقليل الترابط بين المنافذ، بحيث تعتمد على إيجاد القيم الذاتية والمتجهات الذاتية للمصفوفة. من قيم الأشعة الذاتية نحصل على أشكال التيارات في حالة 4 منافذ للمجمع، والأنماط المرافقة لكل حالة تيار مجمعة بالجدول التالي:

جدول (1): الأنماط المرافقة للتيارات.

التيار	النمط المرافق للتيار
i_0	TM_{0Q0}
i_1	استقطاب دائري عكس عقارب الساعة TM_{1Q0}
i_2	TM_{2Q0}
i_3	استقطاب دائري مع عقارب الساعة TM_{1Q0}

Q في الجدول السابق معامل صحيح ويدل على النمط غير المرغوب المرافق للتغذية. الأنماط غير المرغوبة لا تتجه نحو المركز مما يؤدي إلى انعكاس الإشارة على منافذ الدخل، سيتم استخدام شقوق وأشباه حجرة من أجل امتصاص هذه الأنماط غير المرغوبة.



الشكل 4: تموضع الشقوق وشبه الحجرة ضمن الحجرة الأسطوانية للمجمع.

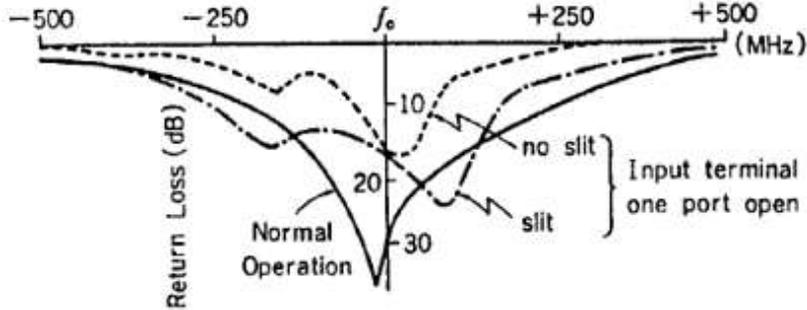
ترتبط الطنانة الفرعية sub-cavity مع النمط الدوراني TM_{1Q0} بحيث تتكون من مرشد موجة يمرر النمط TE_{11} فقط، ويوجد في نهاية أحد جانبي مرشد الموجة ماص مايكروني. أما الشقوق طولها $\lambda/2$ وتقطع تيار النمط TM_{2Q0} المتدفق على السطح السفلي للحجرة، مما يؤدي لإشعاع الطاقة خارجاً.

من أجل مجمع مع 8 منافذ، تكون الإجراءية مشابهة لمجمع بـ 4 منافذ، فالأنماط غير المرغوبة ذات استقطاب دائري مع عقارب الساعة، وعكس عقارب الساعة وهي الأنماط

$$TM_{4Q0}, TM_{3Q0}, TM_{2Q0}, TM_{1Q0}$$

النتائج التجريبية لشبه الحجرة والشقوق:

تحديد نتائج وضع الشقوق وشبه الحجرة من خلال قياس العزل بين منافذ الدخل، بحيث تم تغذية منفذ واحد وقياس مستوى الاستطاعة لكل المنافذ، سنلاحظ تراكب النمط المرغوب مع الأنماط الأخرى بشكل لا يمكن فصله. كان فقد الإشارة العائدة حوالي 8 dB ما عدا نقطة الطنين، كما تجدر الملاحظة لعدم وجود اختلافات واضحة في النتائج عند استخدام شقوق بعرض 1 mm و $1-5\text{ mm}$. كما تم دراسة تأثير خروج أحد المنافذ عن الخدمة، بحيث تم وضعها دارة مفتوحة، إضافة لتأثير وجود شقوق وعدم وجودها.



الشكل 5: فقد الإشارة العائدة لمجمع بثمانية منافذ بحالة خروج أحدها عن الخدمة.

أما فقد الإدخال فتبلغ قيمته عند التردد 12 GHz حوالي 0.25 dB لمجمع بأربعة منافذ، و 0.45 dB لمجمع بثمانية منافذ، بحيث تراجع فقد الإدخال باستخدام الشقوق وشبه الحجرة حوالي 0.05 dB بالنسبة لبنيتي المجمع. في المرجع [8] تم استخدام دليل الموجة بدلاً من الناقل المحوري لإشارة الخرج فقط، وهذا يزيد تعقيد البنية لكن يحسن من نسبة الأمواج المستقرة وفقد الإعادة. التحدي الأساسي في العمل هو تحقيق فقد إدخال أقل ما يمكن، علماً أن فقد الإعادة وتوافق الدخل والخرج وضياعات الناقل كلها تؤثر على فقد الإدخال.

ومع أننا نستخدم دليل موجي لإشارة الخرج، لكن معاملات التبعثر S للمنافذ الستة عشر قريبة من بعضها، كم أن نسبة الأمواج المستقرة يتم تحسينها من خلال تقنيات التصنيع. تقوم النواقل المحورية بدور مرشح لأنماط الانتشار، بحيث ترشح الأنماط العالية التي يتم انتشارها عند استخدام الدليل الموجي، بحيث يصل رفض النمط لحوالي 37 dB، ويمكن اعتبار أن النمط العرضاني TEM سيتواجد فقط. مما يؤدي إلى توزع متجانس لكل منافذ النواقل المحورية، أي أن بارامترات المنافذ قريبة من بعضها.

ثم تعرض المقالة نتائج التصميم الناتجة عن المحاكاة والتنفيذ العملي. في البداية يتم عرض فقد الإعادة وكيفية تغييره مع تغير طول الناقل المحوري، بحيث تصل قيمة فقد الإعادة إلى 22 dB على المجال 4.4-5 GHz مع عرض حزمة 22%. أما بالنسبة لفقد الإدخال فقيمه المثالية هي 12.04 dB - وهي مساوية لقيمة 1/16، لكن نتائج المحاكاة تعطي قيم أقل بـ 0.06 dB للقيمة المثالية.

يتحدث المرجع [6] في بدايته عن المقارنة بين المجمع القطري والمجمعات الشجرية والثنائية، ويبرهن حسب المراجع على أفضلية المجمع القطري من حيث الكفاءة والضياعات وقدرة التجميع. يتكون المجمع القطري من ثلاث أقسام: المغذي، ومسار التقسيم، والمقسم.

المغذي هو ناقل محوري موصول مع خط دائري لا نهائي. أما مسار التقسيم أو الخط الدائري فهو عبارة عن خط نقل قليل الضياع مع نقطة تغذية في منتصفه، حيث تتوزع الطاقة بشكل منتظم للخارج بالنسبة لنمط الانتشار مع مركبة الحقل الكهربائي المحوري. علماً أن ضياع هذا الخط أقل من خط نقل شرائحي microstrip (يمثل ضياعه 1/3 من ضياع خط النقل الشرائحي ذي الممانعة المميزة 50Ω).

يجب تغذية الخط الدائري بشكل متناظر لمنع انتشار الأنماط المرتفعة (بحيث الاستقرار الميكانيكي، التغذية المتناظرة، واختيار المأخذ الخارجي للناقل المحوري للمغذي، هي

المفاتيح لتحقيق تغذية متوازنة ومنتظمة)، فانتشار أنماط عليا سوف تزيد من الضياع، وعدم توازن المطال والصفحة بين المنافذ الطرفية (النمط المسيطر ينتشر بشكل قطري، أما الأنماط العليا تنتشر بشكل محيطي)، بحيث النمط المسيطر يعطي توازن بالصفحة لكل المنافذ بينما الأنماط العليا تغير قطبيتها بشكل دوري بالاتجاه المحيطي وذلك كل $\frac{\pi}{n}$ حيث n رقم النمط أي تسبب عدم توازن بالصفحة متغير.

المسار المشترك (القسم الأوسط) هو عبارة عن قرص دائري محمل عند حافته بحلقة مقاومة لتوفير التخميد لأنماط الانتشار ذات المراتب العليا المحيطية، مع الحفاظ على عزل مناسب بين المنافذ.

يتفرع القرص إلى نواقل شرائحية تُكون المقسم، والتي تستخدم لتغذية المضخمات وهي تسبب ضياع، ويجب أن تكون أطوالها قصيرة قدر الإمكان لزيادة كفاءة المجمع.

يقدم المرجع [9] تصميماً عبارة عن مجمع استطاعة قطري بمنافذ أدلة موجية وتم اختياره بفضل صفاته المميزة (التي تتمثل بالضياعات المنخفضة، والقدرة على التعامل مع الاستطاعات العالية وعرض المجال الترددي الواسع). وسيتم استخدام خط نقل مخروطي موصول مع مأخذ [SMA] SubMiniature version A بممانعة 50Ω (لموافقة الدليل الموجي مع المآخذ SMA)، وتم فصل المنافذ الطرفية عن بعضها من خلال صفائح معدنية شاقوليه بهدف تحسين العزل.

تم وصل الناقل الداخلي للمأخذ SMA مع السطح العلوي لخط النقل المخروطي بهدف تقليل ضياع الإدخال.

تتعلق الممانعة المميزة لخط النقل المخروطي بزاوية التصميم فقط، مما يجعل خط النقل هذا عريض الحزمة الترددية.

إن النمط المسيطر ضمن الدليل الموجي هو TEM؛ حيث الحقل E موجود باتجاه Z والحقل H متموضع على دوائر متحدة المركز؛ بحيث الحقول تشبه بتموضعها حالة دليل

الموجة المستطيل. ثم نتحدث المقالة عن قياس الممانعة المميزة للناقل القطري وخوارزمية إيجادها.

4- النتائج ومناقشتها

سنعمل في البداية على فهم مكونات المجمع وخصائص كل مكون والطريقة التي يجب أن يصمم بها، لنصبح بعدها قادرين على البدء بالتصميم.

• الحجرة الطنينية:

لفهم مبدأ عمل الحجرة الطنينية علينا أولاً توضيح مفهوم الطنين، الذي يعني وجود موجة واردة قطعت مسافة معينة ثم اصطدمت وانعكست، فتتلاقى الموجة الواردة مع المنعكسة وتجتمعان بشكل بناء. علماً أنّ الطنانة المثالية عديمة الضياع هي التي لا تمتلك أي فتحة للتغذية أو لإشارة الخرج. بهذه الحالة ستهتز الموجات ضمن الحجرة للأبد (بشرط أن يكون المعدن مثالي). إضافة منفذ دخل أو الخرج يكافئ إضافة عناصر ممانعة مما يسبب ضياعات وإزاحة في تردد الطنين، كما أن معدن الحجرة ليس مثالياً. في حال كان وسط سير الموجة الراحلة هو دليل موجي ستقطع الموجة مسافة $n\frac{\lambda}{2}$ (شرط انتشار الموجة ضمن موجة الموجة تشكل الأمواج المستقرة) [10].

إن الحجرة الأسطوانية هي عبارة عن دليل موجة أسطواني تم قصر نهايته بصفائح معدنية، مما يكسبه تناظر دائري والذي يؤدي بدوره لبعدين محتملين للطنين، الأول ارتفاع الأسطوانة d (اتجاه الانتشار)، والثاني الاتجاه العامودي عليه.

من أجل دراسة الحقول الكهرومغناطيسية، نأخذ الشروط الحدية عند جانبي الحجرة $(z = 0, d)$ وهذا يوافق انعدام تابع بيسل أو مشتقه. في حالة الحقل الكهربائي TE_{nm} سنرمز لجذور بيسل ρ'_{nm} وبشكل مشابه بالنسبة للحقل المغناطيسي TM_{nm} سنرمز

لتوابع ببسل ρ_{nm} . فنحصل على العلاقة التالية المعبرة عن الحقل الكهربائي كما وردت في المرجع [4]:

$$\vec{E}_t(\rho, \phi, z) = \underbrace{\vec{e}(\rho, \phi)}_A \underbrace{(A^+ e^{-i\beta_{nm}z} + A^- e^{i\beta_{nm}z})}_B \quad (1)$$

يعبر التابعين A و B عن تغيرات الموجة العرضانية للموجة الواردة والمنعكسة ضمن دليل الموجة، بعد تطبيق الشروط الحدية نحصل على أن مطال الموجة الواردة والمنعكسة يجب أن يكونان متعاكسان $A^+ = -A^-$ ، وهذا يعطي علاقة لتحديد ارتفاع الأسطوانة من الشكل: $\beta_{nm}d = l\pi$ حيث l أي عدد صحيح، و β_{nm} هو معامل الانتشار ضمن الحجرة الذي يعطى بالعلاقات التالية بالنسبة للحقل الكهربائي والمغناطيسي، كما وردت في المرجع [4]:

$$\text{TE :} \quad \beta_{nm} = \sqrt{k^2 + \left(\frac{\rho_{nm}'}{a}\right)^2} \quad (2)$$

$$\text{TM :} \quad \beta_{nm} = \sqrt{k^2 + \left(\frac{\rho_{nm}}{a}\right)^2} \quad (3)$$

حيث $k = w\sqrt{\mu\epsilon}$ معامل الانتشار في الخلاء، بإعادة ترتيب العلاقة السابقة نحصل على ترددات القطع:

$$\text{TE :} \quad f_{nml} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\rho_{nm}'}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2} \quad (5)$$

$$\text{TM :} \quad f_{nml} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\rho_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2} \quad (6)$$

تم استخدام دليل جديد وهو l الذي يعبر عن وجود أمواج مستقرة في جهة الانتشار.

يمكن دراسة ممانعة الحجرة الأسطوانية بالاعتماد على نموذج دائرة الطنين التفرعية فبتطبيق نظرية الدارات عليها، نحصل على ممانعة الحجرة التي تعطى بالشكل التالي، كما وردت في المرجع [4]:

$$Y(w) = \frac{1}{R} + \frac{1}{jwL} + jwC; \quad Z = Y^{-1} \quad (7)$$

ويمكن التعبير عن معامل الجودة للحجرة بدلالة عناصر الدارة: $Q = w_0RC$

حيث $w_0^2 = \frac{1}{LC}$ تردد الطنين. مما سبق يمكن التعبير عن ممانعة الحجرة الطنينية بالعلاقة التالية:

$$Z = -\frac{\frac{jw}{C}}{w^2 - w_0^2(1 + \frac{j}{Q})} \quad (8)$$

السؤال الآن، كيف يمكن تغذية الحجرة الطنينية؟

يجب مراعاة عدد من الاعتبارات عند تغذية الحجرة وهي: الترابط بين الطنانة والتغذية، وتردد إشارة الدخل وتموضعها، ودعم حقل إشارة التغذية لحقل نمط الطنين وهذا يعني أن يكون حقل التغذية أعظمي وبهذا يغذي مجال الرنين.

يحتوي نظام الطنين عادةً على عدد من المنافذ للتغذية التي تؤثر على أداء الحجرة الطنيني، واختيار طريقة التغذية يعتمد على مجموعة من الخواص مثل: المجال الترددي،

ومستويات الطاقة، والضياعات، كما يجب الأخذ بالحسبان التجهيزات الميكروية التي ستتصل بها الرنانة.

تم اختيار نمط الانتشار ضمن الحجرة TM_{0m0} ، حيث $m \geq 2$ لأن $m = 1$ يكون $E_z = 0$ إضافةً إلى أن تحقيقها يتطلب تجهيزات بحجم أصغر، أو زيادة قطر الدائرة التي توجد عليها الأجهزة. تؤثر m بالحالة العامة على عدد الأجهزة المستخدمة للتجميع، وبالتالي على عرض حزمة المجمع، وعلى الأنماط المنتشرة ضمن الحجرة، فقد تسبب ظهور أنماط غير مرغوبة مما يؤثر على فعالية الأداء، لذلك يترافق تصنيع الحجرة دوماً بأساليب لحذف هذه الأنماط مثل الشقوق أو الحواجز.

تم اختيار النمط TM_{020} للانتشار ضمن الحجرة، وتم استخدام تردد القطع لتحديد نصف قطر الحجرة، بحيث يجب ألا تتجاوز ارتفاع الحجرة $\frac{\lambda}{2}$ (علماً أنّ تردد القطع لن يتأثر بارتفاع الحجرة طالما $l = 0$). بالتعويض بالعلاقة (6) نحصل على العلاقة التالية:

$$a = \frac{c \rho_{nm}}{2\pi f_r \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (9)$$

• المنفذ الرئيسي والمنافذ الجانبية

إنّ المجمع القطري لديه عدد من المنافذ الجانبية التي تمثل إشارة الدخل، ومنفذ مركزي تتجمع فيه إشارة الخرج. هذه المنافذ هي المسؤولة عن حمل الترددات المطلوبة وتحقيق التوافق بين المجمع والدارات المجاورة بأقل ضياع ممكن.

تم اختيار الناقل المحوري لحمل الإشارات في المنافذ الجانبية والإشارة المركزية، بحيث طوله $l_{wg} < 3\lambda$ وذلك لتجنب الانعكاسات والأنماط الغير مرغوبة. يقع المنفذ المركزي في المركز حيث الرنين أعظمي لكل إشارات الدخل. وتتوزع المنافذ الجانبية

بشكل منتظم حول الحجرة، وذلك لتوليد نمط متناظر دائري TM_{0m0} ، وعدد هذه المنافذ تعتمد على حاجة التضخيم، وهو معامل تصميم هام بحيث يؤثر على معامل الجودة للطنانة والذي بدوره يؤثر على عرض الحزمة. لا يمكن تجميع أي عدد من المنافذ فيزيائياً في الحجرة القطرية وذلك بسبب محدودية المساحة.

• معاملات يجب مراعاتها عند التصميم:

أولاً: موافقة الممانعات يمكن النظر للممانعة المكافئة للمنافذ الجانبية على أنها مجموع ممانعات موصولة على التفرع، حسب المرجع [4]:

$$\frac{1}{Z_{peripheral}} = \frac{1}{Z_{wg}} + \frac{1}{Z_{wg}} + \dots = \frac{N}{Z_{wg}} \quad (10)$$

$$\Rightarrow Z_{peripheral} = \frac{Z_{wg}}{N}$$

بحيث أي تعديل على الممانعة مثل إضافة ممانعة تفرعيه ستؤثر حكماً على تردد الطنين للحجرة، وهذا ليس بالضرورة أن يسبب مشكلة لأن الحجرة ستتوافق معه.

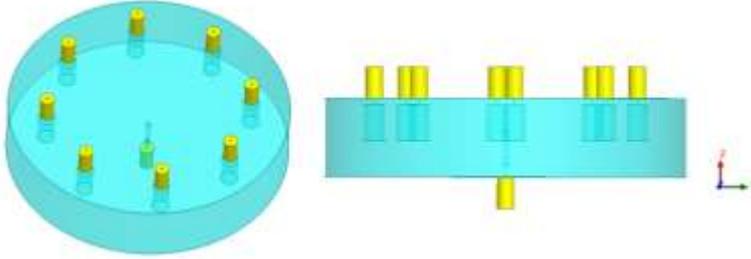
ثانياً: عرض الحزمة تحدثنا سابقاً أن عرض الحزمة ضيق للحجرة الأسطوانية الطنانة، لكن يمكن زيادته من خلال زيادة عدد المنافذ مما يقلل معامل الجودة. يمكن تقدير قيمة رياضية تقريبية لعرض الحزمة باستخدام الدارة المكافئة ودراسة التوافق بين الطنانة والمنافذ المجاورة، بحيث يحسب BW من خلال معامل الجودة المحمل (Q_L) loaded Q-factor الذي يتعلق بمعامل الربط ومعامل الجودة غير المحمل (Q_0) . ومعامل الجودة الخارجي Q_{ext} الذي يعبر عن الترابط بين المهتز والتغذية، فحتى يتساوا معامل الجودة المحمل والغير محمل يجب أن يكون الترابط أكبر ما يمكن [4].

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}} \quad (11)$$

ثالثاً: العزل أو التسريب بين المنافذ نقصد بالتسريب مقدار الاستطاعة الضائعة من استطاعة الدخل عبر المنافذ، ويحدث نتيجة ظنين أنماط غير مرغوبة. للتخلص من التسريب بين المنافذ أو لتخفيف أثره يجب أولاً تحديد الأنماط غير المرغوبة ثم حذفها. لكن يجب أن نتذكر أنه لا يمكن تحقيق عزل وترابط وموافقة ممانعات مثالية بآن معاً.

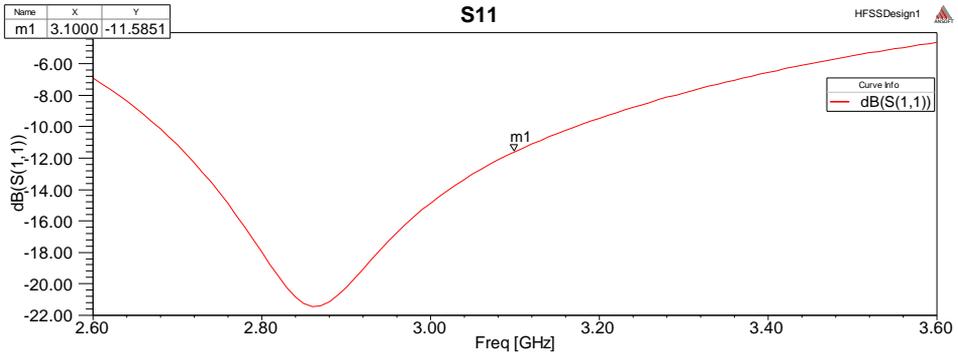
• التصميم الأول:

بالاعتماد على بيئة المحاكاة الإلكتروديناميكية المتمثلة ببرنامج High Frequency Structure Simulation [HFSS]، تم تصميم الحجرة الأسطوانية الطنينية بنصف قطر $a = 85 \text{ mm}$ ، نحسبه بالتعويض في العلاقة (9)، وارتفاع لا يتجاوز نصف طول الموجة أي $d < 40.8 \text{ mm}$ ، حتى لا نحصل على أمواج مستقرة في جهة الانتشار. ومنافذ الدخل والخرج كما ذكرنا سابقاً كوابل محورية مع وجود أسطوانات داخلية نحاسية ملتصقة مع الناقل الداخلي للكبل المحوري بهدف تعديل ممانعة المنافذ الطرفية للوصول إلى توافق ممانعات [4]. يجب أن تتموضع المنافذ الطرفية بحيث تكون متباعدة عن بعضها البعض بشكل متساوي لتحقيق التناظر الدائري، وطالما عددها ثمانية هذا يعني تموضع كل منها على زاوية قدرها 45° مبتعدة عن المركز ببعد قدره $\rho = 62.04 \text{ mm}$ حيث الحقل الكهربائي أعظم ما يمكن [11]. فحصلنا على الشكل التالي:



الشكل 6: بنية مجمع الاستطاعة القطري.

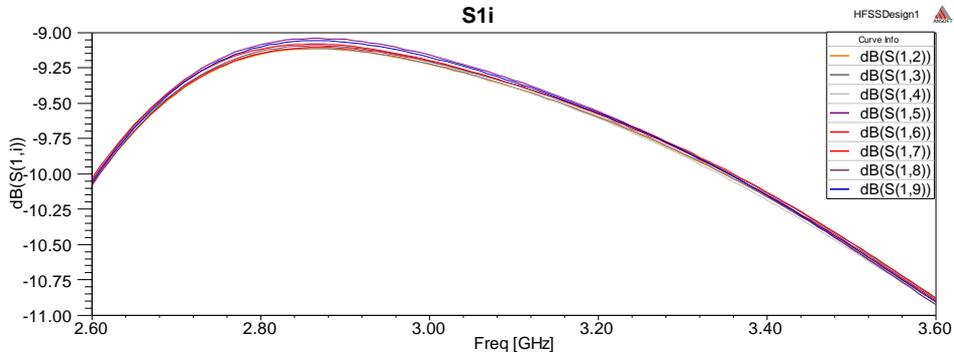
فتكون نتائج محاكاة هذه البنية، ضمن المجال الترددي $[2.6-3.6]$ GHz، الذي يضم تردد العمل في مركزه (3.1 GHz). بحيث يمثل الشكل التالي معامل الانعكاس على المنفذ المركزي والذي يعبر عن مقدار الاستطاعة المنعكسة الضائعة على هذا المنفذ:



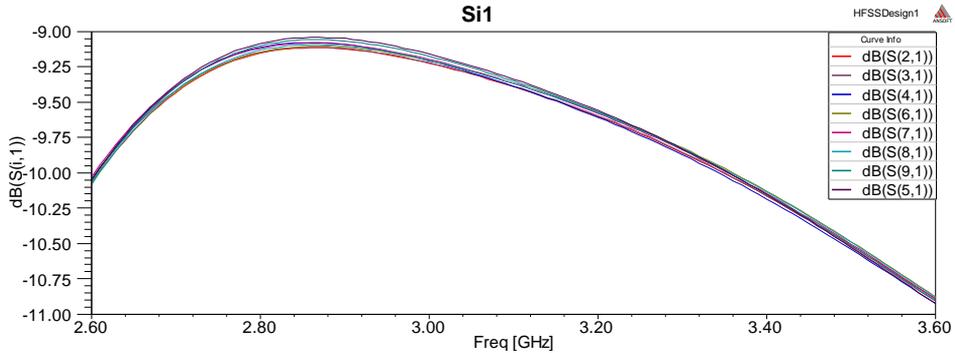
الشكل 7: معامل الانعكاس على المنفذ المركزي.

نلاحظ من الشكل السابق أن الدارة موفقة، فيمكن اعتبار قيمة معامل الانعكاس مقبولة طالما أقل من 10 dB ، والقيمة لدينا هنا عند التردد المركزي (3.1 GHz) -11.5851 dB .

ولمعرفة توزيع الاستطاعة من المنفذ المركزي إلى المنافذ الطرفية وبالعكس، قمنا برسم معاملات العبور S_{1i} ، أي مقدار الاستطاعة الموزعة من المنفذ الأول إلى المنافذ الطرفية وبالعكس، والتي يجب أن تكون متساوية ومتطابقة وقيمتها عند التردد المركزي قريبة من القيمة المتوقعة أي قريبة من -9.03089 dB ، لأنه في حال غدينا بمقدار 1 W ستكون الاستطاعة الموزعة على 8 منافذ أي: $10 \log\left(\frac{1}{8}\right) = -9.03089 \text{ dB}$.



الشكل 8: مقدار الاستطاعة من المنافذ الجانبية إلى المنفذ المركزي.



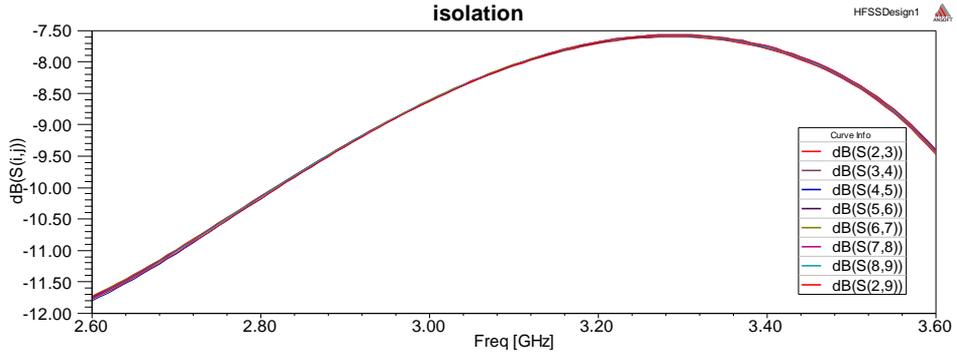
الشكل 9: مقدار الاستطاعة من المنفذ المركزي إلى المنافذ الجانبية.

بالفعل يوضح الشكلين السابقين تطابق قيم معامل العبور S_{1i} ، S_{i1} ، أي أن الدارة عكوسه أي يمكن استخدامها كمجمع أو كمقسم. ولتوضيح قيم هذه المعاملات عند التردد المركزي نظمنا الجدول التالي:

جدول (2): قيم الاستطاعة من المنفذ المركزي إلى المنافذ الطرفية وبالعكس عند التردد المركزي.

المعامل	القيمة	المعامل	القيمة
S_{12}	-9.3914 dB	S_{21}	-9.3914 dB
S_{13}	-9.3871 dB	S_{31}	-9.3871 dB
S_{14}	-9.3870 dB	S_{41}	-9.3870 dB
S_{15}	-9.3370 dB	S_{51}	-9.3370 dB
S_{16}	-9.3666 dB	S_{61}	-9.3666 dB
S_{17}	-9.3669 dB	S_{71}	-9.3669 dB
S_{18}	-9.3693 dB	S_{81}	-9.3693 dB
S_{19}	-9.3502 dB	S_{91}	-9.3502 dB

رسمنا العزل بين المنافذ الجانبية، وهو يعتبر معامل هام في التصميم وفي تحديد فعالية التجميع. ويتمثل بقيم المعاملات S_{ij} :



الشكل 1: معامل العزل بين المنافذ الطرفية.

وما يهمنا قيم هذه المعاملات عند تردد العمل (المركزي)، وهي موضحة بالجدول 3.

جدول (3): قيم معامل العزل بين المنافذ الطرفية عند التردد المركزي.

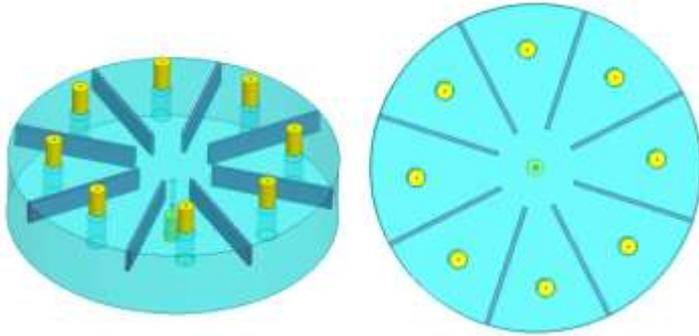
المعامل	القيمة
S_{23}	-8.0661 dB
S_{34}	-8.0585 dB
S_{45}	-8.0485 dB
S_{56}	-8.0512 dB
S_{67}	-8.0404 dB
S_{78}	-8.0449 dB
S_{89}	-8.0486 dB
S_{92}	-8.0516 dB

نلاحظ أن قيم معاملات العزل تحتاج للتحسين حتى نقلل من الاستطاعة الضائعة،

لذلك قمنا بإجراء بعض التعديلات على البنية السابقة وهذا ما سنوضحه في الفقرة التالية.

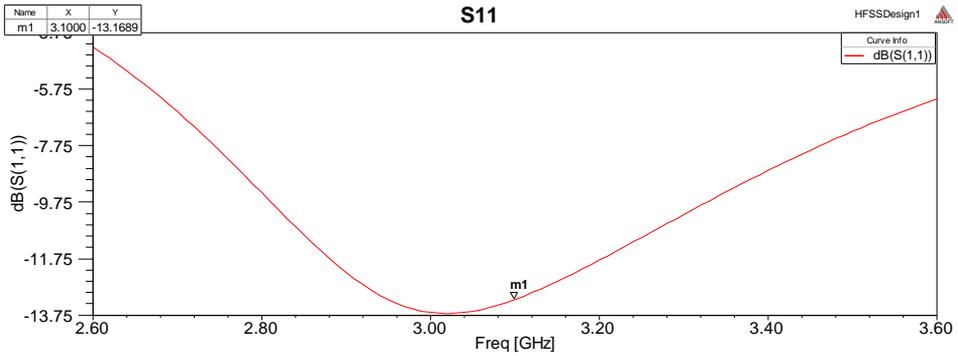
• التصميم الثاني:

أضفنا حواجز معدنية بين المنافذ الطرفية وأجرينا توليف على متحولاتها الثلاثة الطول والعرض والسماكة، للوصول إلى النتيجة الأفضل. فكان شكل البنية النهائي:



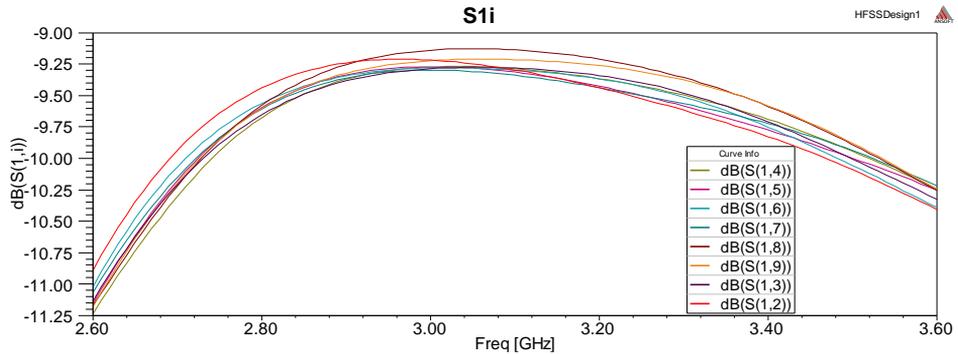
الشكل 2: بنية المجمع بعد إدخال الحواجز المعدنية بين منافذه الجانبية.

ثم عرضنا نتائج المحاكاة، فلاحظنا تحسن بقيمة معامل الانعكاس على المنفذ المركزي، بحيث وصلت قيمته عند التردد المركزي إلى -13.1689 dB .



الشكل 3: معامل الانعكاس على المنفذ المركزي.

أما معاملات العبور أو تقسيم الاستطاعة فكانت قيمها أقرب للقيمة المتوقعة في معظمها عند التردد المركزي، ويمكن توضيح ذلك بالشكل 16:



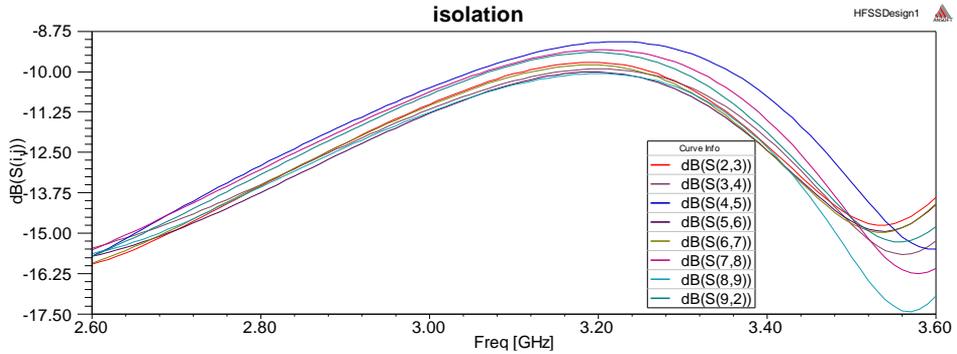
الشكل 4: مقدار الاستطاعة من المنافذ الطرفية إلى المنفذ المركزي.

ولتوضيح النتيجة أكثر جمعنا القيم ضمن جدول:

جدول (4): قيم الاستطاعة من المنافذ الطرفية إلى المنفذ المركزي عند التردد المركزي.

المعامل	القيمة
S_{12}	-9.2969 dB
S_{13}	-9.282 dB
S_{14}	-9.2878 dB
S_{15}	-9.3148 dB
S_{16}	-9.2986 dB
S_{17}	-9.3391 dB
S_{18}	-9.1373 dB
S_{19}	-9.2151 dB

كما أن معامل العزل بين المنافذ الطرفية تحسن بمقدار 2 dB تقريباً، بحيث كانت قيمته عند التردد المركزي -10 dB تقريباً عند معظم القيم.



الشكل 5: معامل العزل بين المنافذ الطرفية.

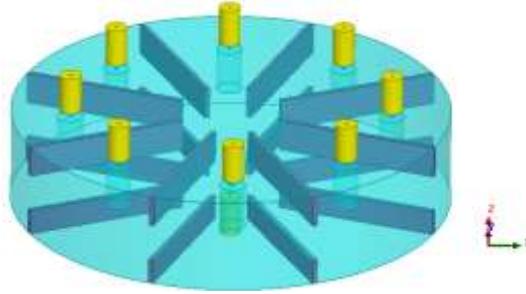
جدول (5): قيم معامل العزل بين المنافذ الطرفية عند التردد المركزي.

المعامل	القيمة
S_{23}	-10.0715 dB
S_{34}	-10.2936 dB
S_{45}	-9.5873 dB
S_{56}	-10.3762 dB
S_{67}	-10.1335 dB
S_{78}	-9.7368 dB
S_{89}	-10.4157 dB
S_{92}	-9.7823 dB

إذاً إضافة الحواجز المعدنية انعكس إيجابياً على نتائج التصميم، لكن هل يمكن تحسين النتائج أكثر في حال أضفنا حواجز على السطحين العلوي والسفلي؟ هذا ما سنجاوب عليه في الفقرة التالية.

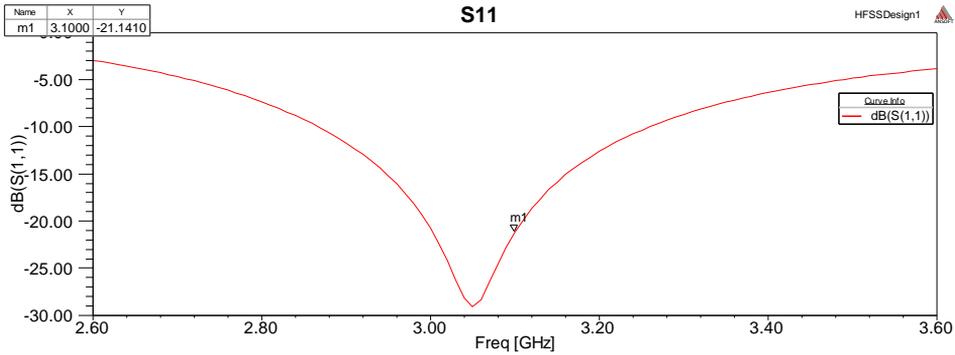
• التصميم الثالث:

لاحظنا إمكانية تحسين قيم العزل أكثر، من خلال إضافة حواجز معدنية على السطحين العلوي والسفلي بشكل متناظر، بمعنى إضافة الحاجز المعدني على السطح السفلي بنفس إحداثيات موقعه على السطح العلوي لكن باختلاف الارتفاع فقط. هذا موضح بالشكل التالي:



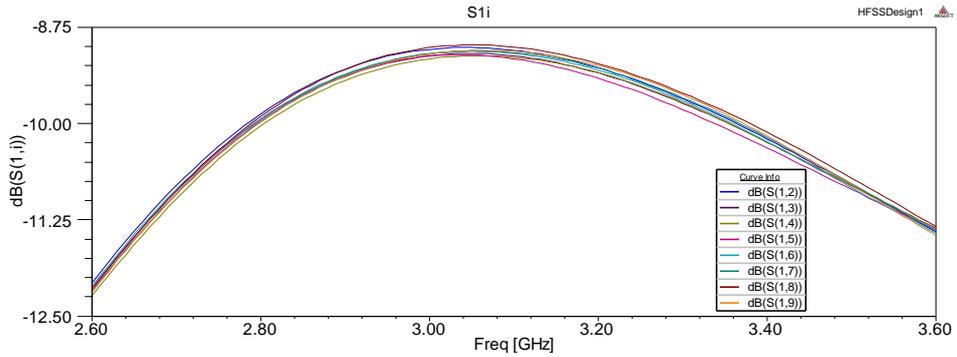
الشكل 6: بنية المجمع بعد إدخال الحواجز المعدنية على السطح العلوي والسفلي للحجرة.

فحصلنا على قيم أفضل للعزل والانعكاس والنقل، وسنعرض هذه القيم تباعاً. لنبدأ أولاً بمعامل الانعكاس على المنفذ المركزي من خلال الشكل التالي نجد أنه تحسن بشكل كبير بحيث وصلت قيمته عند التردد المركزي إلى -21.141 dB .



الشكل 7: معامل الانعكاس على المنفذ المركزي.

وتقسيم الاستطاعة كان متساوي بشكل كبير بين المنافذ، وهذا ما تعرضه معاملات النقل من المنافذ الجانبية إلى المنفذ المركزي:



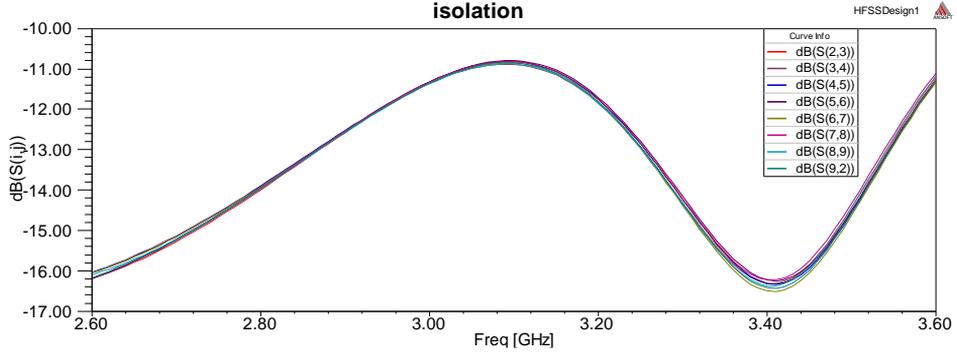
الشكل 17: مقدار الاستطاعة من المنافذ الطرفية إلى المنفذ المركزي.

ويوضح الجدول 6 قيم تقسيم الاستطاعة عند التردد المركزي:

جدول (6): قيم الاستطاعة من المنافذ الطرفية إلى المنفذ المركزي عند التردد المركزي.

المعامل	القيمة
S_{12}	-9.0518 dB
S_{13}	-9.1244 dB
S_{14}	-9.1419 dB
S_{15}	-9.1612 dB
S_{16}	-9.0946 dB
S_{17}	-9.0788 dB
S_{18}	-9.0102 dB
S_{19}	-9.0671 dB

أما قيم العزل بين المنافذ الجانبية فكانت جيدة جداً، وهي موضحة بالشكل 21 والجدول 7:



الشكل 18: معامل العزل بين المنافذ الطرفية.

جدول (7): قيم معامل العزل بين المنافذ الطرفية عند التردد المركزي.

المعامل	القيمة
S_{23}	-10.8254 dB
S_{34}	-10.8902 dB
S_{45}	-10.8205 dB
S_{56}	-10.7984 dB
S_{67}	-10.8607 dB
S_{78}	-10.8188 dB
S_{89}	-10.8820 dB
S_{92}	-10.8495 dB

5- الاستنتاجات

قدمت هذه المقالة دراسة وتحليل وتصميم لمجمع/ مقسم استطاعة قطري يعمل بتقنية الحجرة الطنينية عند التردد المركزي 3.1 GHz. ويمكن تلخيص نتائج البحث بالنقاط التالية:

1- تم في البداية اعتماد التصميم الأولي للحجرة مع المنافذ والأسطوانات المعدنية الداخلية، وحصلنا على نتائج مقبولة للانعكاس على المنفذ المركزي بحيث كان أقل من 10 dB لعرض نطاق ترددي 50%، والعزل بين المنافذ الطرفية أقل من 8 dB على كامل المجال الترددي، ومعاملات نقل (تقسيم) الاستطاعة يمكن اعتبارها قريبة من القيمة المتوقعة.

2- ثم قمنا بإضافة حواجز معدنية بين المنافذ الطرفية لتحسين العزل بين هذه المنافذ على السطح العلوي، فلاحظنا تحسن بجميع معاملات التصميم (العزل والانعكاس ونقل الاستطاعة). بحيث معامل الانعكاس على المنفذ المركزي أقل من 11.7 dB لعرض نطاق ترددي 50%، والعزل بين المنافذ الطرفية أقل من 10 dB على كامل المجال الترددي، ومعاملات نقل (تقسيم) الاستطاعة يمكن أقرب للقيمة المتوقعة.

3- هذا ما دفعنا لتطوير هذا التصميم من خلال إضافة حواجز معدنية على السطحين العلوي والسفلي وبشكل متناظر. فكان معامل الانعكاس على المنفذ المركزي أقل من 15 dB لعرض نطاق ترددي 50%، والعزل بين المنافذ الطرفية أقل من 10.8 dB على كامل المجال الترددي، ومعاملات نقل (تقسيم) الاستطاعة أقرب للقيمة المتوقعة.

6- التوصيات والأفاق المستقبلية

يمكن التطوير على العمل من خلال استخدام تجويف مستطيل عوضاً عن الأسطوانية ومناقشة النمط TE_{010} ، فهي مرغوبة في التطبيقات الرادارية. كما يمكن البحث عن طرق مختلفة لإثارة الحجرة الطنينية باستخدام مجسات أكثر تعقيداً وذلك لتأمين مجال ترددي أوسع. ويمكن دراسة إمكانية تعديل عدد المنافذ وتأثيرها على الأداء.

References المراجع 6-

[1]	J. Brown, 15 April 2015 "What's The Difference Between TWTAs and SSPAs"
[2]	José R. Montejo-Garai, Jorge A. Ruiz-Cruz and Jesús M. Rebollar, 2019 "Design of Radial Power Combiners Based on TE ₀₁ Circular Waveguide Mode".
[3]	Hao Shao, Kaijun Song, Liyuan Xue, Letian Guo, Song Guo, Yedi Zhou, Yong Fan, 2018 "Compact Four-Way Radial-Cavity-Based Power Divider/Combiner with High Power and High Isolation".
[4]	I. KLAPPEVIK, 2017 "Analysis, Construction And Evaluation Of a Radial Power Divider/ Combiner".
[5]	K. J. Russell, 5 May 1979 "Microwave Power Combining Techniques".
[6]	A. E. a. S.-W. Lee, 1 Jan 2006 "A Simplified Design Approach For Radial Power Combiner".
[7]	H. M. & H. Mizuna, 9 September 1986 "Design of Microwave Power Combiner With Circular TM _{0m0} Mode Cavity".
[8]	F. Kh.Gharehkand, 2014 "Design of a 16 Way Radial Microwave Power Divider/Combiner With Rectangular Waveguide Output and Coaxial Input".
[9]	A. A. Sarhan, 2014 "Broadband Radial Waveguide Power Combiner with Improved Isolation among Adjacent Output Ports".
[10]	D. M.Pozar, 2005 <u>Microwave Engineering</u> . 3rd edition. New York: Wiley. 752P.
[11]	L. Frenzel, 19 Oct 2012 "What's The Difference Between GaAs And GaN RF Power Amplifier".
[12]	R. A. York, 8 Aug 2001 "Some Considerations For Optimal Efficiency And Low Noise In Large Power Combiners".
[13]	H. Matsumura and H. Mizuno, 1987 "Design of Microwave Power Combiner with Circular TM _{0m0} Mode Cavity," <u>Electronics and Communications in Japan</u> , Part 2, vol. 70, no. 9.

- | | |
|------|---|
| [14] | SONG, Kaijun; FAN, Yong; ZHOU, Xiaobing, 2009 Broadband radial waveguide power amplifier using a spatial power combining technique. IET microwaves, antennas & propagation. |
|------|---|

بناء خوارزمية خاصة بالطباعة الهجينة وبرمجتها باستخدام مصمم التطبيقات في بيئة ماتلاب

م. خليل عباس*

د.م المهندس مكي**

الملخص

ظهرت بسبب الحاجة الإنسانية للابتكار أفكار يمكن وصفها بالطفرات العلمية والتي كانت السبب في اختراع أدوات جديدة في العديد من المجالات من بينها النمذجة والتصنيع وأبرز هذه الأدوات في الوقت الحاضر الطباعة ثلاثية الأبعاد والتي تتميز بقدرتها في بناء نماذج معقدة الشكل بخطوات بسيطة وسرعان ما أصبحت هذه التقنية ثورة في تطوير المنتجات وميداناً هاماً للبحث والتطوير لذا تم الاتجاه في هذا البحث نحو إيجاد مفهوم جديد في الطباعة ثلاثية الأبعاد والذي يتمثل بابتكار بنية جديدة يمكن تسميتها بالهجينة لاحتواء بنية النموذج على أكثر من مادة ولهذا الغرض تم تعريف خوارزمية جديدة دعوناها بخوارزمية الطباعة الهجينة مبنية على صيغة رياضية محددة لتوزيع المواد على طبقات النموذج وقد تم بناء البرنامج الذي يعتمد خوارزمية الطباعة الهجينة باستخدام مصمم التطبيقات في بيئة الماتلاب وتم استخدام هذا البرنامج في تخريج ملفات طباعة جديدة للنماذج الهجينة أي ملفات G-code ليتم بعدها التحقق من هذه الملفات باستخدام برامج التقطيع الشائعة.

الكلمات المفتاحية:

الطباعة ثلاثية الأبعاد - الطباعة الهجينة - مصمم التطبيقات - بيئة ماتلاب - لغة ملفات .G-Code

* طالب ماجستير في قسم هـ التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث.

** مدرس مساعد في قسم هـ التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث.

Build an Algorithm for Hybrid Printing and Programing it Using App Designer in MATLAB environment

Abstract:

There is ideas that can be described as scientific breakthroughs have emerged because of the human need for innovation, which has been the reason for the invention of new tools in many fields such as modeling and manufacturing. One of the most notably modeling and manufacturing tools at present is 3D printing, which is distinguished by its ability to build complex-shaped models in simple steps. This technology rapidly has become a revolution in product development and an important field for research. This paper, defines a new concept in the 3D printing field which represented by inventing a new structure can be called hybrid because it has more than one material in the model structure therefore a new algorithm was defined. Hybrid printing algorithm based on a mathematical formula to switch the materials through the model layers achieved using a software built in MATLAB environment using App designer, this program used to post new printing files or g-code files for hybrid models then the resulted G-code verified with common slicers.

Key words:

3D printing- Hybrid Printing – MATLAB environment – App designer
- G Code language.

1- المقدمة

تعد الطباعة ثلاثية الأبعاد، ثورة في تطوير المنتجات وتصنيعها لما لها من تطبيقات واسعة ويتم التصنيع بالطباعة ثلاثية الأبعاد من خلال إضافة المادة وتتم من خلال تقطيع النموذج إلى طبقات ليتم بناء كل طبقة تلو الأخرى ليكتمل كامل النموذج [1].

يمكن استخدام القطع المصنعة بالطابعات مفتوحة المصدر لإنتاج قطع ميكانيكية وظيفية والتي تتطلب متانة على الشد مثلها كمثل باقي القطع التجارية ضمن حدود خواصها الميكانيكية [2].

ووصلت تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد لصناعة أطراف اصطناعية للأطفال (سلبية) وتبين أنها ذات مزايا جيدة وبدا أن الأطفال يرفضون الأطراف الأخرى لأسباب منها: قلة الفاعلية، أن تكون غير مريحة، ثقيلة الوزن وغير جذابة وتم اقتراح الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام تقنية الـ FDM لصناعة الأطراف، وتبين أن لها أفضلية من حيث انخفاض التكلفة، خفة الوزن، ديمومتها، وملائمتها لاحتياجات ولتغيرات النمو للطفل [3].

يعد التقدم الحاصل في مجال هندسة النسيج الحيوية مرضاه بتقنيات علاجية لتقليل الألم، وإعادة توليد النسيج والتي تضمن استعادة للبنية والوظيفة وبالتالي استبدال الأعضاء المعطوبة بأعضاء اصطناعية تتمتع بالوظائف الكاملة [4].

إن من أكثر الأمراض التي تشكل تهديداً على صحة الكائن الحي هي هشاشة العظام والتهاب المفاصل وضعف العمود الفقري، ويعد الهيكل العظمي بيتاً للعديد من السرطانات كسرطان الثدي والبروستات إذ يحصل امتزاز للخلايا السرطانية إلى العظام وتعد تقنيات RP بتطوير كل من النسيج والأعضاء الاصطناعية وأيضاً في محاكاة البنى المعقدة للمواد الحيوية [4].

ويحظى البثق متعدد المواد في الطباعة ثلاثية الأبعاد بالاهتمام نظراً لعدد الاحتمالات التي يوفرها [5]، خصوصاً عند استخدامه لتقليل أو إلغاء عمليات التجميع.

وقد أنشأت طابعات ذات رأسين لطباعة النموذج بألوان مختلفة وتقليل عمليات التجميع ثم زاد تعداد رؤوس الطابعة حتى وصلت إلى أربع رؤوس أو أكثر بهدف تسريع عملية الإنتاج ثم برزت الحاجة إلى استخدام بنية داعمة من مادة أخرى غير المادة الأصلية من أجل دعم بنية النموذج وتسهيل إزالة المادة الداعمة بعد الانتهاء من طباعة المنتج ثم طرحت هذه الفكرة بشكل غير مؤطر لطباعة منتجات تحوي على مواد متعددة بهدف الاستفادة من تكامل خواص موادها [5].

وبعدها ظهرت تقنية الطباعة رباعية الأبعاد والتي تعتمد بشكل أساسي على الطباعة ثلاثية الأبعاد ويضاف لها الزمن كبعد رابع لابتكار منتجات ذكية تستجيب لتأثيرات خارجية ميكانيكية أو حرارية أو كيميائية والتي يمكن أن تكون من مادة واحدة ذكية أو أكثر [6].

نستنتج مما سبق أن الطباعة ثلاثية الأبعاد هي تقنية حديثة العهد نسبياً وقد يختلف العلماء والباحثين في تحديد الشكل الأمثل لهذه التقنية لأنها قيد التطور المستمر ولكن ما يُتفق عليه هو أنها تقانة المستقبل نظراً لانخفاض تعقيدها وكلفتها بشكل عام، ولنا هنا أن نعيد طرح مشكلة هذا البحث لكونها نواة جديدة في سبيل تقدم هذه التقنية إذ إنها تشكلت بتكامل مجموعة من المفاهيم الخاصة بهذه التقنية حتى لو أن عدد من الأبحاث السابقة قد اقتربت من هذه المشكلة البحثية إلا أنه لم يتم تأطير المشكلة العلمية بناءً على نموذج رياضي واضح يشكل الأساس ومن هنا ينشأ التعريف بالطباعة الهجينة ويجعل من الممكن وضع خوارزمية واضحة لها.

2- هدف البحث ومبرراته

تطوير خوارزمية جديدة بالكامل تتيح طباعة الطبقات باستخدام أكثر من مادة وذلك بغية تعريف الطباعة الهجينة مما يضيف طريقة جديدة كلياً في الطباعة ثلاثية الأبعاد.

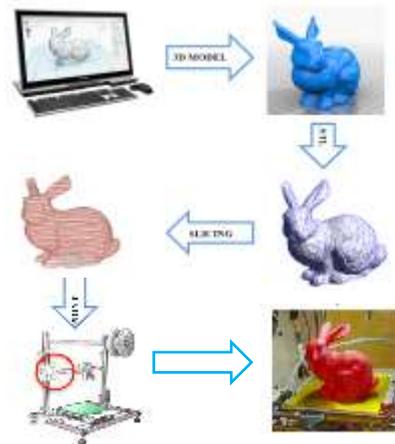
3- مواد وطرق البحث

- برنامج Matlab 2020b ويستخدم كبيئة للبرمجة.

- ملف CAD بصيغة STL ويستخدم كملف للتقطيع والاختبار.
 - برنامج تقطيع Replicator G 0040 لتوليد ملفات الـ G-CODE.
 - برنامج ideaMaker 3.3.0 لاستعراض ملفات الطباعة بعد عملية التهجين.
- 4- مراحل الطباعة ثلاثية الأبعاد وتعريف بالطباعة الهجينة

توصف عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد بالتسلسل التالي [1]:

- 1- الحصول على ملف CAD للقطع سواء كانت بنمذجة القطع باستخدام برامج الرسم، أو من خلال معدات الهندسة العكسية.



شكل 1 تسلسل عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد

- 2- تحويل ملف CAD إلى ملف ذو لاحقة STL والذي يسمح بتكوين قاعدة أساسية لإجراء الحسابات من أجل تقطيع الشكل ثلاثي الأبعاد إلى طبقات.
- 3- معالجة ملف STL ومن ثم ترحيله إلى الآلة وضبط بارامترات البناء.
- 4- عملية البناء المؤتمتة والتأكد من عدم وجود أخطاء أثناء العملية.
- 5- إزالة القطع من الآلة، وتنظيفها من عناصر الدعم وإجراء عملية المعالجة اللاحقة.
- 6- إنهاء القطع لتصبح جاهزة للتطبيق.

نقصد بالطباعة الهجينة بأنها طباعة ثلاثية الأبعاد لبني متعددة المواد كل مادة تختلف عن الأخرى من حيث المواصفات والنوع بحيث تترتب هذه المواد وفق ترتيب جديد غير معرّف بالبنية الاصلية وبتنوع عنها البنية الهجينة.

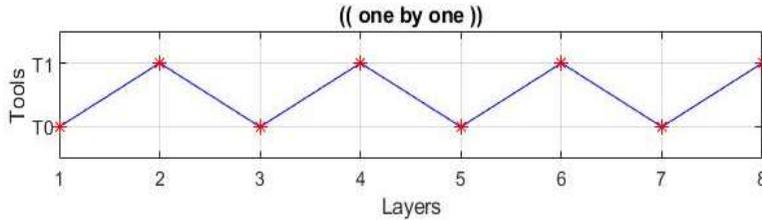


شكل 2 بنية افتراضية هجينة ثنائية المواد

وتتم هذه العملية من خلال تبديل الأدوات أثناء عملية الطباعة ليتغير بذلك نوع المادة المستخدمة في بناء الطبقة بالاعتماد على صيغة رياضية تصف عملية التبديل بين الأدوات.

5- الصيغة الرياضية وتصميم النموذج الهجين

يقصد بتصميم البنية الهجينة هو توزيع الأدوات على طبقات النموذج على شكل نسق متتالي متكرر، حيث كل أداة تستخدم لبناء طبقة أو عدد من الطبقات تتبادل فيما بينها بشكل متتالي حتى الوصول إلى الطبقة الأخيرة في النموذج، وبناءً على ذلك يمكن أن نجد عدداً من التصاميم لكل بنية منها ما يحقق تساويًا في نسبة المواد ومنها ما لا يحقق ذلك ومنه نجد أن العلاقة الرياضية تكون متغيرة الشكل وذلك حسب تصميم البنية المعتمد ولكن تبقى السمة المميزة لهذا النوع من البنى هي التكرارية.



شكل 3 مخطط تبديل الأدوات وفق التصميم الهجين

فبفرض لدينا مجموعة كبيرة يرمز لها بـ T وعدد عناصرها يساوي عدد طبقات النموذج L فإنها ستمتلك عدداً من المجموعات الجزئية $segments$ كل مجموعة جزئية S_{unit} هي شعاع له طول موحد ومحدد وهو S والتي تتكرر على طول المجموعة T بمقدار k .

$$T_{segments} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{(k,1)} \times S'_{unit} \quad (1)$$

بحيث لكل S_{unit} مجالين جزئيين S_{unit1} ، S_{unit2} طول كل منهما m ، n على الترتيب أي أن كل S_{unit} هي عبارة عن مجموعتين متتاليتين طولهما يعتمد على النسق المتبع وقيم عناصرهما تساوي قيمة الأداة حسب النسق.

$$S_{unit1(m,1)} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{(m,1)} * TA_{(1,1)} \quad (2)$$

$$S_{unit2(n,1)} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{(n,1)} * TB_{(1,1)} \quad (3)$$

TA : هو رقم أداة البدء .

TB : هو رقم الأداة التالية.

$$S_{unit(m+n,1)} = \begin{bmatrix} S_{unit1} \\ S_{unit2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

يمكن القول عن S_{unit} أنه شعاع واحدة النسق الهجين.

بفرض أن التوزيع 1:2 بالتالي فإن طول S النسق يساوي 3 وبفرض قيمة الأداة للمادة الأولى هي 0 وللثانية هي 1 فسيكون شعاع واحدة النسق الهجين بعد تحويله إلى مصفوفة على اعتبار أن شعاع واحدة النسق لكل من الأدوات ثابت بالشكل التالي:

$$S_{unit(3,1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

بفرض أن T مصفوفة تعبر عن نموذج عدد طبقاته 6 نجد عدد المجالات الجزئية الممكنة هي 2 مجالات جزئية ويتطبيق المعادلة 1 نجد الحل بالشكل التالي:

$$T_{segments} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}_{(2,3)}$$

المصفوفة السابقة لا تربط بشكل مباشر رقم الأداة مع رقم الطبقة الهدف وإنما تبدو بالشكل التالي:

$$T_{segments} = \begin{bmatrix} l_1 & \dots & l_s \\ l_{s+1} & \dots & l_{(2*s)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{(k-1)*s+1} & \dots & l_{k*s} \end{bmatrix}_{(k,s)} \quad (5)$$

ولتحويل المصفوفة السابقة ذات الأبعاد (k,s) إلى مصفوفة سطرية من الشكل (1,L) يرمز كل موقع منها إلى رقم الطبقة وقيمة هذا الموقع تساوي إلى رقم الأداة الواجب استخدامها في هذه الطبقة يمكن إيجاد الصيغة الرياضية العامة لتوزيع الأداة الأولى على أساس رقم الطبقة بشكل مصفوفة سطرية وفق النسق الهجين من العلاقة:

$$f_{t1}(u, v_1) = r + m * (u - 1) + n * (u - 1) + v_1 \quad \forall u \in \{1, k\} \& v_1 \in \{1, n\} \quad (6)$$

$$T_{c(1,f_{t1})} = T1 \quad (7)$$

بحيث أن T1 هو رقم أداة البدء

و f_{t1} دالة تحديد مواقع الأداة الأولى في المصفوفة السطرية للنموذج الهجين.

في حين أن u رقم المجموعة الجزئية من مجموعات النموذج الهجين

و v_1 ترتيب الأداة ضمن المجموعة الجزئية (رقم العنصر في النسق الهجين للأداة الأولى)

و r إزاحة من بعدها يبدأ توزيع الأدوات
والصيغة الرياضية العامة لتوزيع الأداة الثانية على أساس رقم الطبقة بشكل
مصنوفة سطرية وفق النسق الهجين من العلاقة:

$$f_{t2}(u, v_2) = r + m * u + n * (u - 1) + v_2 \quad \forall u \in \{1, k\} \& v_2 \in \{1, m\} \quad (8)$$

$$T_{c(1, f_{t2})} = T2 \quad (9)$$

بحيث أن $T2$ هو رقم الأداة الثانية.

و f_{t2} دالة تحديد مواقع الأداة الثانية في المصفوفة السطرية للنموذج الهجين
و u رقم المجموعة الجزئية من مجموعات النموذج الهجين
و v_2 ترتيب الأداة ضمن المجموعة الجزئية (رقم العنصر في النسق الهجين للأداة
الثانية)

$$k = \frac{L}{S}, S = m + n. \quad (10)$$

m عدد طبقات النسق الأول.

n عدد طبقات النسق الثاني.

L العدد الكلي لطبقات النموذج.

و بتطبيق المعادلات السابقة على المثال المذكور آنفاً نجد:

$$T = [0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 1]$$

6- خوارزمية الطباعة الهجينة وتصميم التطبيق

ونقصد بها الخوارزمية المستخدمة في توليد بنية النموذج وهي ترتيب لسلسلة من
العمليات المنطقية والحسابية وسلسلة من الإجراءات التي يتم العمل وفقها بغية الوصول
لنموذج الهجين انطلاقاً من نموذج أحادي المادة.

يتم توليد مسارات الطبقات المتباينة المواد وفقاً لبرنامج الخوارزمية الذي يعتمد على تقطيع ملف تشغيل الآلة الـ G-Code الأصلي مع الاحتفاظ ببارامترات الطباعة المستخدمة في طباعة النموذج الأصلي من حيث عدد الطبقات المستخدمة، اتجاه طباعة الألياف الداخلية (مسار الملء للبنية الداخلية)، عرض الجدران الخارجية، قطر رأس البثق المستخدم ومراعاة معدلات التغذية، درجات الحرارة وتراجع فيلم المادة عند الانتقالات.

مما سبق نجد أنه من المتطلبات الأساسية لعمل خوارزمية الطباعة الهجينة هي القدرة على التكيف مع أي نموذج مطلوب تهجينه وأيضاً يجب أن تراعى النقاط التالية:

- 1- القدرة على قراءة ملفات الـ G-Code الخاصة بالطباعة ثلاثية الأبعاد التي تعمل بتقنية النمذجة بترسيب المصهور الـ FDM وفترة هذه الملفات.
- 2- القدرة على إجراء الحسابات لتراجع فيلم المادة عند عملية تبديل الأدوات والانتقال من طبقة لأخرى.
- 3- القدرة على إعادة تخريج البيانات السابقة كملف G-Code جديد.

وبهذا يجب كتابة برنامج [7] يستطيع القيام بمجموعة من المهام التي من ضمنها استخدام خوارزمية الطباعة الهجينة بالدرجة الأولى بالإضافة إلى مجموعة من الأوامر والمهام التي تقيم صحة أداء هذه العملية ومنها:

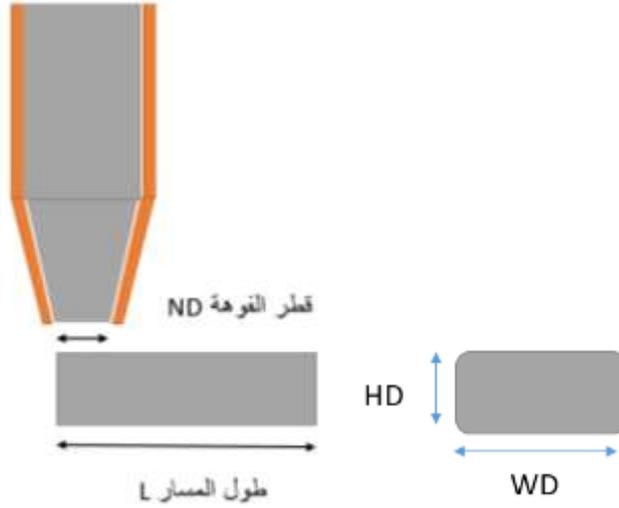
- 1- إمكانية إظهار الكود ومسارات الطباعة للنموذج الأصلي.
- 2- إمكانية حساب تقدم الفيلم وتراجع الفيلم لكل من النموذج الأصلي والهجين.
- 3- إمكانية استخدام ملفات نصية خاصة تتضمن أوامر تهيئة وإنهاء عملية الطباعة مع القدرة على تعديل صيغة تبديل الأداة لاستخدامها عند اختلاف نوع الطابعة.
- 4- إمكانية التعديل على معدلات التغذية تبعاً للأداة المستخدمة.

باستخدام بيئة الماتلاب تمت كتابة دالة `hyb_algo` بحيث تكون متغيرات دخل الدالة هي رقم أداة البدء، رقم الأداة الثانية، عدد الطبقات، عدد طبقات المادة الأولى من النسق

الهجين وعدد طبقات المادة الثانية من النسق الهجين أما بالنسبة للخروج فهو عبارة عن مصفوفة تبديل الأدوات على طبقات النموذج ويمكن كتابة الكود بالشكل التالي:

```
function [Toollist]=
hyb_algo(starttool,nexttool,nol,div1,div2)
    %% hybrid based DISTRIPUTION
    l=nol;
    % get number of layers
    m=div1;n=div2;
    % get disruption of tool 2 and tool 1
    sttool=starttool;
    % set start tool
    if sttool==0
        c=zeros(1,l);
        % create zeros array
        ndtool=1;
        % set second tool
    elseif sttool==1
        c=ones(1,l);
        % create ones array
        ndtool=nexttool;
        % set second tool
    else
        disp('not recognized tool')
        return;
    end
    %% calculation
    s=m+n;
    % vector length item
    k=round(l/s);
    % num of periods
    for ii=1:k
        a=m+(s*(ii-1));
        % series format
        for jj=a+1:a+n
            c(jj)=ndtool;
            % assign tools
        end
    end
    %% trim results
    c=c(1:l);
    Toollist=c;
end
```

ولحساب مقدار التقدم E لفيلم المادة على اعتبار أن التقانة المستخدمة هي تقانة الـ FDM تم استنتاج معادلاته من الشكل على اعتبار أن حجم المادة قبل البثق يساوي حجمها بعد البثق من أجل نفس معدل التدفق:



شكل 4 مقطع فيلم المادة المرسب

$$dE = \frac{4 \times H_D \times N_D \times FL_D \times L}{\pi \times D_F^2} \quad (13)$$

D_F قطر فيلم المادة المستخدم

FL_D نسبة معدل التدفق

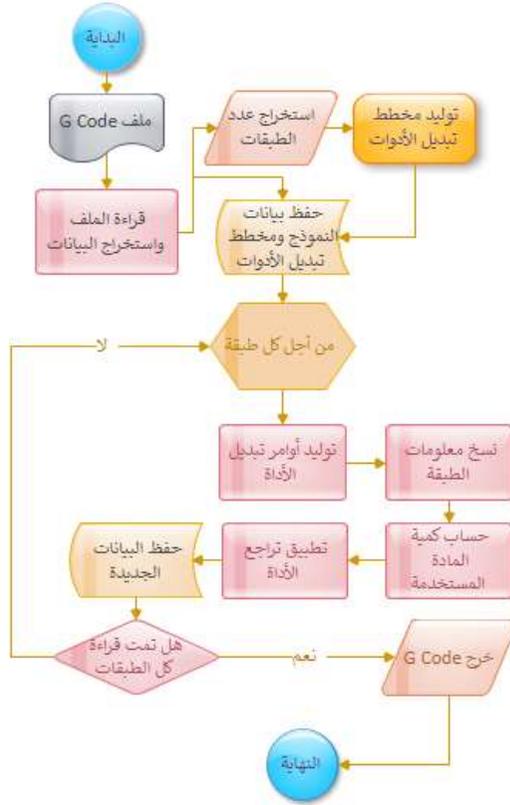
H_D ارتفاع الطبقة

W_D عرض المسار المرسب

N_D قطر فوهة البثق

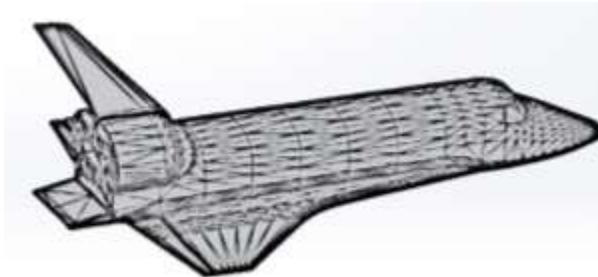
تستخدم المعادلة 13 من أجل كل جزء من المسار لذلك تكون قيمة E هي قيمة تراكمية متزايدة يتخللها تراجع وعودة إلى نفس القيمة أثناء الانتقالات غير الفعالة

ومنه يمكن وصف خطوات خوارزمية الطباعة الهجينة بالمخطط المبين بالشكل 4:



شكل 5 خوارزمية الطباعة الهجينة

وقد تمت كتابة برنامج الطباعة الهجينة باستخدام مصمم التطبيقات في بيئة ماتلاب R2020b وتم اختيار نموذج لاختبار عمل الخوارزمية والتأكد من عملها برمجياً:



شكل 6 النموذج المراد تهجينه

في حين تم توليد ملف الـ G-Code للنموذج قبل عملية التجهين باستخدام برنامج Replicator G 0040 ليتم استخدام ملف الـ G-Code كملف مصدر لتوليد نموذج هجين بعد قراءته على اعتبار الطابعة المستخدمة مفتوحة المصدر لما لها من ميزات وقدرة في التحكم بملف التشغيل الـ G-Code [8-9].

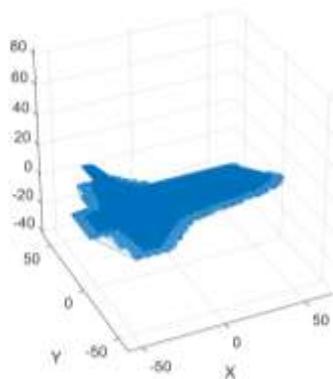
```

** This GCode was generated by ReplicatorG 0040 **
** using Smoothie (3.0) **
** for a Dual-Extruder (1) Replicator **
** on 20230928 20:18:48 (+0800) **
**** start gcode for The Replicator (dup head) ****
M103 (enable BTT)
M73 P0 (restart build progress)
G21 (set units to mm)
G20 (set positioning to absolute)
M300 S 118 T0 (set M3P temperature)
M304 S200 T0 (set extruder temperature) (temp updated by procdirect)
**** target heating ****
G160 X Y Z (save XY axis coordinates)
G161 Z F (save Z axis minimum)
G162 Z (set Z to 0)
G163 S (save S to 0)
G164 Z F (save Z axis minimum)
M102 X Y Z A B (physical stored home offsets for XYZAB axis)
**** end homing ****
G1 A 110 E 0.74 Z 100 F 3000 S (move to starting position)
G150 X20 Y20 Z20 A20 B20 (lower stepper shafts when feeding)
M8 T0 (set for hotend, and 1400 for main temperature)
G150 M127 V127 Z48 A127 B127 (Set Stepper motor 'off' to defaults)
M300 R1.0 T0
G0 A 110 E 0.74 (Position Heaters)
G1 Z 0.5 (Parker+brag)
M300 R0.0 (Set Extruder Speed)
M301 (Start Extruder)
G4 P0.000 (Change filament)
**** end of M61 gcode ****
****=====skidcharge gcode "Normal"****
****start= 13.03.14 version**
    
```

شكل 7 برنامج الطباعة الهجينة (واجهة القراءة)

7- النتائج

بعد أن تم تحميل ملف الـ G-CODE في البرنامج وقراءته أصبح من الممكن إظهار مسارات الطباعة الأصلية من خلال البرنامج وكما هو مبين في الشكل 7 حيث يظهر مسارات الملء بالإضافة إلى مسار قاعدة النموذج أو ما يسمى الطوافة:



شكل 8 مسارات ملف الطباعة للبنية الأصلية

ليتم بعدها تنفيذ توليد النموذج الهجين برمجياً باستخدام البرنامج التي تمت برمجته وفق خوارزمية الطباعة الهجينة وبناءً على الصيغة الرياضية 3.4 وتظهر الأشكال 10,9 و 11 جداول للمقارنة بين كل طبقة من البنية الأصلية مع كل طبقة من البنية الهجينة.

شكل 9 برنامج الطباعة الهجينة (واجهة جداول المقارنة)

شكل 10 برنامج الطباعة الهجينة (جدول البنية أحادية المادة)

أوامر G	إحداثيات مسار الطباعة			سرعة الطباعة	تقدم فيلم المادة
G	X	Y	Z	F	E
1	-43.8600	-8.0900	4.6700	1800	NaN
1	NaN	NaN	NaN	1200	NaN
1	NaN	NaN	NaN	NaN	2.1281e+03
1	NaN	NaN	NaN	1800	NaN
NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1	-43.8600	-8.3800	4.6700	600	2.1281e+03
1	36.2300	-8.2800	4.6700	600	2.1320e+03
1	42.2300	-7.5800	4.6700	600	2.1323e+03
1	46.9800	-6.5600	4.6700	600	2.1326e+03
1	49.4200	-5.7900	4.6700	600	2.1327e+03
1	51.6900	-4.8100	4.6700	600	2.1328e+03
1	53.6300	-3.8200	4.6700	600	2.1329e+03
1	56.8800	-1.6900	4.6700	600	2.1331e+03

Z	4.671
Tool number	0

رقم الأداة المستخدمة

شكل 11 برنامج الطباعة الهجينة (جدول البنية الهجينة)

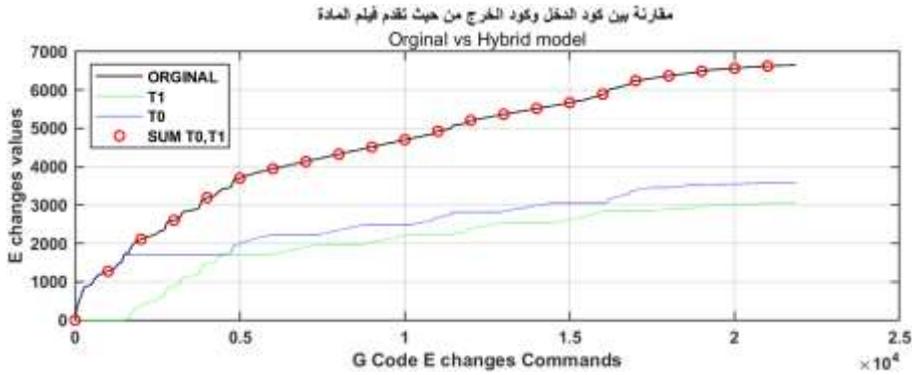
وبحساب مقدار تقدم فيلم المادة لكل من النموذج الأصلي ومقدار تقدم الفيلم لكل من الأداة الأولى T1 والثانية T0 يمكن التأكد من أن عملية القراءة والتجهين تمت بشكل صحيح.

تظهر المخططات البيانية في الشكلين 12 و 13 محورين أولهما المحور E changes values ويعبر عن مقدار تغير تقدم فيلم المادة فيما يظهر المحور G Code E changes أوامر تقدم فيلم المادة وتراجعه أثناء طباعة كامل النموذج.

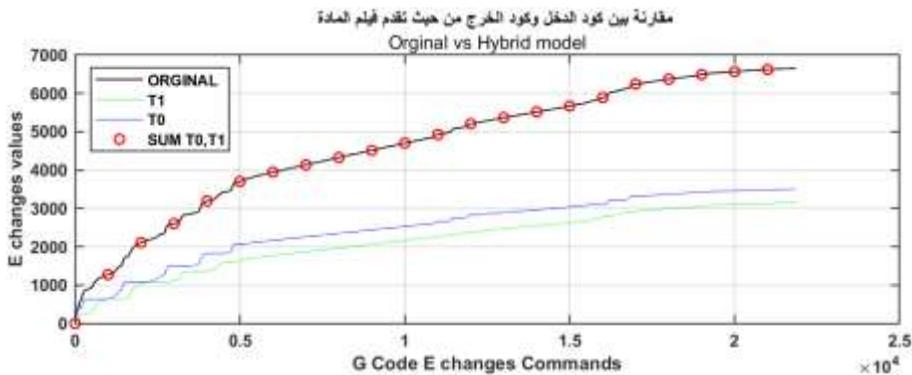
في الشكل 10 تم تنفيذ عملية التجهين بنسبة 5 طبقات للأداة الأولى مقابل 5 للأداة الثانية ويظهر تغير تقدم فيلم الأداة T0 باللون الأخضر فيما تغير تقدم فيلم الأداة T1 باللون الأحمر وبما أن حجم المادة المستخدم في النموذج الأصلي يجب أن يساوي حجم المادة المستخدم في النموذج الهجين وعلى اعتبار أن لكل من النموذجين الأصلي والهجين بارامترات الترسيب ذاتها بالتالي قيمة تقدم الفيلم ككل في كل من النموذجين يجب أن تكون

متساوية وبناءً على ذلك عند أية نقطة من نقاط المحور الأفقي يجب أن يكون مجموع تغير تقدم فيلم الأداة الأولى و تغير تقدم فيلم الأداة الثانية مساوياً لتغير تقدم فيلم الأداة الوحيدة المستخدمة في النموذج الأصلي وهو ما يظهره الشكل 12 حيث يظهر مجموع تغيرات تقدم فيلم الأداة الأولى في النموذج الهجين على شكل دوائر تنطبق بشكل تام على الخط الظاهر باللون الأسود وهو العائد إلى النموذج الأصلي.

فيما يظهر الشكل 13 تصميم لنموذج هجين آخر حيث تم تنفيذ عملية التهجين بنسبة طبقة واحدة للأداة الأولى مقابل طبقة واحدة للأداة الثانية بهدف التأكد من أن عملية التهجين يكمن تعميمها لأي تصميم يطلب.

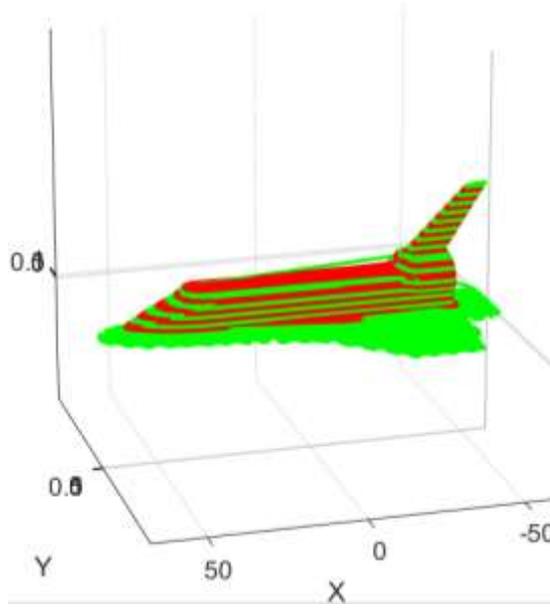


شكل 12 تقدم فيلم المادة الخاص بتصميم نموذج هجين 5 لـ 5



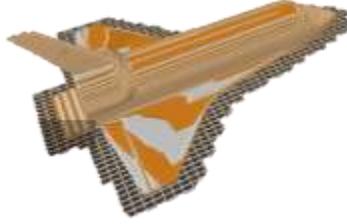
شكل 13 تقدم فيلم المادة الخاص بتصميم نموذج هجين 1 لـ 1

ومن هنا يمكن القول بأن عمل خوارزمية الطباعة الهجينة وفق النموذج الرياضي الموضح صحيح ودقيق وشامل لأي تصميم يراد تنفيذه من أجل نفس پارامترات ترسيب المسار للنموذج. يظهر الشكل 14 مسارات الطباعة الخاصة بالنموذج الهجين باستخدام الخوارزمية المطورة حيث تم اختيار لون مختلف لكل أداة وذلك ضمن بيئة التطبيق.

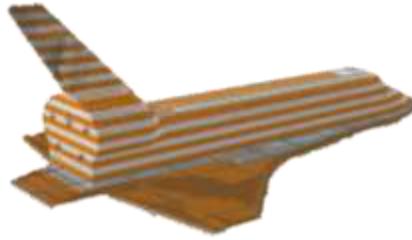


شكل 14 مسارات الطباعة الهجينة

إن جميع العمليات السابقة التي تمت برمجتها بدءاً من رسم مسارات النموذج الأحادي المادة مروراً بإظهار جداول المقارنة بين البنيتين الأحادي والهجين وتوليد مخططات تقدم فيلم المادة وانتهاءً بإظهار مسارات النموذج الهجين الخاص بالطباعة الهجينة، ما هي إلا عملية محاكاة داخل البرمجية المطورة الخاصة بالطباعة الهجينة كما أظهرت الأشكال 8,9,10,11,12,13,14 لذا من الضروري إتمام عمل المحاكاة باستخدام برامج تقطيع معروفة وشهيرة لذا تم تخريج ملف النموذج الهجين بصيغة G-code للحصول على البيئة الهجينة ولمعاينة هذه البنية تم استخدام برنامج ideaMaker وهو برنامج لتقطيع ملفات ال STL وتخريج ملفات G Code للطابعات ومعاينتها حيث يقوم البرنامج بالتمييز بين الأدوات المستخدمة من خلال الألوان المختلفة للأدوات كما هو ظاهر بالشكلين 15 و16.



شكل 15 نموذج الاختبار بعد استخدام الخوارزمية وفق تصميم (1 ل 1)



شكل 16 نموذج الاختبار بعد استخدام الخوارزمية وفق تصميم (5 ل 5)

نوع العملية	زمن المعالجة للنموذج 1-1 مقدراً بالثانية	زمن المعالجة للنموذج 5-5 مقدراً بالثانية
قراءة الملف الأصلي	19.82	19.82
توليد مخطط تبديل الأدوات	0.0007	0.0006
حلقة معالجة البيانات	20.105	20.043
تحويل البيانات الرقمية الخاصة بالنموذج الهجين إلى نص	52.505	46.693
الكتابة إلى الملف الهدف	0.0964	0.0198
مجموع الأزمنة	93.395	86.576

جدول 1 الأزمنة الخاصة بعمل برمجية الطباعة الهجينة



شكل 17 آلية توزيع أزمنة المعالجة

أما بالنسبة لأزمنة العمليات الخاصة بهذا البرنامج فقد تم الحصول عليها من خلال تعليمات خاصة ببرنامج الـ MATLAB وهي كما يبين الجدول 2 والشكل 17 وأعلى زمن هو لعملية التحويل إلى ملف G-CODE لأن خلال هذه العملية يتم التعامل مع جميع البيانات الرقمية وتحويلها لشكل نصي وفق تنسيق محدد خاص بالطباعة أي وفق تشفير خاص.

إن حجم برنامج الطباعة الهجينة يقارب 2860 سطر برمجي أي ما يقارب 45.1KB ويعالج جميع البيانات باستخدام نواة واحدة من أنوية المعالج. حجم ملفات الاختبار 1320 KB وعدد طبقات النموذج 150 طبقة ومع ملاحظة أن حجم الملف بعد التوليد للنموذج الهجين (1-1) 960 KB بينما حجمه للنموذج الهجين (5-5) وصل إلى 952 KB.

8- الاستنتاجات والتوصيات

أولاً: الاستنتاجات

- تظهر نتائج عمل الخوارزمية المطورة نجاحها في استخدام العلاقة الرياضية بغية تهجين النموذج أحادي المادة وتحويله إلى نموذج هجين مكون من مادتين مختلفتين وما يدعم ذلك هو مقارنة مقدار تقدم فيلم المادة بين كل من النموذج الأصلي والنموذج الهجين بالإضافة إلى معاينة النموذج الهجين في بيئة التطبيق وأيضاً باستخدام برنامج ideaMaker.

- يزداد زمن تشغيل النموذج وذلك بسبب تغير معدل التغذية من جهة وتبديل الأدوات من جهة أخرى.
- الذاكرة والزمن المطلوبين لعملية تهجين النموذج يعتمد على شكل النموذج المراد تهجينه أي على حجم ملف التشغيل للنموذج الأصلي ويصل استخدام التطبيق إلى حوالي 512 MB من الذاكرة RAM.

ثانياً: التوصيات

- إنجاز مجموعة من الاختبارات باستخدام مجموعة من المواد المختلفة وفق مفهوم الطباعة الهجينة المبتكر بغية بحث الخواص الميكانيكية للنماذج الهجينة
- تطوير علاقات رياضية لتصاميم هجينة تستخدم أكثر من أداتين.
- بما أن برنامج Matlab مخصص للأغراض البحثية يمكن برمجة الخوارزمية باستخدام لغات برمجة أخرى تساعد في تقليل كلفة المعالجة في الحاسب وتجعلها أكثر قابلية للاستثمار.

المراجع

1. Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies [Internet]. New York, NY: Springer New York; **2015** Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-2113-3/>
2. Tymrak BM, Kreiger M, Pearce JM. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. Mater Des. **2014** Jun;58:242–6
3. Kalita SJ. Rapid prototyping in biomedical engineering: structural intricacies of biological materials. In: Biointegration of Medical Implant Materials [Internet]. Elsevier; **2010**. p. 349–97. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845695095500136/>
4. Burn MB, Ta A, Gogola GR. Three-Dimensional Printing of Prosthetic Hands for Children. J Hand Surg. **2016** May;41(5):e103–9.
5. Singh R, Kumar R, Farina I, Colangelo F, Feo L, Fraternali F. Multi-Material Additive Manufacturing of Sustainable Innovative Materials and Structures. Polymers. **2019** Jan 4;11(1):62
6. Momeni F, M.Mehdi Hassani.N S, Liu X, Ni J. A review of 4D printing. Mater Des. **2017** May; 122:42–79
7. Develop Apps Using App designer-MATLAB & Simulink – mathworks.com [Internet]. Available from: <https://mathworks.com/matlab/app-designer.html/>
8. Comparing Open-Source and Low-Cost 3D Printers with Commercial Products - additive3d.com [Internet]. Available from: <https://additive3d.com/comparing-open-source-low-cost-3d-printers-commercial-products/>

9. G-code – rewrap.org [Internet]. Available from:
<https://rewrap.org/wiki/G-code/>

There is ideas that can be described as scientific breakthroughs have emerged because of the human need for innovation, which has been the reason for the invention of new tools in many fields such as modeling and manufacturing. One of the most notably modeling and manufacturing tools at present is 3D printing, which is distinguished by its ability to build complex-shaped models in simple steps. This technology rapidly has become a revolution in product development and an important field for research. This paper, defines a new concept in the 3D printing field which represented by inventing a new structure can be called hybrid because it has more than one material in the model structure therefore a new algorithm was defined. Hybrid printing algorithm based on a mathematical formula to switch the materials through the model layers achieved using a software built in MATLAB environment using App designer, this program used to post new printing files or g-code files for hybrid models then the resulted G-code verified with a common slicer.

استرجاع الصور باستخدام الخوارزمية TITrDMCM وتقنيات التعلم الآلي

***م. دارين محلا

**أ.د. جبر حنا

* أ.د. مريم ساعي

الملخص

بسبب التزايد المتسارع في أحجام قواعد البيانات، برز نظام استرجاع الصور المستند إلى المحتوى (CBIR) كوسيلة واعدة لوصف واسترجاع الصور، من خلال استخلاص السمات المرئية للصورة (اللون، الشكل، النسجة). يهدف البحث إلى أمرين أولاً: اقتراح ثلاثة إصدارات موسعة للخوارزمية FDMCM (Four Diagonal Pixels Motif co-occurrence Matrix) وهي على التوالي: TIBrDMCM-TITrDMCM-TrBIDMCM. ثانياً: تحسين دقة استرجاع الصور للخوارزمية المقترحة TITrDMCM. حيث تم في الإصدارات الموسعة الثلاث تخفيض تعقيد الخوارزمية FDMCM من خلال تخفيض عدد النقاط المستخدمة كنقاط أولية للمسح، ففي الإصدار الموسع الأول TIBrDMCM استخدمت بكسلات القطر الرئيس كنقاط أولية للمسح، وفي الإصدار الموسع الثاني TITrDMCM استخدمت البكسلات القطرية الأفقية العلوية فقط كنقاط أولية للمسح، وفي الإصدار الثالث TrBIDMCM تم استخدام بكسلات القطر الثانوي فقط كنقاط أولية للمسح. حسن البحث دقة استرجاع الصور من خلال دمج الإصدار الموسع TITrDMCM مع خوارزميات التعلم الآلي. وأظهرت النتائج أن الإصدارين الموسعين الأول والثاني أعطت معايير تقييم جيدة وقريبة من الخوارزمية الأصلية FDMCM، مع انخفاض حجم شعاع السمات من 1152 سمة إلى 576 سمة. وأن دمج الخوارزمية TITrDMCM مع تقنيات التعلم الآلي حسن متوسط الدقة من 36.74% إلى 84% من أجل القاعدة Corel1k، ومن 71.49% إلى 94.33% من أجل Brodatz DB، ومن 75.83% إلى 99.21% من أجل Vistex DB، وذلك عند الدمج مع تقنية ensemble subspace discriminant.

كلمات مفتاحية: التعلم الآلي، استرجاع الصور بالاعتماد على المحتوى، متوسط الاستدعاء، متوسط الدقة.

* أستاذ-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي-جامعة تشرين-اللاذقية-سوريا.

** أستاذ-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي-جامعة تشرين-اللاذقية-سوريا.

*** طالبة دكتوراه-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي-جامعة تشرين-

اللاذقية-سوريا.

Image Retrieval Using Of TITrDMCM Algorithm and Machine Learning Techniques

Prof dr. Mariam M. Saai* Prof dr. Jaber Hanna** Eng. Darin Mhalla***

ABSTRACT:

Due to the rapidly increasing size of databases, the Content-Based Image Retrieval system has emerged as a promising method for describing and retrieving images by extracting the visual features of the image (color, shape, tissue). The research aims to do two things first: Suggest three extended versions of the algorithm (FDMCM- Four Diagonal Pixels Motif co-occurrence Matrix). Second: improving the image retrieval accuracy of the TITrDMCM algorithm. In the three extended versions, the complexity of the FDMCM algorithm was reduced by reducing the number of points used as peano scan motif. In the first extended version, TIBrDMCM, main diameter pixels were used as peano scan motif. In the second version, TITrDMCM, the top horizontal diagonal pixels were used. Third Version TrBIDMCM secondary diameter pixels were used. The accuracy of image retrieval was improved by integrating TITrDMCM with machine learning algorithms. The results showed that TITrDMCM and TIBrDMCM gave good evaluation criteria, which are close to the original FDMCM algorithm with reduced feature vector size from 1152 characters to 576 features. Integration the proposed algorithm TITrDMCM with machine learning techniques improved the average accuracy from 36.74% to 84% for Corel1k, from 71.49% to 94.33% for Brodatz DB and from 75.83% to 99.21% for Vistex DB when combined with ensemble subspace discriminant.

Keywords: Machine Learning, Content-Based Image Retrieval, Average Recall, Average Accuracy.

* Professor, Faculty Of Mechanical And Electrical Engineering , Department of Computer and Automatic Control Engineering ,Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Professor, Faculty Of Mechanical And Electrical Engineering , Department of Computer and Automatic Control Engineering ,Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** PHD Student, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Department of Computer and Automatic control Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

1. المقدمة:

إن استرجاع الصور هو عملية البحث عن الصور ذات الصلة ضمن قواعد البيانات، واسترجاع الصور الأكثر مطابقة لصورة الاستعلام. يتم تصنيف تقنيات استرجاع الصور إلى استرجاع الصور بالاعتماد على النص (Text-Based Image Retrieval (TBIR)، واسترجاع الصور بالاعتماد على المحتوى (Content-Based Image Retrieval (CBIR)). تعتبر أنظمة TBIR الشكل الأولي لاسترجاع الصور، إذ تتم فهرسة أو وصف كل صورة يدوياً، فهي أنظمة سهلة بسيطة وسريعة، ولكن لها العديد من السلبيات، فهي لا تأخذ بالحسبان محتوى الصورة مثل خصائص اللون البصري وخصائص البنية وخصائص الشكل، بالإضافة إلى الجهد المطلوب لشرح كل صورة على حدة، والتباين في الإدراك البشري عند وصف الصورة، والذي يؤثر سلباً في دقة نظام الاسترجاع [1,2]. بينما تقوم أنظمة CBIR باسترجاع الصور المتشابهة [3,4,5,6,7] بالاعتماد على المحتوى المرئي للصورة، من خلال استخراج السمات المرئية منخفضة المستوى (اللون-الشكل-النسجة) من صور قاعدة البيانات، وتخزينها كأشعة سمات [8] لتتم مقارنتها مع شعاع السمات المستخرج من صورة الاستعلام، باستخدام إحدى مقاييس المسافات المعيارية [9]، وترتيب قيم المسافة تصاعدياً ليتم استرجاع صور قاعدة البيانات ذات المسافة الأقل بالنسبة لصورة الاستعلام. استخدمت خوارزميات CBIR في العديد من المجالات، مثل صور الأقمار الصناعية [10] للعثور على معادن الأرض والمسح الجوي ومراقبة الزراعة وإنشاء تقارير الطقس وتتبع الأجسام السطحية، و في مجال التصوير الطبي [11] فهو أحد المجالات البارزة لتطبيقات CBIR والتي يمكن استخدامها لمراقبة تقارير صحة المريض والمساعدة في التشخيص من خلال تحديد الحالات السابقة المماثلة وما إلى ذلك، وفي مجال مسح بصمات الأصابع [12] لاستخراج صور بصمات الأصابع المماثلة لصورة الاستعلام، والتي تؤدي إلى التحقق من الفرد حيث تستخدم بصمات الأصابع في القطاع المصرفي والكلديات والشركات ومختبرات الطب الشرعي. اقترح الباحثون العديد من الطرائق لاسترجاع الصور المتشابهة من قواعد البيانات، من خلال استخلاص سمات اللون أو الشكل أو النسجة أو باستخلاص سمات هجينة من أكثر من نوع، إذ اقترح الباحث D.Latha [13] طريقة لاستخلاص مجموعة من السمات الهجينة (سمات اللون والنسجة)، والتي تم توليدها باستخدام السمات الاتجاهية للرسم

البياني والسمات الإحصائية مثل المتوسط والانحراف المعياري، وميزة هذه الطريقة أنها مناسبة لاسترجاع الصور الكبيرة الحجم عبر الإنترنت. فيما قدم الباحث [14] Zenggang, X. طريقة لاسترجاع الصور باستخلاص سمات اللون والشكل، إذ استخلص سمات اللون باستخدام الرسم البياني التراكمي، وسمات الشكل باستخدام سبع لحظات ثابتة، ثم قام الباحث بدمج سمات اللون والشكل وفق أوزان معينة وقياس التشابه باستخدام قانون المسافة الإقليدية. بينما قدم الباحث [15] Alsmadi, M. K. طريقة لاسترجاع الصور من خلال دمج مجموعة من سمات اللون والشكل والنسجة، إذ قام باستخلاص سمات اللون في فضاء اللون ycbcr باستخدام التحويل المويجي المتقطع والرسم البياني للحواف (canny edge histogram)، واستخدم تحويل GLCM لاستخلاص سمات النسجة، وطريقة حواف canny لاستخلاص سمات الشكل. بينما اقترح الباحث [16] Kayhan, N. نهج لاسترجاع الصور بناءً على مزيج موزون من ميزات اللون والنسجة، إذ استخرج ميزات النسجة باستخدام أنماط ثنائية محلية معدلة (MLBP)، وأنماط اختلافات الجوار المحلية (LNDP) ومصفوفة التكرار ذات المستوى الرمادي (GLCM)، واستخلص سمات اللون باستخدام الرسم البياني اللوني. اعتمد بعض الباحثين على استخلاص سمات محلية من الصورة تتعلق بقيمة البكسل بشكل مباشر، وإيجاد العلاقة بين البكسل المركزي وجواره، مثل خوارزمية LBP [17]، LTrP [18]، LNP [1]، COaLTP [19]، LOtP [20]، LHdP [20]، FDMCM [21] . أو استخلاص سمات محلية من خلال تقسيم الصورة إلى مربعات متساوية الحجم واستنتاج شكل من كل مربع ثم استبداله بفهرس معين مثل خوارزمية MCM [22]، وخوارزمية MMCM [23]، وخوارزمية LMP [24]. في السنوات الأخيرة، استخدم الباحثون واصفات محلية مختلفة لاسترجاع الصور وتصنيفها. وتصنيف الصور هو إحدى مجالات التعلم الآلي بإشراف، ففي الوقت الحالي، تميل أنظمة الاسترجاع إلى استخراج الميزات من الصور باستخدام إحدى خوارزميات الاسترجاع، ثم تدريب مصنّقات التعلم الآلي على تصنيف الصور إلى أصناف محددة مسبقاً، وأخيراً اختبار النموذج من خلال تصنيف صور جديدة [1]. إذ اقترح الباحث [1] Alrahhah, M. طريقة لتصنيف صور النسجة بالاعتماد على الخوارزمية LNP ليكون شعاع السمات المستخلص دخل للمصنف knn والمصنف SVM الذي يقوم بتصنيف الصور.

2. أهمية البحث وأهدافه

إن الزيادة الكبيرة والسريعة في حجم قواعد بيانات الصور، والحاجة اليومية للتعامل مع كميات ضخمة من البيانات في ظل الانتشار الكثيف والموسع لاستخدام شبكات الانترنت، أدت إلى توجيه اهتمام الباحثين إلى أنظمة استرجاع الصور بالاعتماد على المحتوى، وظهرت العديد من الأبحاث التي تقترح خوارزميات فعالة لاسترجاع الصور من قواعد البيانات بدقة عالية. يهدف البحث إلى تخفيض تعقيد الخوارزمية FDMCM مع الحفاظ على دقة استرجاع جيدة، من خلال اقتراح إصدارات موسعة لخوارزمية FDMCM (TIBrDMCM-TITrDMCM) بدقة عالية مع تعقيد منخفض وحجم تخزين منخفض. وتحسين دقة أنظمة CBIR بدمج الإصدارات المقترحة مع تقنيات التعلم الآلي.

3. مواد البحث وطرائقه

3.1. تقنيات التعلم الآلي

في التعلم الآلي الخاضع لإشراف، يتم تقسيم مجموعة بيانات الصور إلى قسمين، القسم الأول لتدريب النظام وباقي الصور لاختبار النظام. بعد انتهاء مرحلة التدريب، يجب أن يتمتع النظام بالقدرة على إعطاء نتائج دقيقة من أجل بيانات جديدة. استخدم البحث ثلاثة أنواع من تقنيات التعلم الآلي بإشراف لتصنيف الصور وهي:

- **مصنفات (SVM-Support Vector Machine)** : تقوم بتصنيف البيانات من خلال إيجاد أفضل خط فاصل [25] (الذي يمتلك أكبر هامش) بين صنف وبقية الأصناف. والمقصود بالهامش الحد الأقصى للفجوات بين الأصناف، والتي لا تحتوي أي نقاط بيانات، والمقصود بناقلات الدعم نقاط البيانات الأقرب للخط الفاصل. استخدام البحث العديد من مصنفات SVM بناءً على تابع kernel وهي:

Cubic kernel, Quadratic kernel, Linear Kernel, Medium Gaussian.

- **مصنفات الجار الأقرب للتصنيف (KNN - K Nearest Neighbors)** :

خوارزمية الجار الأقرب (KNN) هي إحدى أنواع خوارزميات التعلم الآلي الخاضعة للإشراف، والتي يمكن استخدامها لحل مشكلات التصنيف [26].

تستخدم خوارزمية KNN خاصية "تشابه السمات" للتعريف بصنف البيانات الجديدة، مما يعني أنه سيتم تصنيف نقطة البيانات الجديدة (شعاع السمات)، بناء على مدى تشابهها مع النقاط الأقرب لها في مجموعة التدريب. يوجد أنماط متعددة من مصنفات KNN (التي تختلف عن بعضها البعض في المسافة بين الأصناف وفي عدد الجيران) وهي: Fine KNN, Medium KNN, Cubic KNN, Cosine KNN and Weighted KNN.

- مصنفات Ensemble:

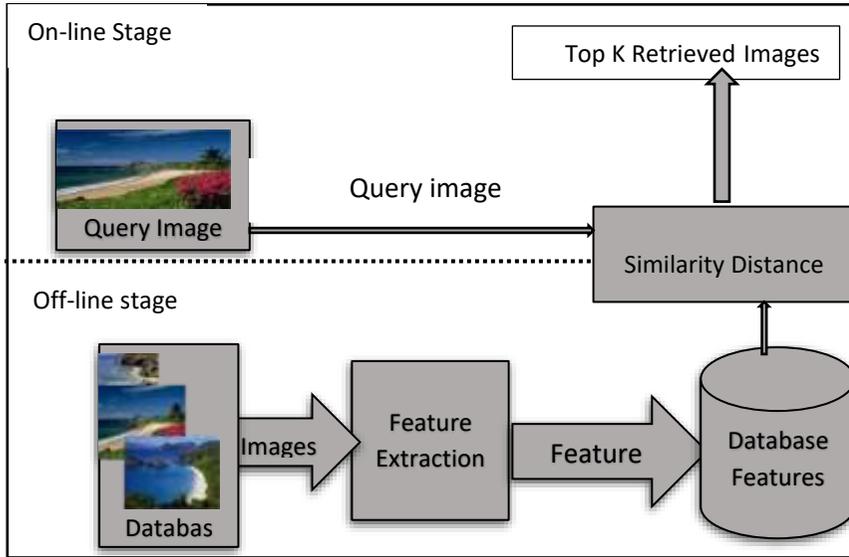
يستخدم العديد من المتعلمين الضعفاء لإنشاء نموذج عالي الجودة، إذ تعتمد الجودة على اختيار الخوارزمية [1]، استخدام البحث ثلاثة أنواع من مصنفات ensemble وهي:

- 1- مجوعات الأشجار المعبأة (Ensemble bagged trees)
- 2- مجوعات subspace discriminant
- 3- مجوعات subspace KNN

3.2. نظام استرجاع الصور المعتمد على المحتوى (Content-Based Image Retrieval)

يبين الشكل (1) مراحل نظام استرجاع الصور المستند إلى المحتوى، والذي يسمى اختصاراً CBIR. إذ يتألف نظام CBIR من مرحلتين: مرحلة التدريب لاستخراج السمات ويطلق عليها أيضاً مرحلة Off-Line، وفيها يقوم النظام باستخراج أشعة السمات لكل الصور الموجودة في قاعدة الصور وتخزينها في قاعدة السمات، ومرحلة الاختبار لاسترجاع الصور ويطلق عليها أيضاً مرحلة On-line، وفيها يقوم المستخدم بإدخال صورة إلى هذا النظام كصورة استعمال (دخل)، ثم يقوم النظام باستخراج شعاع السمات من هذه الصورة، وقياس نسبة التشابه (باستخدام إحدى المسافات المعيارية) بين شعاع سمات صورة الدخل وجميع أشعة السمات المخزنة في قاعدة السمات، والتي تم الحصول عليها في مرحلة التدريب [1]. بعد ذلك يتم ترتيب هذه المسافات بشكل

تصاعدي (حيث أن المسافة الأصغر تعني أن التشابه أكبر) واسترجاع أول k صورة كخرج لمرحلة الاختبار.



الشكل (1) مراحل نظام CBIR

3.3. مصفوفة التواجد المشترك للسويات الرمادية (Gray Level Co-Occurrence Matrix)

وتسمى اختصاراً GLCM، وهي مصفوفة تعبر عن التكرارات المشتركة للسويات الرمادية المتزامنة عند مسافة محددة وعند اتجاه محدد، ويتم حساب GLCM على صورة ما باستخدام المعادلة (8):

$$G_{(\Delta x, \Delta y)} = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N 1\{I(p, q) = i\} \text{ and } 1\{I(p + \Delta x, q + \Delta y) = j\} \quad (8)$$

حيث أن: $I(p, q)$ هي السوية الرمادية للبكسل في السطر p والعمود q ، وإن i, j هي قيم رمادية يتم حساب التواجد المشترك لهما و $\{1\}$ هي دالة مؤشر التابع الذي تم تعريفه مسبقاً، $\Delta x, \Delta y$ هما تعويضان موضعيان يعتمدان على المسافة والاتجاه اللذين يتم حساب العلاقات المشتركة بينهما، M و N عدد الصفوف والأعمدة للصورة المحددة.

يوضح الشكل (2) مثلاً لحساب GLCM، حيث أن المصفوفة الأولى عبارة عن مصفوفة الصورة والمصفوفة الثانية هي مصفوفة التواجد المشترك للسويات الرمادية [19].

1	4	←2	→3	4	
4	←2	→3	4	1	2
1	4	3	2	←2	→3
3	2	1	3	2	1

Pixel Value	1	2	3	4
1	0	1	1	2
2	2	1	3	0
3	0	3	1	2
4	1	2	1	0

الشكل (2) حساب مصفوفة GLCM لصورة باعتبار المسافة واحد ($d=1$) والاتجاه صفر $\theta=0^0$

3.4 خوارزمية مصفوفة التواجد المشترك للأشكال الناتجة عن البكسلات القطرية الأربعة (Four Diagonal Pixels Motif Co-Occurrence Matrix)

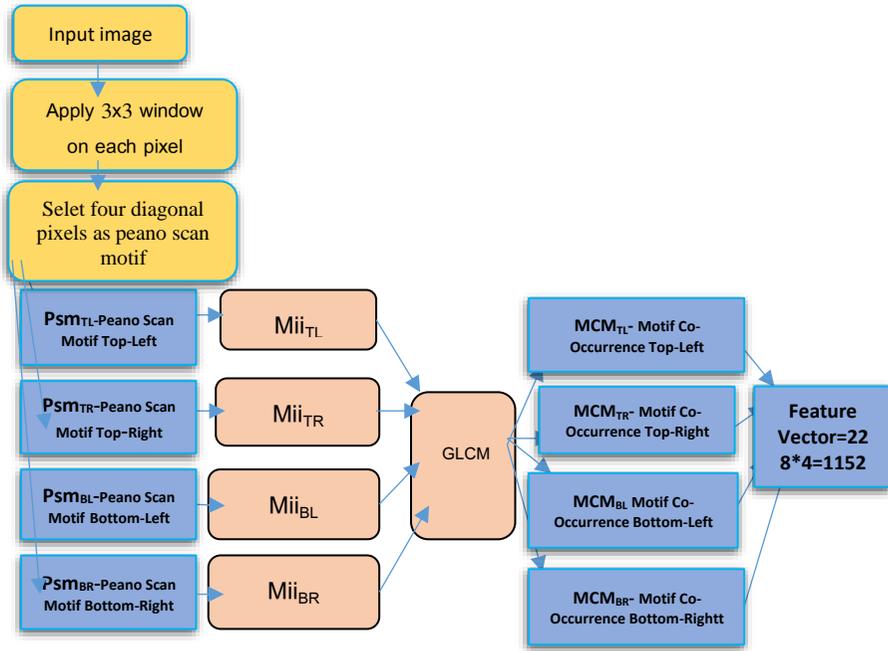
يبين الشكل (3) المخطط الصندوقي لخوارزمية FDMCM، التي تعتمد على تمرير نافذة 3×3 على كل بكسل من بكسلات الصورة، واختيار البكسلات القطرية الأربعة الموجودة في جوار البكسل المركزي لتكون نقاط أولية للمسح الضوئي (PSM-Peano Scan Motif)، من خلال إيجاد الفرق المطلق بين قيم البكسلات القطرية ونقطة PSM الأولية المختارة (إحدى البكسلات القطرية)، واستنتاج الشكل المعبر عن الفرق المتزايد للسويات الرمادية، وترميز الشكل الناتج بفهرس تتراوح قيمته من 1 إلى 6 وفق الشكل (4). ثم استبدال قيمة البكسل المركزي للجوار 3×3 بالفهرس الناتج للحصول على المصفوفات الأربعة [21]:

Miitl–Motif Indexed Image Top Left

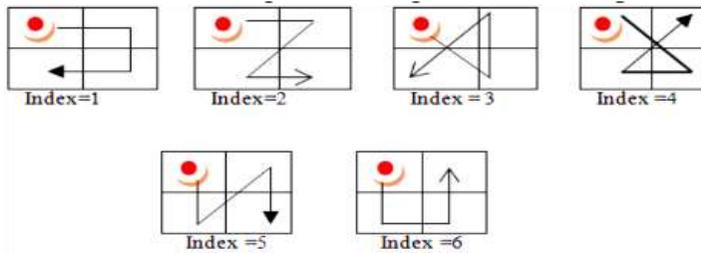
Miitr– Motif Indexed Image Top Right

Miibl– Motif Indexed Image Bottom Left

Miibr- Motif Indexed Image Bottom Right



الشكل (3) المخطط الصندوقي لخوارزمية FDMCM



الشكل (4) فهرس الأشكال باعتبار PSM أعلى يسار المربع 2×2 [22,23]

وكل مصفوفة من المصفوفات السابقة بحجم مصفوفة الصورة الأساسية ولكن قيمها تتراوح من 1 إلى 6.

- ثم يتم استخدام تحويل GLCM لكل من المصفوفات السابقة من أجل $d=1,2$ و $\theta=0^\circ$ و 45° و 90° و 135° للحصول على المصفوفات الأربعة التالية وكل منها بحجم $36 \times 4 \times 2 = 288$ سمة:

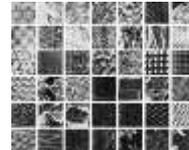
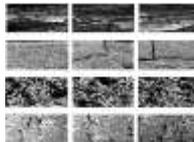
MCMtl–Motif Co–occurrence Matrix Top Left

MCMtr– Motif Co–occurrence Matrix Top Right, MCMbl– Motif Co–occurrence Matrix Bottom Left, MCMbr– Motif Co–occurrence Matrix Bottom Right

- تحويل المصفوفات الناتجة إلى أشعة ودمج الأشعة الناتجة للحصول على شعاع سمات نهائي بطول 1152 (288x4) سمة.

3.5. قواعد البيانات المستخدمة:

قيم البحث الخوارزميات المقترحة باستخدام نوعين من قواعد بيانات الصور، وهي قواعد بيانات الصور الملونة (Color databases)، إذ استُخدمت القاعدة [27] Corel 1k التي تحتوي 1000 صورة ملونة بحجم 384×256 أو 256×384 مصنفة ضمن عشرة فئات، وتحتوي كل فئة على مئة صورة ملونة. وقواعد بيانات صور النسجة (Texture databases) حيث تم استخدام القاعدتين [28] MIT–VisTex و [29] Brodatz، وتتألف قاعدة بيانات صور النسجة Brodatz من 116 صنف، وكل صنف مؤلف من 16 صورة وبالتالي فإن العدد الإجمالي للصور هو $16 \times 116 = 1856$ صورة وكل منها بحجم 128×128 . أما قاعدة بيانات صور النسجة MIT–VisTex تحتوي على 40 صنف، وكل صنف مؤلف من 16 صورة بحجم 128×128 ، وبالتالي تتكون هذه القاعدة من $16 \times 40 = 640$ صورة. يبين الشكل (5) بعض العينات من قواعد بيانات الصور المستخدمة.



a

b

c

الشكل (5) بعض الصور من قواعد البيانات المستخدمة: (a) عينات من القاعدة الملونة Corel1k، (b) عينات من قاعدة النسجة Brodatz، (c) عينات من قاعدة النسجة Vistex

3.6. معايير تقييم الأداء

تنقسم معايير تقييم الأداء في هذا البحث إلى قسمين: معايير تقييم أداء أنظمة استرجاع الصور ومعايير تقييم أداء المصنفات.

3.6.1. معايير تقييم أداء أنظمة استرجاع الصور: استخدمت الأبحاث العديد من المعايير لتقييم أداء أنظمة استرجاع الصور، وهي الدقة (Precision) والاستدعاء (Recall) ومتوسط الدقة (mAP–mean Average Precision). يمكن حساب الدقة والاستدعاء ومتوسط الدقة كما في المعادلات (5-7) [19,30,31]:

$$\text{Precision} = \frac{\text{No. of retrieved relevant images}}{\text{No. of retrieved images}} \quad (5)$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{No. of retrieved relevant images}}{\text{No. of relevant images}} \quad (6)$$

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Average precision}_i \quad (7)$$

الدقة (Precision) بالتعريف هي عدد الصور المسترجعة ذات الصلة إلى عدد الصور المسترجعة ويتم حساب الدقة عندما يكون الخرج عشر صور فقط من أجل جميع قواعد البيانات المعيارية المستخدمة، والاستدعاء (Recall) بالتعريف هو عدد الصور المسترجعة ذات الصلة إلى العدد الكلي للصور ذات الصلة ضمن قاعدة البيانات [32] ويتم حساب الاستدعاء عندما يكون الخرج 100 صورة (العدد الكلي للصور ذات الصلة) من أجل القاعدة Corel1k و16 صورة من أجل قاعدتي الصور (Brodatz–Vistex DB) ويتم حساب متوسط الدقة mAP على النحو التالي :

- من أجل القاعدة Corel1k: يتم حساب الدقة عندما يكون الخرج فقط 10 صور، 20 صورة، 30 صورة، وحتى الـ 100 صورة من أجل كل صورة في قاعدة الصور، ثم نأخذ المتوسط ونكرر هذا الإجراء لجميع الصور في قاعدة الصور.

- من أجل قاعدتي الصور VisTex و Brodatz: يتم حساب الدقة عندما يكون الخرج فقط 4 صور، 6 صورة، 8 صورة، وحتى الـ 16 صورة من أجل كل صورة في قاعدة الصور، ثم نأخذ المتوسط ونكرر هذا الإجراء لجميع الصور في قاعدة الصور [32].

3.6.2. معايير تقييم أداء المصنفات:

استخدم هذا البحث الدقة كمقياس لأداء المصنف المدرب ويتم حسابها على النحو التالي [33]:

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{No. of all images classified correctly}}{\text{The Total No. of images in the class}} \quad (8)$$

ولحساب الدقة، يقوم المستخدم بإدخال صورة استعلام إلى نظام CBIR واستخراج شعاع السمات باستخدام الخوارزمية المقترحة ثم يتم تصنيف صورة الاستعلام إلى الصنف الذي تنتمي إليه باستخدام المصنف المدرب. أخيراً، نسترجع جميع صور قاعدة البيانات التي تنتمي إلى نفس صنف صورة الاستعلام. أفضل دقة هي 1.0 أو (100% كنسبة مئوية)، في حين أن الأسوأ هو 0.0. وبالنظر إلى تعريف كل من متوسط الدقة ومتوسط الاستدعاء، نلاحظ أن كلاهما نفس المعنى [1].

4. منهجية البحث:

يتكون البحث من الآتي:

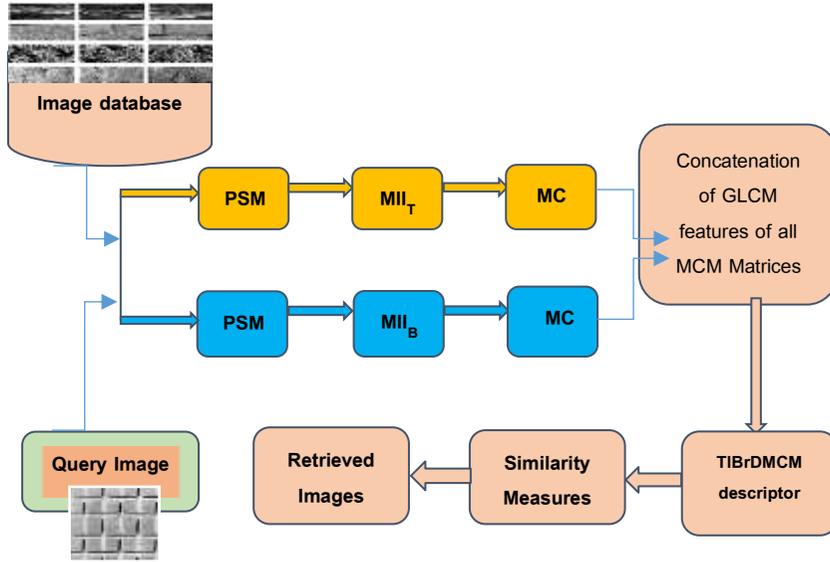
1. استخلاص السمات باستخدام الإصدارات الموسعة لخوارزمية FDMCM.
2. دمج الإصدارات المقترحة مع تقنيات التعلم الآلي لتحسين دقة استرجاع الصور من قواعد بيانات الصور.

4.1. استخلاص السمات باستخدام الإصدارات الموسعة لخوارزمية FDMCM

خضَّص البحث تعقيد خوارزمية FDMCM من خلال تخفيض حجم شعاع السمات الناتج، وذلك بتقليل عدد النقاط المستخدمة كنقاط أولية للمسح، حيث تم تقليل عدد النقاط بثلاثة طرائق مختلفة للحصول على ثلاثة إصدارات موسعة لخوارزمية FDMCM، وهي على التوالي (TIBrDMCM-TITrDMCM-TrBIDMCM)، وذلك وفقاً لما يلي:

(أ) الإصدار الأول: مصفوفة التواجد المشترك للأشكال الناتجة عن البكسلين الواقعين أعلى يسار وأسفل يمين الجوار (Top Left Bottom Right Diagonal Motif Co-Occurrence Matrix)

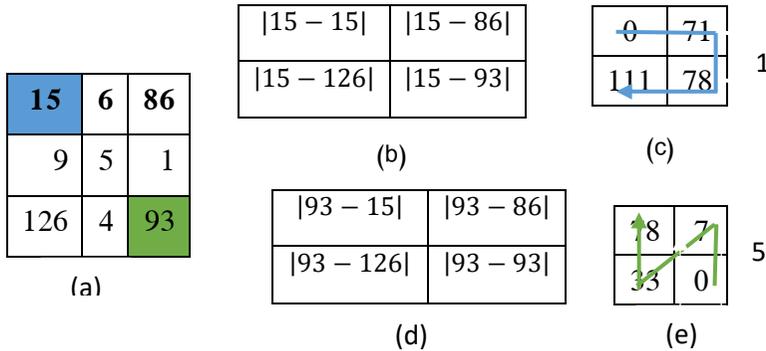
يبين الشكل (6) الإصدار الموسع الأول لخوارزمية FDMCM، ويسمى اختصاراً TIBrDMCM والذي استخدم بكسلات القطر الرئيس (البكسل القطري في أعلى اليسار والبكسل القطري في أسفل اليمين) كنقاط أولية للمسح، بدلاً من استخدام البكسلات القطرية الأربعة كما هو الحال في خوارزمية FDMCM.



الشكل (6): المخطط الصندوقي للخوارزمية TIBrDMCM.

- من أجل البكسل القطري في أعلى اليسار نقوم بالخطوات التالية:
 1. إيجاد الفرق بالقيمة المطلقة بين قيم البكسلات القطرية الأربعة ونقطة PSM الأولية (البكسل القطري في أعلى اليسار).
 2. استنتاج الشكل المعبر عن الفرق المتزايد للسويات الرمادية، وترميز الشكل الناتج بفهرس تتراوح قيمته من 1 إلى 6، ليتم استبدال قيمة البكسل المركزي للجوار 3x3 بالفهرس الناتج كما موضح في الشكل (7).

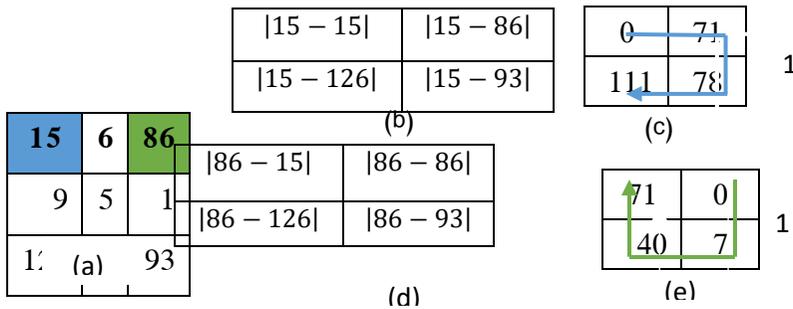
3. تكرار الخطوات السابقة من أجل كل بكسل من بكسلات الصورة للحصول على المصفوفة $Miilt$ (Motif Indexed Image Top Left) بحجم مصفوفة الصورة الأساسية وتتراوح قيمها بين 1 و 6.
4. استخدام تحويل GLCM للمسافة "1" والاتجاهات 0° و 45° و 90° و 135° للحصول على 4 مصفوفات كل مصفوفة بحجم 6×6 . والمسافة "2" والاتجاهات 0° و 45° و 90° و 135° للحصول على 4 مصفوفات كل مصفوفة بحجم 6×6 .
5. تحويل المصفوفات الثمانية الناتجة إلى متجهات كل متجه بطول 36.
6. دمج المتجهات الناتجة بمتجه سمات واحد بطول $288 = 36 \times 8$ سمة.
- من أجل البكسل القطري في أسفل اليمين نكرر الخطوات السابقة نفسها، ولكن باعتبار نقطة المسح الأولية هي البكسل القطري الموجود في أسفل اليمين للحصول على شعاع سمات بطول 288.
 - نقوم بدمج شعاعي السمات الناتجين عن بكسلات القطر الرئيس لنحصل على شعاع سمات نهائي بطول $576 = 288 \times 2$ سمة.



الشكل (7): (a) النافذة 3×3 (b) الفرق المطلق باعتبار نقطة المسح الأولية هي البكسل القطري في أعلى يسار الجوار، (c) الشكل الناتج عن الفرق والفهرس الموافق له، (d) الفرق المطلق باعتبار PSM البكسل القطري في أسفل اليمين، (e) الشكل الناتج عن الفرق والفهرس الموافق له.

(ب) الإصدار الثاني: مصفوفة التواجد المشترك للأشكال الناتجة عن البكسلين الواقعين
أعلى يسار وأعلى يمين الجوار (Top Left Top Right Diagonal Motif
Co-Occurrence

في الإصدار TITrDMCM، استخدمت البكسلات الأفقية فقط (البكسل القطري الموجود في أعلى اليسار والبكسل القطري الموجود في أعلى اليمين) كنقاط أولية للمسح كما هو موضح في الشكل (8)، للحصول على ثماني مصفوفات كل منها بحجم 6x6 عند اختيار البكسل القطري في أعلى اليسار كنقطة أولية للمسح، وثمانى مصفوفات عند اختيار البكسل الأفقي في أعلى اليمين كنقطة أولية للمسح، ثم دمج المصفوفات جميعها للحصول على شعاع السمات النهائي بطول $36 \times 8 \times 2 = 576$ سمة.

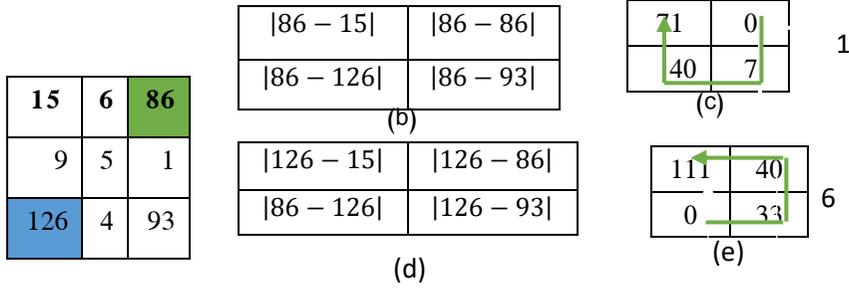


الشكل (8): (a) النافذة 3x3 (b) الفرق المطلق باعتبار نقطة المسح الأولية هي البكسل القطري في أعلى يسار الجوار، (c) الشكل الناتج عن الفرق والفهرس الموافق له، (d) الفرق المطلق باعتبار PSM البكسل القطري في أعلى اليمين، (e) الشكل الناتج عن الفرق والفهرس الموافق له.

(ت) الإصدار الثالث: مصفوفة التواجد المشترك للأشكال الناتجة عن البكسلين الواقعين
أسفل يسار وأعلى يمين الجوار (Bottom Left Top Right Diagonal
Motif Co-Occurrence co-occurrence Matrix

استخدم هذا الإصدار بكسلات القطر الثانوي فقط (البكسل القطري في أعلى اليمين وأسفل اليسار) كنقاط أولية للمسح كما هو موضح في الشكل (9)، للحصول على ثماني مصفوفات كل منها بحجم 6x6 عند اختيار البكسل القطري في أعلى اليمين كنقطة أولية للمسح، وثمانى

مصفوفات عند اختيار البكسل القطري في أسفل اليسار كنقطة أولية للمسح، ويتم دمج المصفوفات جميعها للحصول على شعاع السمات النهائي بطول $36 \times 8 \times 2 = 576$ سمة.



الشكل (9): (a) النافذة 3×3 (b) الفرق المطلق باعتبار نقطة المسح الأولية هي البكسل القطري في أسفل يسار الجوار، (c) الشكل الناتج عن الفرق والفهرس الموافق له، (d) الفرق المطلق باعتبار PSM البكسل القطري في أعلى اليمين، (e) الشكل الناتج عن الفرق والفهرس الموافق له.

4.2. دمج الإصدار الموسع TITrDMCM مع تقنيات التعلم الآلي لتحسين دقة

استرجاع الصور

في مهمة التصنيف، تُقسم قاعدة الصور إلى قاعدتين: إحداهما للتدريب والأخرى للاختبار، نسبة التقسيم في هذا البحث 80% من قاعدة الصور للتدريب و20% للاختبار. في مرحلة التدريب، تُستخرج أشعة السمات لجميع صور قاعدة التدريب باستخدام الخوارزمية المقترحة لنستفيد منها مع تسميات الصور لتدريب المصنف، وفي نهاية هذه المرحلة، يتم الحصول على مصنف مدرب وجاهز لتصنيف أي صورة من قاعدة الاختبار. أما مرحلة الاختبار فتبدأ بإدخال الصورة المراد معرفه الصنف الذي تنتمي إليه، لاستخراج شعاع السمات لها باستخدام نفس الطريقة المقترحة، والذي بدوره سيكون دخل المصنف (المدرّب في مرحلة التدريب)، الذي سيصنفها إلى الصنف المناسب. استخدمنا في عملنا المقترح كل من خوارزمية (SVM) (Support Vector Machine) وخوارزمية الجوار الأقرب (K-Nearest Neighbors) وخوارزمية Ensemble.

5. النتائج والمناقشات:

اختبر البحث أداء الإصدارات الموسعة الثلاثة من خوارزمية FDMCM وهي على التوالي (TIBrDMCM- TITrDMCM-BITrDMCM)، ومقارنتها مع أداء خوارزمية FDMCM

الأساسية وخوارزميات الأنماط المحلية الآتية: MCM, MMCM, LMP, LOtP, LHdP. وفق السيناريوهات الآتية:
 السيناريو الأول: اختبار أداء الإصدارات الموسعة الثلاثة من خوارزمية FDMCM باستخدام قاعدة بيانات الصور الملونة (Corel1k).
 السيناريو الثاني: اختبار أداء الإصدارات الموسعة الثلاثة من خوارزمية FDMCM باستخدام قاعدة بيانات النسجة Brodatz DB.
 السيناريو الثالث: اختبار أداء الإصدارات الموسعة الثلاثة من خوارزمية FDMCM باستخدام قاعدة بيانات النسجة Vistex DB.
 السيناريو الرابع: دمج الإصدار الموسع TITrDMCM مع تقنيات التعلم الآلي.

• السيناريو الأول:

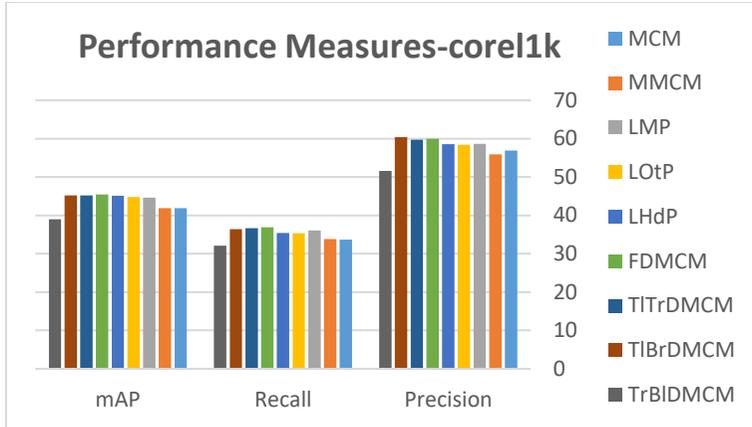
يبين الجدول (1) والشكل (10)، أن الإصدارين الموسعين الأول والثاني (TIBrDMCM- FDMCM) أعطيا دقة جيدة قريبة من دقة FDMCM، وأعلى من دقة جميع الخوارزميات التي تمت المقارنة معها LMP، MMCM، MCM، LOtP، LHdP وذلك عند استخدام قاعدة بيانات الصور الملونة Corel1k. مع العلم أن طول شعاع السمات انخفض من 1152 (FDMCM) إلى 576 (الإصدارات الموسعة لخوارزمية FDMCM) كما هو موضح في الجدول (2). على عكس الإصدار الثالث BITrDMCM المعتمد على نقاط القطر الثانوي كنقاط أولية للمسح والذي أعطى دقة أقل بكثير من دقة FDMCM، وأقل من دقة جميع الخوارزميات التي تمت المقارنة معها LMP، MMCM، MCM، LOtP، LHdP .

Methods	corel1k		
	Precision	Recall	mAP
MCM	56.86	33.71	41.86

استرجاع الصور باستخدام الخوارزمية TITrDMCM وتقنيات التعلم الآلي

(1) بين	الجدول مقارنة		
	MMCM	55.88	33.84
LMP	58.65	36.06	44.6
LOtP	58.8	35.3	44.8
LHdP	59.1	36.42	45.1
FDMCM	59.98	36.9	45.43
TITrDMCM	59.73	36.65	45.17
TIBrDMCM	60.37	36.39	45.17
TrBIDMCM	51.56	32.06	38.98

الإصدارات الثلاثة الموسعة لخوارزمية FDMCM مع خوارزمية FDMCM وخوارزميات أخرى باستخدام قانون المسافة L1 من أجل القاعدة Corel1k.



الشكل (10) مقارنة بين الإصدارات الثلاثة الموسعة لخوارزمية FDMCM مع خوارزمية FDMCM وخوارزميات أخرى باستخدام قانون المسافة L1 من أجل القاعدة Core1k.

الجدول (2) طول شعاع السمات للإصدارات الموسعة المقترحة لخوارزمية FDMCM والخوارزميات التي تمت المقارنة معها

Method	Feature Vector Length
MCM	288
MMCM	576
LMP	1296
LOtP	3,363
LHdP	14,219
FDMCM	1152
TIBrDMCM	576
TITrDMCM	576
BITrDMCM	576

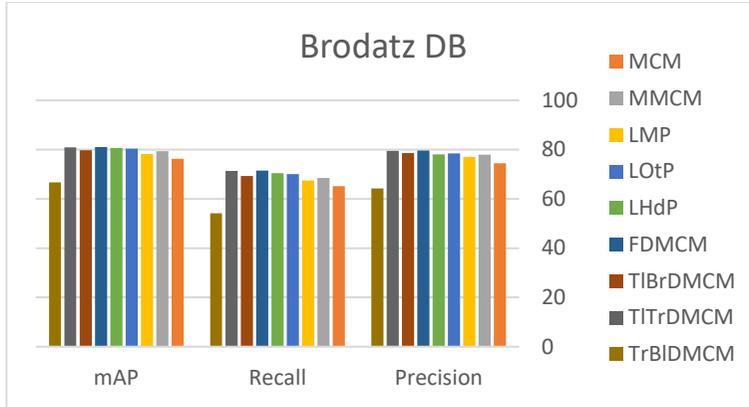
• السيناريو الثاني:

كما هو مبين في الجدول (3) والشكل (11)، أنه باستخدام قاعدة بيانات النسجة Brodatz DB فإن الإصدارين الموسعين الأول والثاني لخوارزمية FDMCM، التي انخفض فيها طول شعاع السمات من 1152 إلى 576 سمة، أعطت دقة جيدة قريبة من دقة FDMCM حيث

أن الخوارزمية TITrDMCM أعطت على التوالي $Precision=79.53\%$ ، $mAP=80.94\%$ ، $Recall=71.40\%$ وهي قريبة من نتائج الخوارزمية FDMCM $mAP=81\%$ ، $Recall=71.49\%$ ، $Precision=79.59\%$ وأعلى من دقة جميع الخوارزميات التي تمت المقارنة معها LMP، MMCM، MCM، LotP، LHdP . على عكس الإصدار الثالث BITrDMCM المعتمد على نقاط القطر الثانوي كنقاط أولية للمسح والذي أعطى دقة أقل بكثير من دقة FDMCM، وأقل من دقة جميع الخوارزميات التي تمت المقارنة معها.

الجدول (3) مقارنة بين الإصدارات الثلاثة الموسعة لخوارزمية FDMCM مع خوارزمية FDMCM وخوارزميات أخرى من أجل القاعدة Brodatz DB.

Brodatz DB			
Methods	Precision	Recall	mAP
MCM	74.4	65.09	76.2
MMCM	77.93	68.5	79.3
LMP	77	67.4	78.2
LotP	78.5	70.1	80.4
LHdP	78	70.4	80.7
FDMCM	79.59	71.49	81
TIBrDMCM	78.58	69.23	79.76
TITrDMCM	79.53	71.4	80.94
TrBIDMCM	64.26	54.2	66.69



الشكل (11) مقارنة بين الإصدارات الثلاثة الموسعة لخوارزمية FDMCM مع خوارزمية FDMCM وخوارزميات أخرى من أجل القاعدة Brodatz.

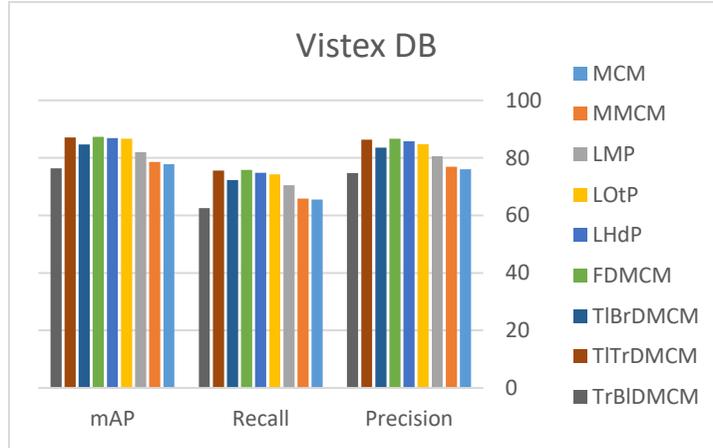
• السيناريو الثالث:

يبين الجدول (4) والشكل (12) أنه باستخدام قاعدة بيانات النسجة Vistex DB، فإن الإصدارين الموسعين الأول والثاني لخوارزمية FDMCM أعطت دقة قريبة من دقة FDMCM، إذ أن الخوارزمية TITrDMCM أعطت نتائج $Precision=86.36\%$ ، $mAP=87.09\%$ ، $Recall=75.59\%$ قريبة من نتائج FDMCM $mAP=87.26\%$ ، $Recall=75.84\%$ ، $Precision=86.64\%$ وأعلى من دقة جميع الخوارزميات التي تمت المقارنة معها MCM، MMCM، LOtP، LHdP، بينما الإصدار الثالث BITrDMCM (يعتمد على نقاط القطر الثانوي كنقاط أولية للمسح)، أعطى دقة أقل بكثير من دقة FDMCM، وأقل من دقة جميع الخوارزميات التي تمت المقارنة معها.

الجدول (4) مقارنة بين الإصدارات الثلاثة الموسعة لخوارزمية FDMCM مع خوارزمية FDMCM وخوارزميات أخرى من أجل القاعدة Vistex DB.

Vistex DB			
Methods	Precision	Recall	mAP
MCM	76.05	65.49	77.76
MMCM	76.95	65.87	78.52
LMP	80.56	70.55	82.05

LOtP	84.8	74.3	86.7
LHdP	85.8	74.8	86.9
FDMCM	86.64	75.84	87.26
TIBrDMCM	83.53	72.29	84.62
TITrDMCM	86.36	75.59	87.09
TrBIDMCM	74.7	62.49	76.38



الشكل (12) مقارنة بين الإصدارات الثلاثة الموسعة لخوارزمية FDMCM مع خوارزمية FDMCM وخوارزميات أخرى من أجل قاعدة البيانات.vistex DB.

ونلاحظ من الأشكال أن الخوارزمية TITrDMCM (التي اعتمدت البكسل الأفقي في أعلى اليسار والبكسل الأفقي في أعلى اليمين كنقاط أولية للمسح)، أعطت نتائج أفضل من الإصدارين الآخرين (TIBrDMCM, TrBIDMCM) من أجل قاعدة الصور الملونة وقاعدتي صور النسجة، ولذلك تم اختيارها لدمجها مع تقنيات التعلم الآلي.

السيناريو الرابع:

يهدف السيناريو الرابع إلى إجراء مقارنة بين أداء نظام CBIR باستخدام الخوارزمية المقترحة TITrDMCM لوحدها، مع أداء نظام CBIR باستخدام TITrDMCM بعد دمجها مع أنواع مختلفة من مصنفات التعلم الآلي التالية: مصنفات SVM بأنواعها المختلفة (Cubic, quadratic, Linear, Medium Gaussian Bagged)، مصنفات KNN بأنواعها المختلفة (Cubic, Cosine, Weighted) ومصفقات ensemble بأنواعها المختلفة (Bagged)

(Trees, Subspace Discriminant, Subspace KNN). أظهرت النتائج كما هو مبين في الجدول (5)، أن دمج تقنيات التعلم الآلي مع خوارزمية TITrDMCM حسن متوسط الدقة من 36.74% إلى 84% من أجل القاعدة Corel1k ومن 71.49% إلى 94.33% من أجل القاعدة Brodatz DB ومن 75.83% إلى 99.21% من أجل القاعدة Vistex DB عندما تم الدمج مع تقنية ensemble subspace discriminant.

الجدول (5) مقارنة بين نظام CBIR باستخدام الخوارزمية المقترحة TITrDMCM لوحدها مع نظام CBIR باستخدام الخوارزمية المقترحة TITrDMCM مع تقنيات التعلم الآلي.

Databases		Corel1k	Brodatz	Vistex
CBIR with TITrDMCM only		36.74	71.49	75.83
TITrDMCM+ KNN	Cosine	68.50%	83.28%	90.62%
	Weighted	73.50%	89.75%	93.75%
	Cubic	67.50%	85.17%	87.50%
TITrDMCM +SVM	Cubic	80%	87.87%	94.53%
	Quadratic	81.50%	87.33%	97.65%
	Linear	78.50%	85.71%	92.18%
	Medium Gaussian	78.50%	87.33%	96.09%
TITrDMCM+ Ensemble	Bagged Trees	73.50%	88.67%	96.09%
	Subspace Discriminant	84%	94.33%	99.21%
	Subspace KNN	59%	84.63%	90.62%

6. الاستنتاجات والخاتمة

اقترح البحث ثلاثة إصدارات موسعة لخوارزمية FDMCM، المستخدمة في مجال استرجاع الصور بالاعتماد على المحتوى، وذلك بهدف تخفيض أبعاد شعاع السمات مع المحافظة على معايير تقييم جيدة وأظهرت النتائج أنه:

- تم الحصول على أفضل دقة للاسترجاع باستخدام الإصدار الأول، والذي اعتمد على البكسلات القطرية الأفقية الموجودة في الجوار العلوي للبكسل المركزي، رغم انخفاض حجم شعاع السمات بمقدار النصف (من 1152 في الخوارزمية FDMCM إلى 576 في TITrDMCM)، يليه الإصدار الثاني المعتمد على بكسلات القطر الرئيس.
- أعطى الإصدار الثالث المعتمد على بكسلات القطر الثانوي معايير تقييم منخفضة بالمقارنة مع الخوارزمية الأصلية FDMCM والإصدارين السابقين، وبذلك لا ينصح بالاعتماد على بكسلات القطر الثانوي في عملية استخلاص السمات.
- دمج البحث الخوارزمية TITrDMCM مع مصنفات التعلم الآلي بأنواعها المختلفة، وذلك بهدف المقارنة بين أداء نظام CBIR باستخدام الخوارزمية TITrDMCM لوحدها، وأداء نظام CBIR باستخدام الخوارزمية TITrDMCM بعد دمجها مع مصنفات مختلفة للتعلم الآلي، وأظهرت النتائج أن دمج الخوارزمية مع مصنفات التعلم الآلي حسّن متوسط الدقة بنسبة 24.21% (من 71.49 إلى 94.33) من أجل القاعدة Brodatz و بنسبة 23.56% (75.83 إلى 99.21) من أجل القاعدة Vistex، وذلك عند الدمج مع المصنف ensemble Subspace Discriminant.
- وأن التحسن الكبير في متوسط الدقة كان باستخدام المصنف ensemble Subspace Discriminant من أجل القاعدة الملونة Corel1k، إذ تحسّن متوسط الدقة بنسبة 56.26% (36.74 إلى 84)، وهذا يدل على أن السمات المستخلصة من صور القاعدة الملونة باستخدام الخوارزمية المقترحة TITrDMCM هي سمات فعالة ومميزة وقادرة على تدريب المصنف بشكل جيد.

وفي المستقبل، يمكن استخدام تقنيات التعلم العميق مع CBIR للحصول على المزيد من الدقة وتقليل زمن التدريب للآلة. أيضا، يمكن الجمع بين CBIR وتقنيات Hadoop لمعالجة قاعدة بيانات الصور الضخمة والعمل في بيئة موزعة.

References

1. Alrahal, M., & Supreethi, K. P 2019, *Content-Based Image Retrieval using Local Patterns and Supervised Machine Learning Techniques*. In 2019 Amity International Conference on Artificial Intelligence (AICAI),(pp. 118–124), IEEE.
2. He, T., Wei, Y., Liu, Z., Qing, G., & Zhang, D.2018, *Content based image retrieval method based on SIFT feature*. In 2018 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS) (pp. 649–652), IEEE.
3. Khan, U. A., Javed, A., & Ashraf, R. (2021). An effective hybrid framework for content based image retrieval (CBIR). *Multimedia Tools and Applications*, 80(17), 26911–26937.
4. Vimina, E. 1., & Divya, M. O. (2020). Maximal multi-channel local binary pattern with colour information for CBIR. *Multimedia Tools and Applications*, 79(35), 25357–25377.
5. Ammatmanee, C., & Gan, L. (2021). A ten-year literature review of content-based image retrieval (CBIR) studies in the tourism industry. *The Electronic Library*.
6. Rui, Y., Huang, T. S., & Chang, S. F. 1999, *Image retrieval: Current techniques, promising directions, and open issues*. *Journal of visual communication and image representation*, 10(1), 39–62.

7. Smeulders, A. W., Worring, M., Santini, S., Gupta, A., & Jain, R.2000, *Content-based image retrieval at the end of the early years*. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 22(12), 1349–1380
8. Nazir, A., Ashraf, R., Hamdani, T., & Ali, N.2018, *Content based image retrieval system by using HSV color histogram, discrete wavelet transform and edge histogram* descriptor. In 2018 international conference on computing, mathematics and engineering technologies (iCoMET), (pp. 1–6). IEEE.
9. Alkhawlani, M., Elmogy, M., & El Bakry, H. 2015, *Text-based, content-based, and semantic-based image retrievals*. a survey. Int. J. Comput. Inf. Technol, 4(01),58–66.
10. Alkhawlani, M., Elmogy, M., & El Bakry, H. 2015, *Text-based, content-based, and semantic-based image retrievals*. a survey. Int. J. Comput. Inf. Technol, 4(01),58–66.
11. Ramos, J., Kockelkorn, T. T., Ramos, I., Ramos, R., Grutters, J., Viergever, M. A., & Campilho, A.2016, Content-based image retrieval by metric learning from radiology reports: application to interstitial lung diseases. IEEE journal of biomedical and health informatics, 20(1), 281–292.
12. Gavrielides, M. A., Sikudova, E., & Pitas, I.2006, *Color-based descriptors for image fingerprinting*. IEEE transactions on multimedia, 8(4), 740–748.

- 13.Latha, D., & Sheela, C. (2022). Enhanced hybrid CBIR based on multichannel LBP oriented color descriptor and HSV color statistical feature. *Multimedia Tools and Applications*, 1–18.
- 14.Zenggang, X., Zhiwen, T., Xiaowen, C., Xue–min, Z., Kaibin, Z., & Conghuan, Y. (2021). Research on image retrieval algorithm based on combination of color and shape features. *Journal of signal processing systems*, 93(2), 139–146.
- 15.Alsmedi, M. K. (2020). Content–based image retrieval using color, shape and texture descriptors and features. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(4), 3317–3330
- 16.Kayhan, N., & Fekri–Ershad, S. (2021). Content based image retrieval based on weighted fusion of texture and color features derived from modified local binary patterns and local neighborhood difference patterns. *Multimedia Tools and Applications*, 80(21), 32763–32790.
- 17.Pawar, M. P., & Belagali, P. P.2010, *Image Retrieval Technique Using Local Binary Pattern (LBP)*. *IEEE Trans. Image Process*, 19(6), 1657–1663.
- 18.Murala, S., Maheshwari, R. P., & Balasubramanian, R.2012, *Local tetra patterns: a new feature descriptor for content–based image retrieval*. *IEEE transactions on image processing*, 21(5), 2874–2886.
19. Naghashi, V.2018, *Co–occurrence of adjacent sparse local ternary patterns: A feature descriptor for texture and face image retrieval*. *Optik*, 157, 877–889.

- 20.Raju, U. S. N., Suresh Kumar, K., Haran, P., Boppana, R. S., & Kumar, N. (2020). Content-based image retrieval using local texture features in distributed environment. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, 18(01), 1941001.
- 21.أ.د. مريم ساعي، أ.د. جبر حنا، م.دارين محلا 2021 استرجاع الصور بالاعتماد على المحتوى باستخدام مصفوفة التواجد المشترك للأشكال الناتجة عن البكسلات القطرية الأربعة، مجلة جامعة طرطوس، المجلد الخامس العدد الحادي عشر.
- 22.Jhanwar, N., Chaudhuri, S., Seetharaman, G., & Zavidovique, B.2004, *Content based image retrieval using motif cooccurrence matrix. Image and Vision Computing*, 22(14),1211-1220.
- 23.Obulesu, A., Kumar, V. V., & Sumalatha, L. 2018, *Content based image retrieval using multi motif co-occurrence matrix. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 11(4), 59.
- 24.Obulesu, A., Kumar, V. V., & Sumalatha, L.2018, *Image retrieval based local motif patterns code. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 11(6), 68.
- 25.Smola, A. J., & Schölkopf, B. (2004). *A tutorial on support vector regression. Statistics and computing*, 14(3), 199-222.
- 26.M. Kuhn and K. Johnson 2016, *Applied predictive modeling*. New York: Springer.
- 27.Corel 1000 image database [Online]. Available: <http://wang.ist.psu.edu/docs/related/>
- 28.Vistex database [Online]. Available: <http://vismod.media.mit.edu/pub/VisTex/>

- 29.P. Brodatz, Textures: A Photographic Album for Artists and Designers. New York: Dover, 1996. University of Southern California, Los Angeles, "Signal and image processing institute," [Online]. Available: <http://sipi.usc.edu/database/>
- 30.Vipparthi, S. K., & Nagar, S. K.2015, *Integration of color and local derivative pattern features for content-based image indexing and retrieval*. Journal of the Institution of Engineers (India): Series B, 96(3),251-263.
- 31.N. Fathi, B. Vaseghi and m. Shemshadi 2016, "*An overview of content-based image retrieval techniques (CBIR)*", IOSR Journal of Computer Engineering, vol. 18, no. 04, pp. 108-116.
32. Alrahhah, M., & Supreethi, K. P. 2021 Full Direction Local Neighbors Pattern (FDLNP). IJACSA International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 12, No. 1.
- 33.S. Sharma, "*Use of Artificial Intelligence Algorithm for Content-Based Image Retrieval System*"2018, International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, vol. 4, no., pp. 680-684, 2018

دراسة تأثير تردد الإشارات الحاملة في أداء المبدلات الثلاثية الطور المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية

الدكتور المهندس رامي موسى

أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث
mosa.rami1977@gmail.com
00963992166373

الملخص

تمتلك المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية العديد من الميزات التي تمكنها من تجاوز محدودية استخدام الأنواع الأخرى من المبدلات المتعددة المستويات، بحيث أصبحت هذه المبدلات محط اهتمام العديد من مراكز البحث الأكاديمية والصناعية. تعد تقنية التعديل العرضاني للنبضة من أكثر التقنيات استخداماً للتحكم بعمل هذه المبدلات حيث يمثل تردد الإشارات الحاملة بارامتراً مهماً يؤثر في الأداء الصحيح للمبدل.

تمت في هذا البحث دراسة تأثير تغيير تردد الإشارات الحاملة في أداء المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية. لدراسة هذا التأثير تم استخدام نموذج لمبدل مكون من أربع وحدات فرعية في كل ذراع، وتمت دراسة موجات التيار والتوتر في خرج هذا المبدل إضافة إلى دراسة التيار الدوراني وجهود مكثفات الوحدات الفرعية. وتم رسم منحنيات تغير الجهود والتيارات والمحتوى التوافقي بدلالة تردد الإشارات الحاملة، وذلك بهدف استخلاص القيمة الملائمة لهذا التردد الذي يحقق أفضل أداء للمبدل.

كلمات البحث: المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية، تردد الإشارات الحاملة، التشوه التوافقي الكلي THD، نمذجة المبدل، التيار الدوار، توازن جهود مكثفات الوحدات الفرعية.

Study of the effect of carrier signals frequency on the performance of three - phase modular multi-level converters

Dr. Ing: Rami Mousa

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - AL- Baath University

mousa.rami1977@gmail.com

00963992166373

Abstract

Modular multi-level converters have many advantages that enable them to bypass the limitation of other types of multi-level converters, so that these converters have become the focus of many academic and industrial research centers.

Pulse Width Modulation technic is one of the most widely used techniques to control the operation of these converters, where the frequency of the carrier signals is an important parameter that affects the correct performance of the converter.

In this paper, the effect of changing the frequency of the carrier signals on the performance of modular multi-level converters has been studied. To study this effect, a model of a converter consisting of four sub-models in each arm has been used. The output current and voltage waveforms of this converter have been studied, in addition to study the circulating current and voltages of the sub-models' capacitors. in order to extract the appropriate value for this frequency that achieves the best performance of the converter, the voltages, currents and harmonic content curves have been drawn versus of the carrier signals frequency change.

Keywords: modular multi-level converters (MMC), carrier signals frequency, total harmonic distortion (THD), converter modeling, circulating current, voltage balancing of sub-models' capacitors.

1. مقدمة

تتميز المبدلات الإلكترونية المستخدمة في نظم تحويل الطاقة الكهربائية بالكفاءة العالية، وهي تستخدم في مجال واسع من التطبيقات الصناعية مثل المضخات والضواغط والمراوح والنقل (العربات الكهربائية وتطبيقات الجر)، وتطبيقات تعويض الاستطاعة الردية والنقل بالتيار المستمر والطاقات المتجددة [1، 2، 3].

تستخدم المبدلات بمنبع جهد VSCs (Voltage Source Converters) في التطبيقات الصناعية بشكلٍ واسعٍ، ومعظم هذه المبدلات متوفرة على شكل منتجات بتوتر عمل يتراوح بين 2.3 kV و 13.8 kV. من أجل العمل عند التوترات العالية فإن هندسة هذه المبدلات تتطلب استخدام محولات رافعة للجهد أو قواطع إلكترونية ذات تحمل عالٍ للجهد. يقود استخدام المحولات الرافعة إلى زيادة حجم ووزن وتكلفة المبدل، أما استخدام قواطع إلكترونية ذات تحمل عالٍ للجهد فهو يعد خياراً مقيداً بتكنولوجيا تصنيع القواطع الإلكترونية، على سبيل المثال فإن القواطع الأكثر استخداماً في هذه المبدلات هي الترانزستورات من نوع IGBT بتوتر أعظمي 6.5 kV وبتيار أعظمي 2.4 kA [3، 4].

بهدف تجاوز مشكلات الوصل التسلسلي للقواطع الإلكترونية، من أجل زيادة قدرتها على تحمل الجهد، تم تطوير مفهوم المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية MMC (Modular Multilevel Converters). تعد هذه المبدلات نوعاً من أنواع المبدلات المتعددة المستويات، وهي تتميز ببنيتها القائمة على استخدام الوحدات الفرعية المتتابعة وبذلك يمكن للمبدل العمل عند أي مستوى للاستطاعة وللتوتر [5، 6].

تستخدم المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية في تطبيقات قيادة المحركات ذات الجهد المتوسط بتوتر حتى 7.2 kV وباستطاعة حتى 13.7 MVA. كما تستخدم في تطبيقات نظم النقل بالتيار المستمر ذات التوتر العالي بتوترات تبلغ 320 kV وباستطاعة 1000 MW [7]. يتم أيضاً استخدام هذه المبدلات في نقل الطاقة الكهربائية من المزارع الريحية البحرية بتوترات تبلغ 320 kV وباستطاعة 900 MW [8]. تعد تطبيقات تعويض الاستطاعة الردية وتعويض التوافقيات مجالاً واعداً لاستخدام هذه المبدلات التي تستخدم كمعوضات ساكنة تزامنية بتوترات تبلغ 230 kV وباستطاعة

55 MVar. من التطبيقات الواعدة أيضاً لهذه المبدلات هي استخدامها في مجال تحسين نوعية الاستطاعة كمعوّضات تسلسلية وتفرعية [9، 10].

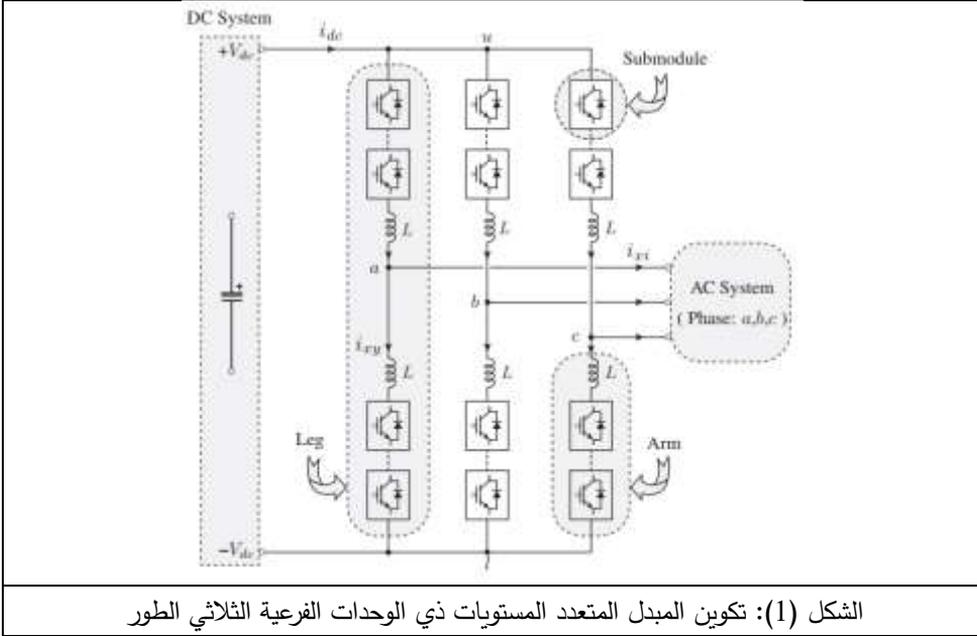
تعد تقنيات التعديل النبضي العرضاني من أشهر التقنيات المستخدمة لقيادة المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية. من بين هذه التقنيات تحظى طريقة التعديل النبضي العرضاني ذي الانزياح الطوري للإشارات الحاملة باهتمام خاص لأنها تؤمن إمكانية ضبط جهود المكثفات ويمكن تطبيقها على عدد كبير من الوحدات بدون تعقيد وتؤمن الحصول على موجات خرج ذات نوعية جيدة [11]. في جميع هذه التقنيات يوجد بارامتران أساسيان يتحكمان بخرج الـ PWM وعلى أساسهما يتم توليد نبضات القرح لقواطع المبدل. هذان البارامتران هما دليل التعديل المطالي وتردد الإشارات الحاملة. تمت دراسة تأثير قيمة دليل التعديل المطالي في أداء المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية في المرجعين [12، 13]، حيث بينت الدراسة أهمية الاختيار المتقن لقيمة هذا الدليل وتأثيره الملحوظ في أداء المبدل. وفي هذا البحث تمت دراسة تأثير تردد الإشارات الحاملة في أداء المبدل.

2. بنية المبدل والوحدات الفرعية

يبين الشكل (1) البنية الرئيسية للمبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية [14]. يتم ربط النهايات الموجة والسالبة للمنبع المستمر (أو ما يسمى وصلة التيار المستمر) مع سيقان المبدل. تتكون كل ساق من ذراعين: ذراع علوية تربط مع النهاية الموجبة للمنبع المستمر يشار إليها بالدليل (u) وذراع سفلية تربط مع النهاية السالبة للمنبع المستمر يشار إليها بالدليل (l). تتكون كل ذراع من مجموعة من الوحدات الفرعية ومن ملف (L) موصول على التسلسل معها، حيث يقوم هذا الملف بالحد من التيار الناتج عن فرق التوتر اللحظي بين الأذرع. يتم ربط النظام المتناوب ثلاثي الطور مع النقاط الوسطية لكل ساق (a, b, c).

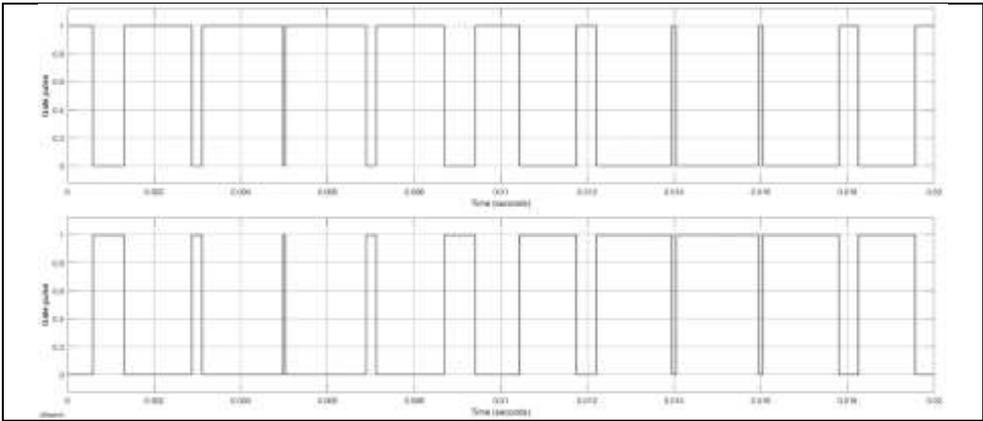
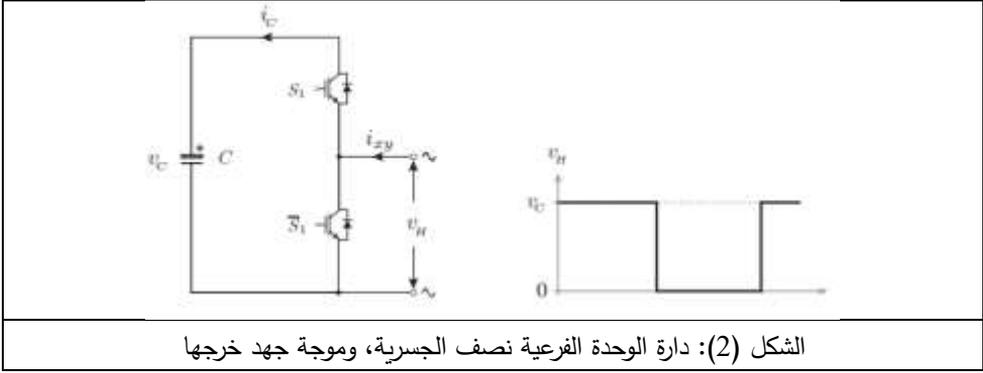
تتكون الوحدات الفرعية من مبدل مستمر - متناوب بسيط، حيث يتم عادة استخدام ترانزستورات IGBT بتحمل جهد بين 1200 V و 1700 V، بالإضافة إلى مكثفات. يوجد تشكيلات متعددة للوحدات الفرعية، فيمكن أن تكون وحدات نصف جسمية

أو وحدات بجسر كامل أو وحدات ذات مكثفات طيارة أو وحدات نصف جسرية ذات وصل متتابع [14، 15].



الشكل (1): تكوين المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية الثلاثي الطور

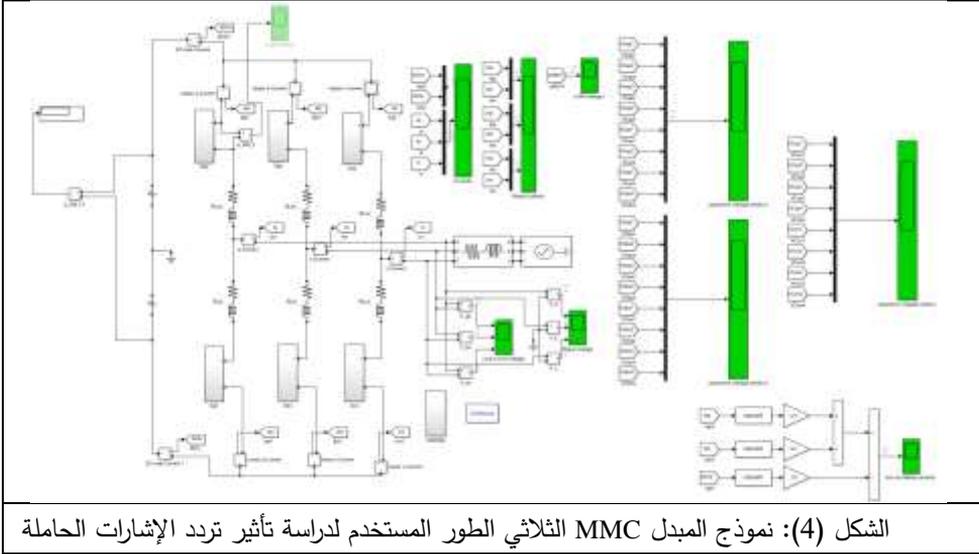
تعد الوحدات الفرعية نصف الجسرية الأكثر انتشاراً واستخداماً بسبب بساطة تكوينها وتصميمها وسهولة التحكم بعملها، كما تتميز هذه الوحدات بضياعات قليلة وبالتالي يكون مردود المبدل مرتفعاً. يبين الشكل (2) الدارة الأساسية للوحدة الفرعية نصف الجسرية وموجة جهد الخرج الناتج منها. تتكون هذه الوحدة من قاطعين S_1 و \bar{S}_1 ومن مكثف C. يتكون كل قاطع من ترانزستور IGBT ومن ديود موصول على التوازي وبشكل متعاكس مع الترانزستور. يكون عمل كل ترانزستور في هذه الوحدة مكملاً لعمل الآخر بحيث يتم ضبط وتنظيم الجهد المستمر v_c المكثف. يبين الشكل (3) نبضات القذح المطبقة على الترانزستورين ليكون عمل كل منهما مكملاً للآخر، حيث تمت عملية المحاكاة باستخدام برنامج ماتلاب من أجل تردد للإشارة الحاملة يساوي 500 Hz. يكون جهد خرج الوحدة الفرعية v_H مكوناً من مستويين 0 و v_c فعندما يكون القاطع S_1 مغلقاً يكون جهد خرج الوحدة مساوياً v_c وعندما يكون مفتوحاً يكون جهد خرج الوحدة مساوياً 0.



الشكل (3): نبضات القدر المطبقة على ترانزستوري الوحدة الفرعية نصف الجسرية عند تردد 500 Hz للإشارة الحاملة

3. نموذج ماتلاب للمبدل

يبين الشكل (4) نموذج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية الثلاثية الطور باستخدام بيئة Matlab – Simulink. يمثل هذا النموذج مبدلاً متعدد المستويات بأربع وحدات فرعية نصف جسرية في كل ذراع. تتوضع هذه الوحدات ضمن الصناديق العلوية والسفلية $S_{ap}, S_{bp}, S_{cp}, S_{an}, S_{bn}, S_{cn}$. يؤمن هذا النموذج إمكانية استخلاص موجات جهود وتيارات خرج المبدل وجهود مكثفات الوحدات الفرعية لكل طور، بالإضافة إلى موجة التيار الدوار في بنية المبدل.

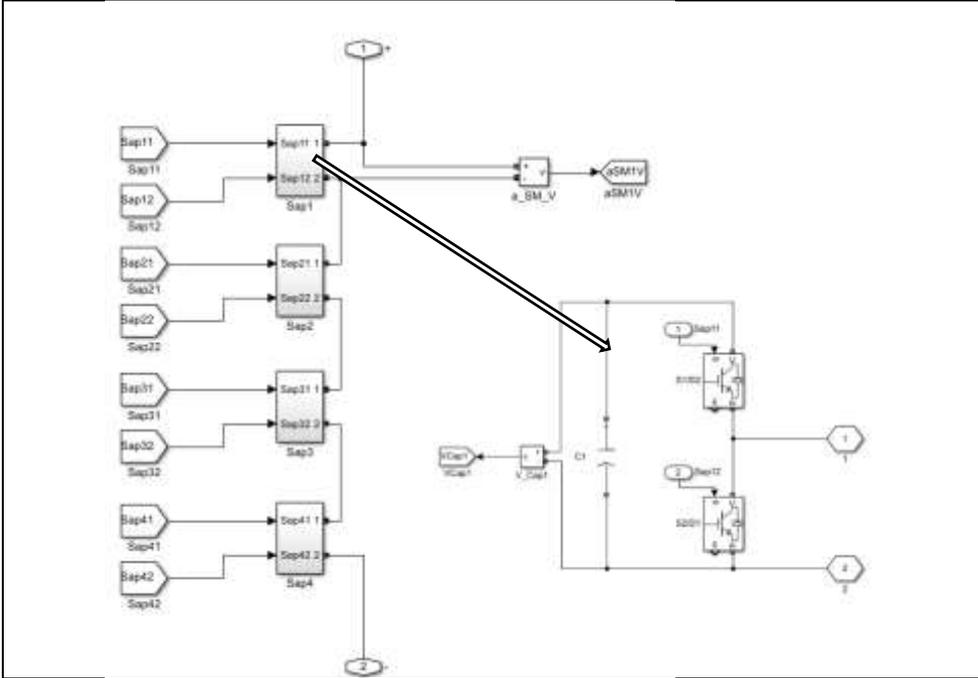


الشكل (4): نموذج المبدل MMC الثلاثي الطور المستخدم لدراسة تأثير تردد الإشارات الحاملة

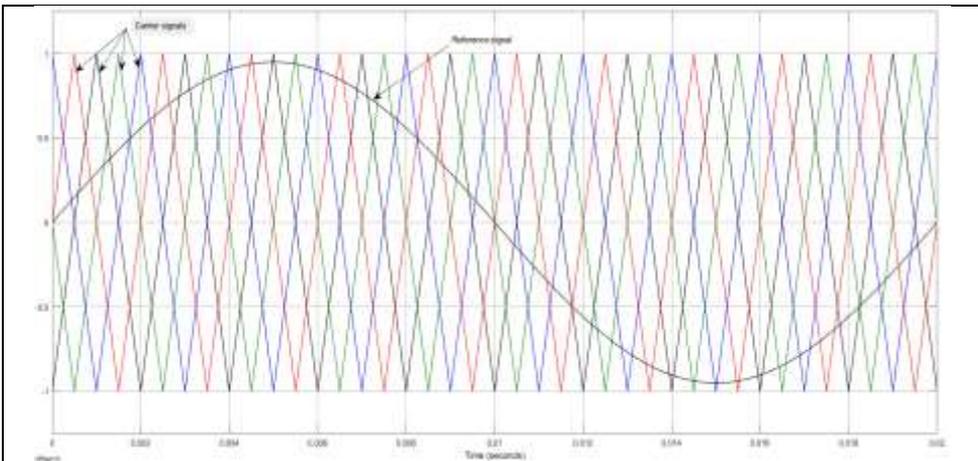
بهدف التحكم بعمل المبدل تم اختيار تقنية التعديل النبضي العرضاني بطريقة الحوامل المتعددة ذات الانزياح الطوري. وفقاً لهذه الطريقة فإن الإشارات الحاملة تتوضع بشكل أفقي وتكون ذات مطالات متساوية بانزياح طوري يحدده عدد الوحدات الفرعية في كل ذراع، حيث يكون عدد الإشارات الحاملة مساوياً لعدد الوحدات الفرعية في الذراع وتكون الإزاحة الطورية \emptyset بين هذه الإشارات مساوية لـ:

$$\emptyset = \frac{360^\circ}{N} \quad (1)$$

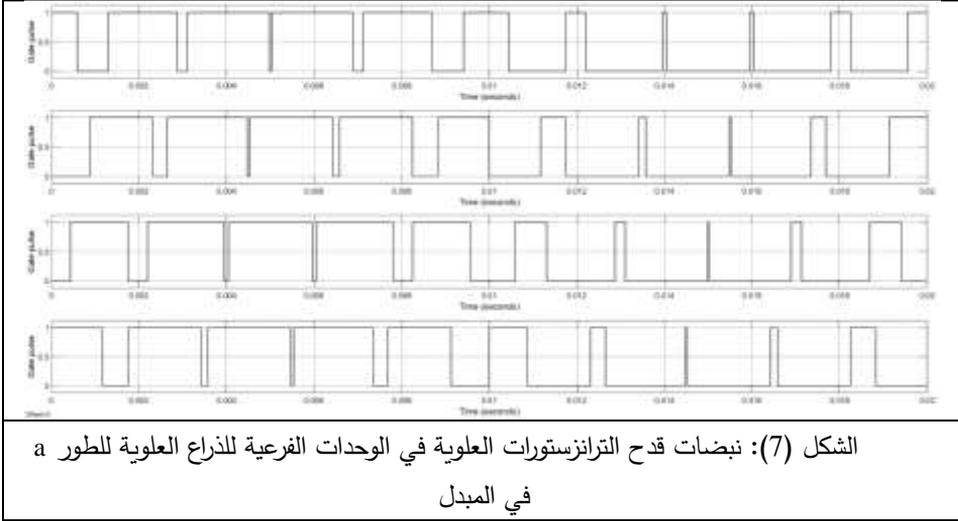
حيث N هو عدد الوحدات الفرعية في الذراع [16، 17]. في دراستنا هذه تم استخدام أربع وحدات فرعية في كل ذراع وبالتالي تكون الإزاحة الطورية بين الإشارات الحاملة مساوية 90° . يبين الشكل (5) نموذج الوحدات الفرعية المكونة لذراع المبدل ونموذج الوحدة الفرعية نصف الجسرية، ويبين الشكل (6) الإشارات الحاملة المثلثية ذات التردد 500 Hz والإشارة المرجعية ذات التردد 50 Hz ، المستخدمة لتوليد نبضات قرح ترانزستورات الوحدات الفرعية، كما يبين الشكل (7) نبضات قرح الترانزستورات العلوية في الوحدات الفرعية في الذراع العلوية للطور a للمبدل عند تردد 500 Hz للإشارات الحاملة. إن القيمة 500 Hz لتردد الإشارات الحاملة هي قيمة اختيارية هنا بهدف التوضيح.



الشكل (5): نموذج الوحدات الفرعية المكونة لذراع المبدل ونموذج الوحدة الفرعية نصف الجسرية المستخدمة



الشكل (6): الإشارات الحاملة المثالية ذات التردد 500 Hz والإشارة المرجعية الجيبية ذات التردد 50 Hz



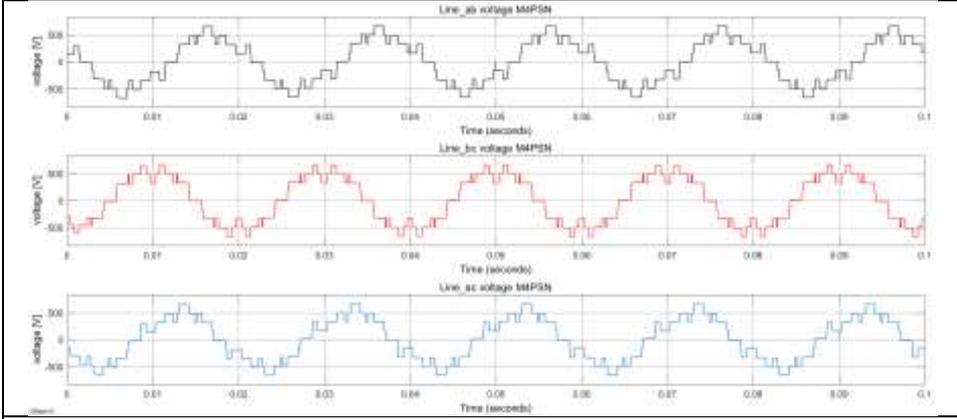
4. نتائج المحاكاة

انطلاقاً من نموذج المبدل المبين في الشكل (4) وبهدف دراسة تأثير قيمة تردد الإشارات الحاملة في أداء المبدل، تم تغيير تردد الإشارات الحاملة ضمن مجال يتراوح بين ضعفي وأربعين ضعف تردد الإشارة المرجعية ذات التردد 50 Hz وذلك من أجل قيمة ثابتة لدليل التعديل المطالي تساوي 0.95. كما تم اختيار قيمة جهد الدخل المستمر للمبدل بحيث تساوي 680 V وذلك للحصول على خرج موافق لجهد الشبكة الكهربائية أي بحدود 400 V كقيمة فعالة.

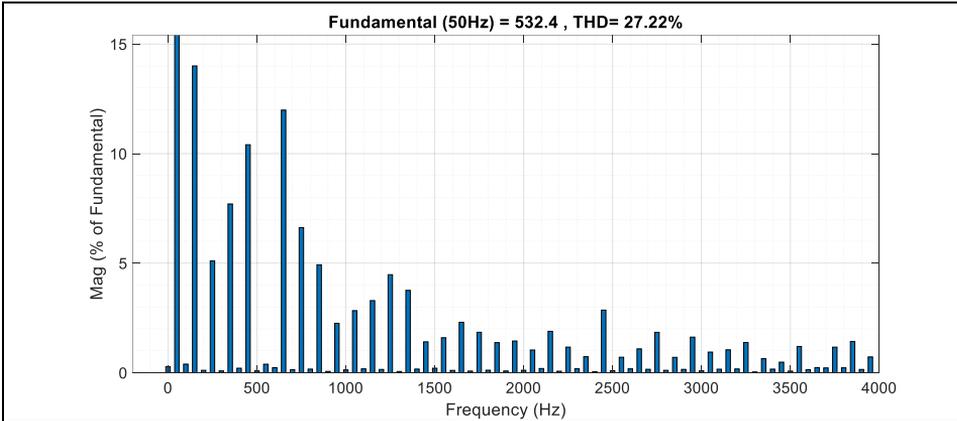
في الأشكال الآتية (من الشكل (8) وحتى الشكل (21)) سوف نبين نتائج المحاكاة من أجل حالتين لعمل المبدل: الحالة الأولى هي حالة العمل عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz والحالة الثانية هي حالة العمل عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 2000 Hz.

يبين الشكلان (8 و 9) موجات جهود الخطوط الثلاثية الطور في خرج المبدل والتحليل التوافقي لها عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz، ويبين الشكلان (10 و 11) موجات تيارات خرج المبدل والتحليل التوافقي لها عند تردد 100 Hz للإشارات الحاملة. يبين الشكلان (12 و 13) موجة التيار الدوار للمبدل والتحليل التوافقي لها، ويبين

الشكل (14) جهود مكثفات الوحدات الفرعية للطور a عند تردد 100 Hz للإشارات الحاملة.



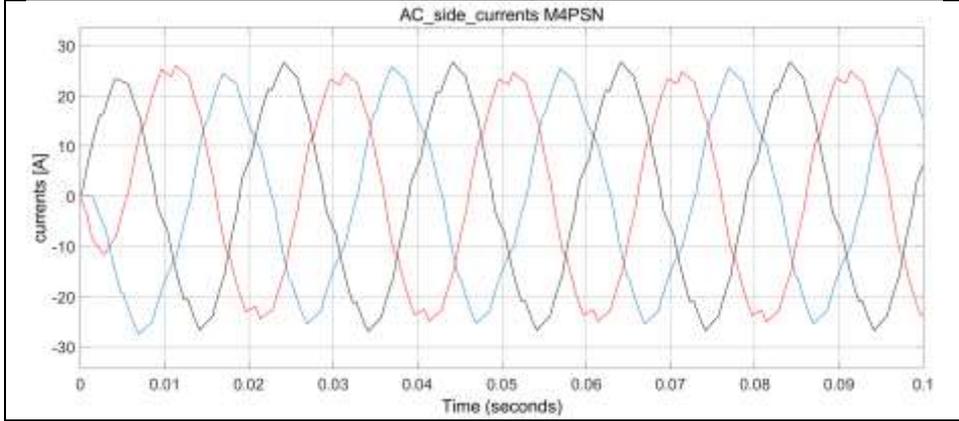
الشكل (8): موجات جهود الخطوط في خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz



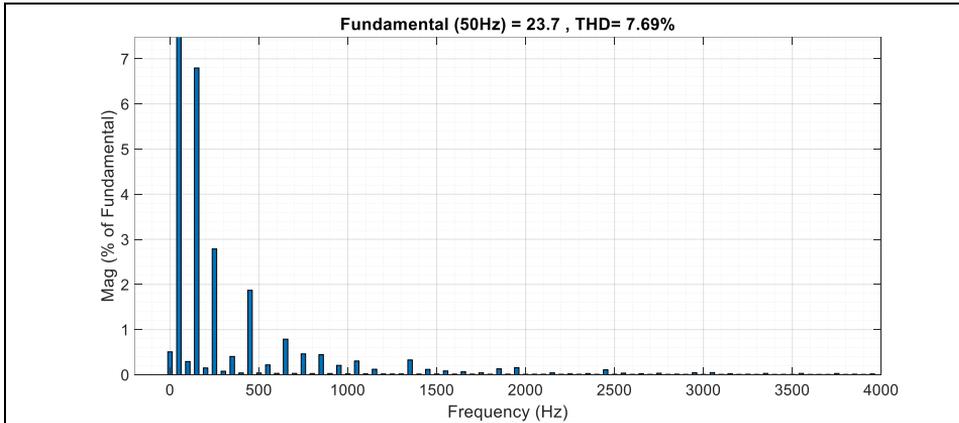
الشكل (9): التحليل التوافقي لموجات جهود الخطوط في خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz

يتضح من الشكل (8) أن موجة جهد الخط للمبدل مكونة من تسعة مستويات وهذا يتفق مع قواعد هذه المبدلات التي تنص على أن عدد المستويات في موجة جهد الخط يساوي $2N + 1$ حيث N هو عدد الوحدات الفرعية في الذراع (أربع وحدات في حالتنا المدروسة). يبين الشكل (9) أن التشوه التوافقي الكلي لموجة جهد الخط يساوي $THD = 27.22\%$ ، وأن مطال التوافقية الثالثة ذات التردد 150 Hz يشكل حوالي 14%

من مطال المركبة الأساسية ذات التردد 50 Hz، وبشكل عام فإن التوافقيات المؤثرة في موجة جهد الخط هي التوافقيات الفردية.

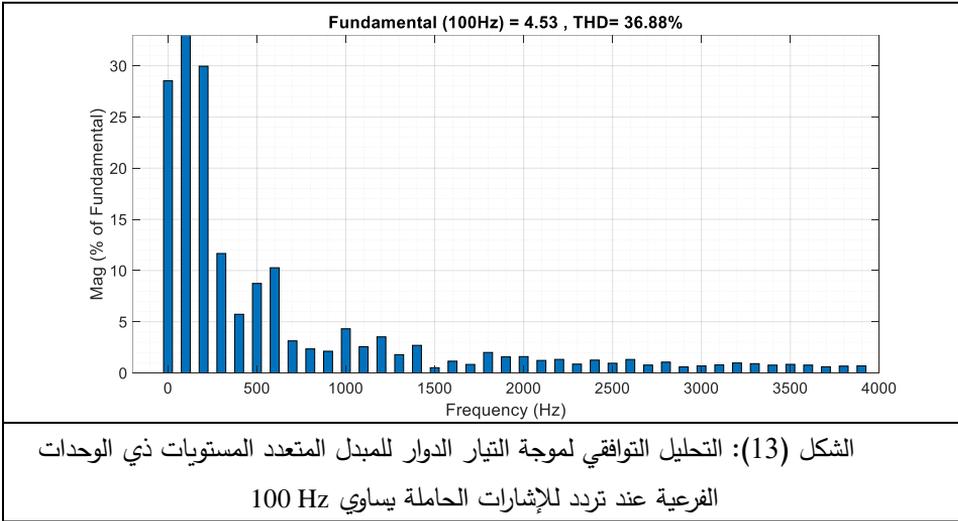
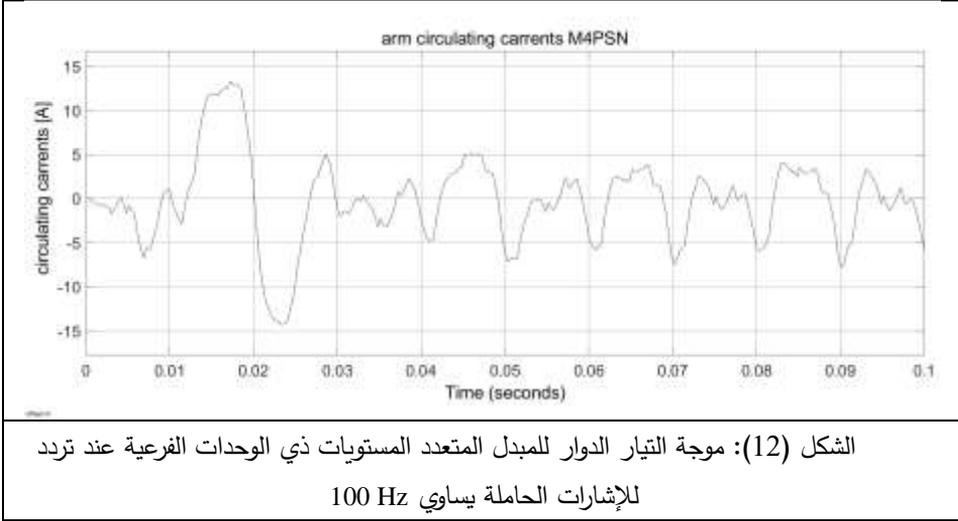


الشكل (10): موجات تيارات خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz

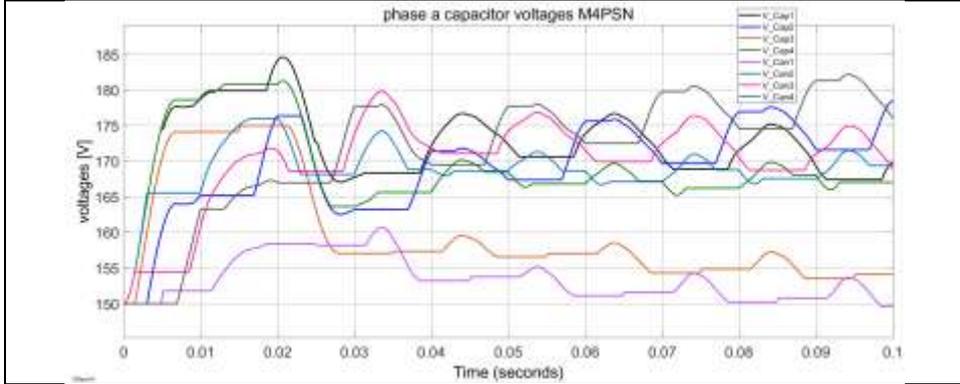


الشكل (11): التحليل التوافقي لموجات تيارات خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz

يتضح من الشكل (10) أن تيارات خرج المبدل هي موجات جيبية متناوبة بتشوه توافقي كبير وهذا ما يؤكد التحليل التوافقي في الشكل (11) الذي يبين أن التشوه التوافقي الكلي $THD = 7.69\%$ وأن مطال التوافقية الثالثة يشكل حوالي 7% من مطال المركبة الأساسية للتيار.



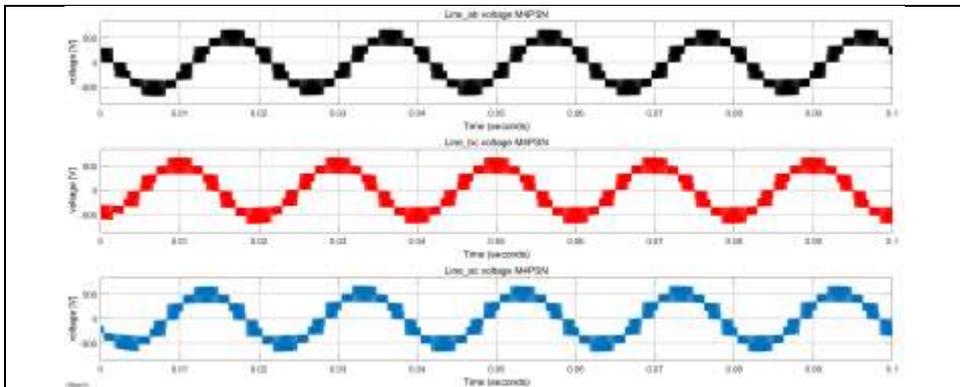
يبين الشكل (13) أن موجة التيار الدوار تتميز بمحتوى توافقي عالٍ جداً وأن التشوه التوافقي الكلي لها يساوي $THD = 36.88\%$ ، كما تتميز بوجود مركبة مستمرة عالية القيمة تبلغ حوالي 29% من مطال المركبة الأساسية. يدور هذه التيار ويغلق نفسه في بنية المبدل ولا يظهر في خرجه ويتسبب بنسبة كبيرة من ضياعات المبدل.



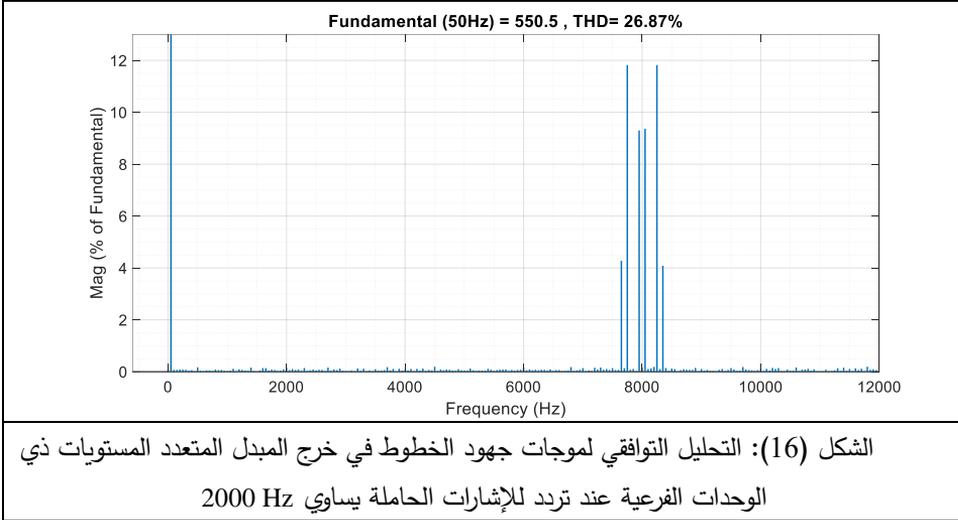
الشكل (14): موجات جهود مكثفات الوحدات الفرعية لطور a للمبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz

يتضح من الشكل (14) وجود انزياح كبير في موجات جهود مكثفات الوحدات الفرعية لطور المبدل أي غياب التوازن في هذه الجهود عند قيمة التردد المدروسة، كما أن نسبة التموج المحسوبة بلغت 3.6%.

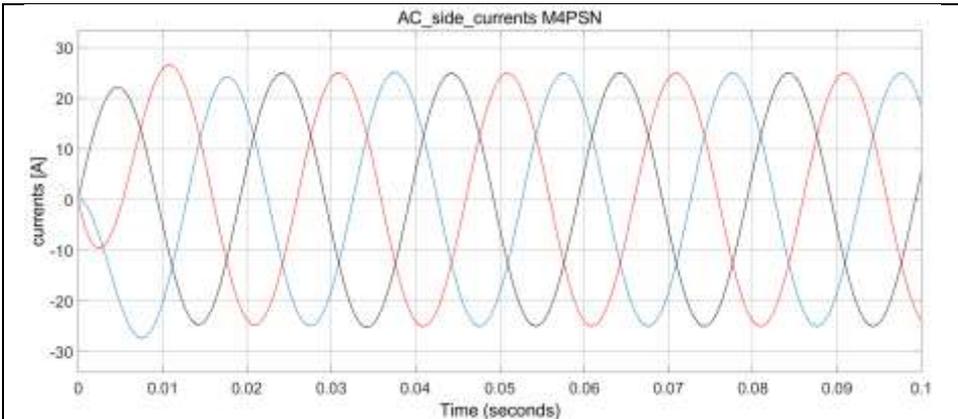
يبين الشكلان (15 و 16) موجات جهود الخطوط الثلاثية الطور في خرج المبدل والتحليل التوافقي لها عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 2000 Hz، ويبين الشكلان (17 و 18) موجات تيارات خرج المبدل والتحليل التوافقي لها عند تردد 2000 Hz للإشارات الحاملة. يبين الشكلان (19 و 20) موجة التيار الدوار للمبدل والتحليل التوافقي لها، ويبين الشكل (21) جهود مكثفات الوحدات الفرعية للطور a عند تردد 2000 Hz للإشارات الحاملة.

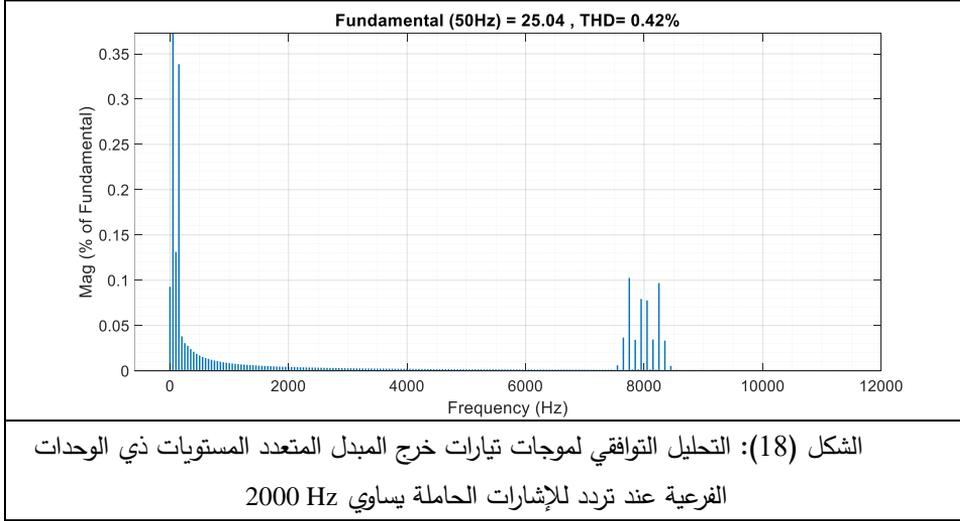


الشكل (15): موجات جهود الخطوط في خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 2000 Hz

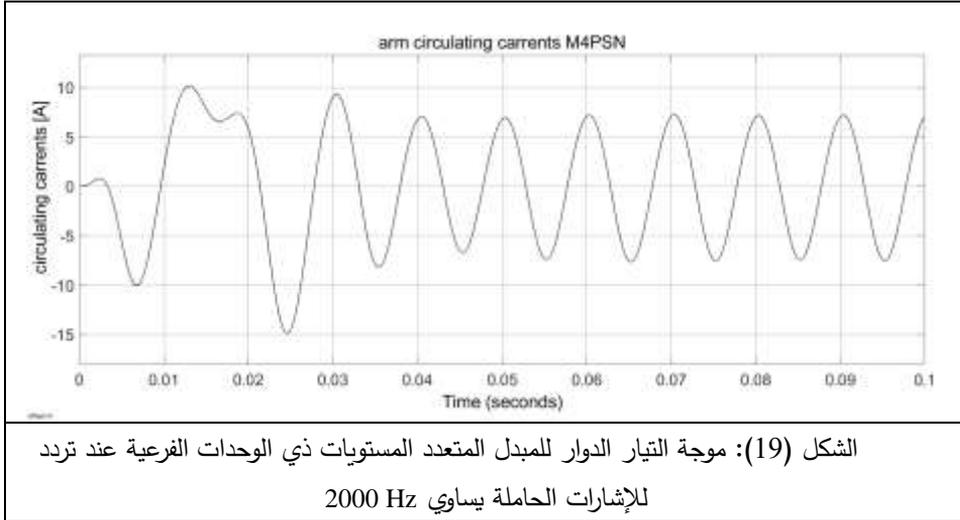


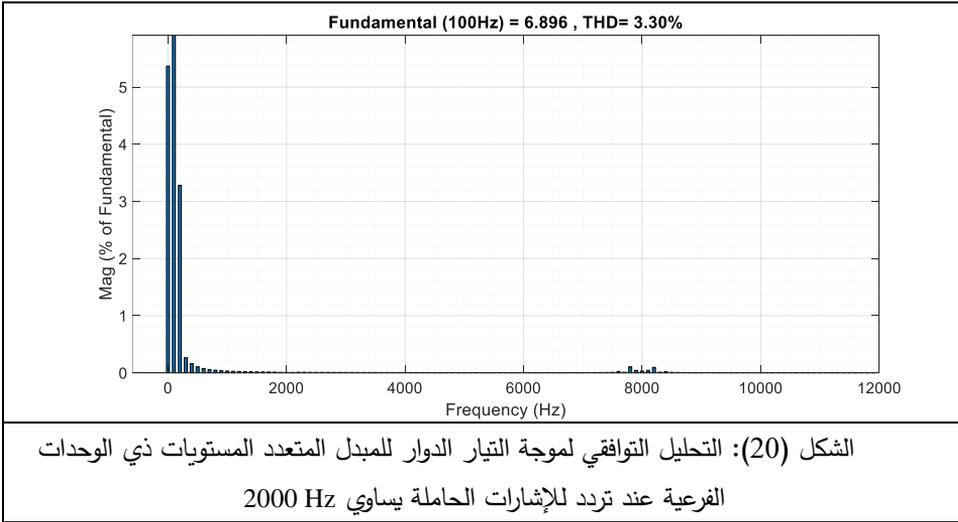
يبين الشكل (15) تحسن شكل موجة جهود الخطوط في خرج المبدل عند زيادة تردد الإشارات الحاملة إلى 2000 هرتز بالمقارنة مع حالة استخدام تردد 100 هرتز، كما أن المحتوى التوافقي قد انخفض وأصبح عدد مستويات جهد الخط البالغ تسعة مستويات أكثر وضوحاً. يبين الشكل (16) أن التشوه التوافقي الكلي يساوي $THD = 26.87\%$ وأن تردد التوافقيات المسيطرة قد ازداد بشكل كبير وهذه التوافقيات تتوضع بجوار التردد 8000 هرتز أي ما يعادل أربعة أضعاف تردد الإشارات الحاملة.



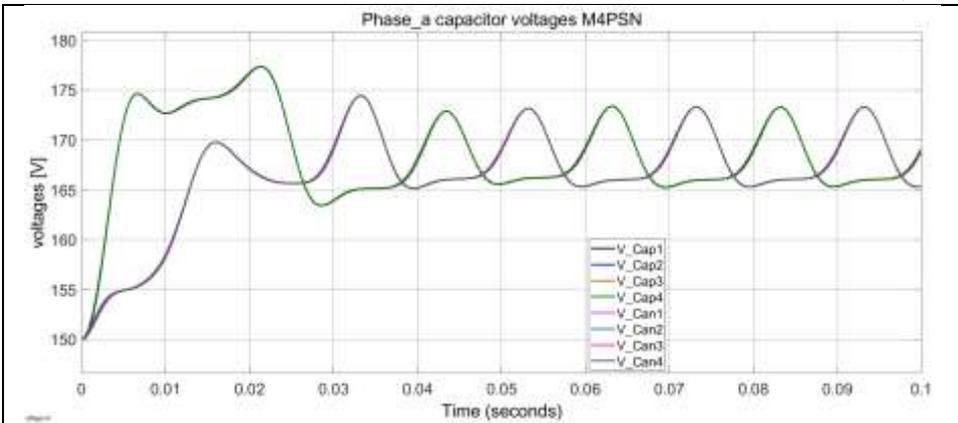


يبين الشكل (17) أن موجات تيارات خرج المبدل أصبحت جيئية نقية وأن المحتوى التوافقي لها ضعيف جداً، فبحسب الشكل (18) نجد أن التشوه التوافقي الكلي لموجة تيار الخرج يساوي 0.42%.





يبين الشكل (19) أن موجة التيار الدوار، وبعد تجاوز الحالة الابتدائية العابرة، أصبحت موجة جيبية شبه نقية بمحتوى توافقي مقبول جداً وأصبح واضحاً أن تردد موجة هذا التيار يساوي ضعفي تردد الإشارة المرجعية. يبين الشكل (20) أن التشوه التوافقي الكلي لموجة التيار الدوار يساوي $THD = 3.3\%$.



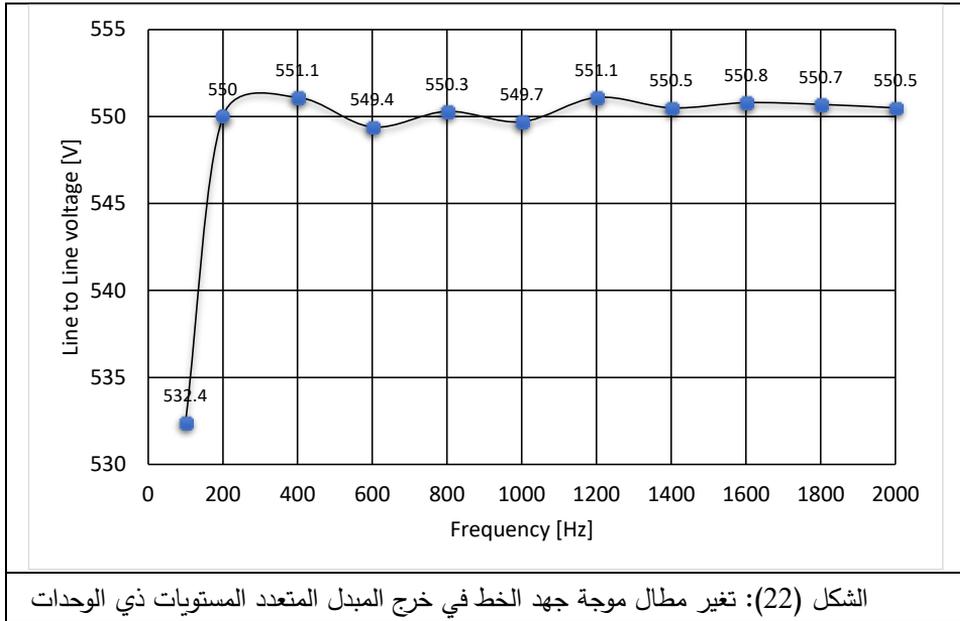
يتضح من الشكل (21) أن زيادة تردد الإشارات الحاملة إلى 2000 هرتز أدى إلى توازن جهود مكثفات الوحدات الفرعية لأطوار المبدل حيث نلاحظ حدوث انطباق موجات جهود مكثفات الوحدات الفرعية العلوية على بعضها البعض وكذلك الأمر بالنسبة لجهود مكثفات الوحدات الفرعية السفلية.

5. مناقشة النتائج

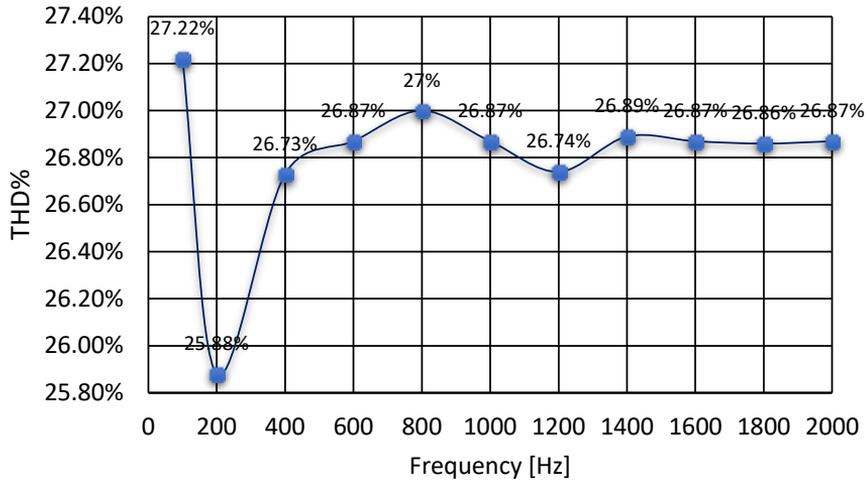
بينت نتائج المحاكاة لنموذج المبدل MMC ثلاثي الطور رباعي الوحدات الفرعية أن زيادة تردد الإشارات الحاملة يقود إلى تحسن في أداء المبدل من حيث الحصول على موجات خرج أكثر جودة ومن حيث تحقيق التوازن في جهود مكثفات الوحدات الفرعية وأيضاً الحصول على تيار دوار ذي محتوى توافقي مقبول.

بهدف توضيح تأثير زيادة تردد الإشارات الحاملة قمنا برسم تغيرات مطالات موجات جهود الخطوط والتيارات والتشوه التوافقي لها ونسبة التموج في جهود مكثفات الوحدات الفرعية وذلك عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 و2000 هرتز.

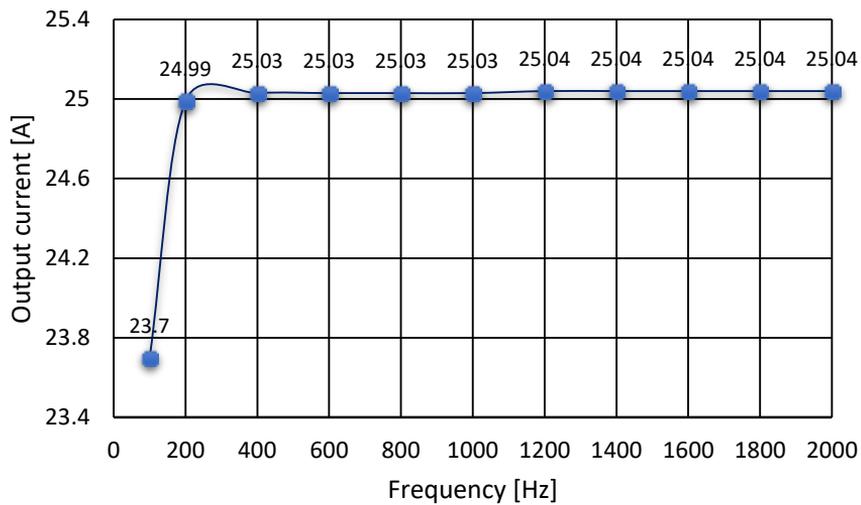
يبين الشكلان (22 و23) تغير مطال موجة جهد الخط وتغير التشوه التوافقي الكلي لموجة جهد الخط مع تغير تردد الإشارات الحاملة. يوضح الشكلان (24 و25) تغير مطال موجة تيار خرج المبدل والتشوه التوافقي الكلي لها بدلالة تغير تردد الإشارات الحاملة، ويبين الشكلان (26 و27) تغير مطال موجة التيار الدوار والتشوه التوافقي الكلي لها كما يبين الشكل (28) تغير نسبة تموج جهود مكثفات الوحدات الفرعية بدلالة تغير تردد الإشارات الحاملة.



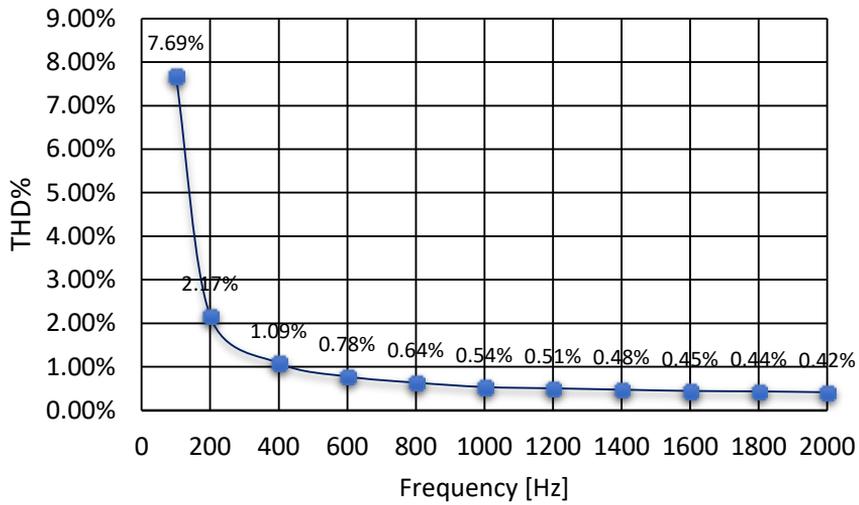
الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



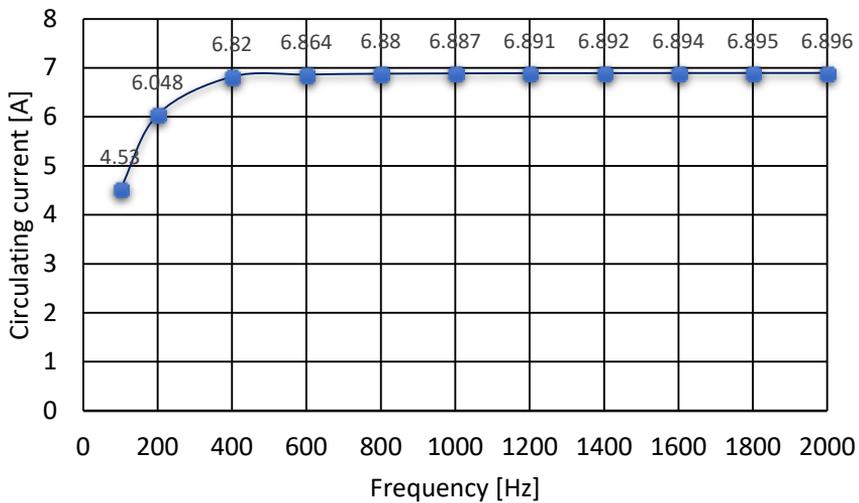
الشكل (23): تغير التشوه التوافقي الكلي لموجة جهد الخرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



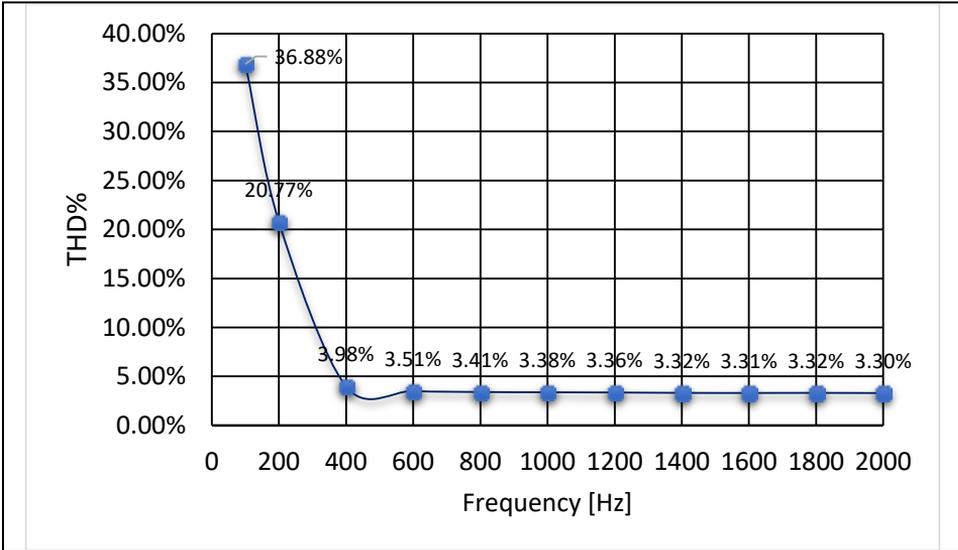
الشكل (24): تغير مطال موجة تيار خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



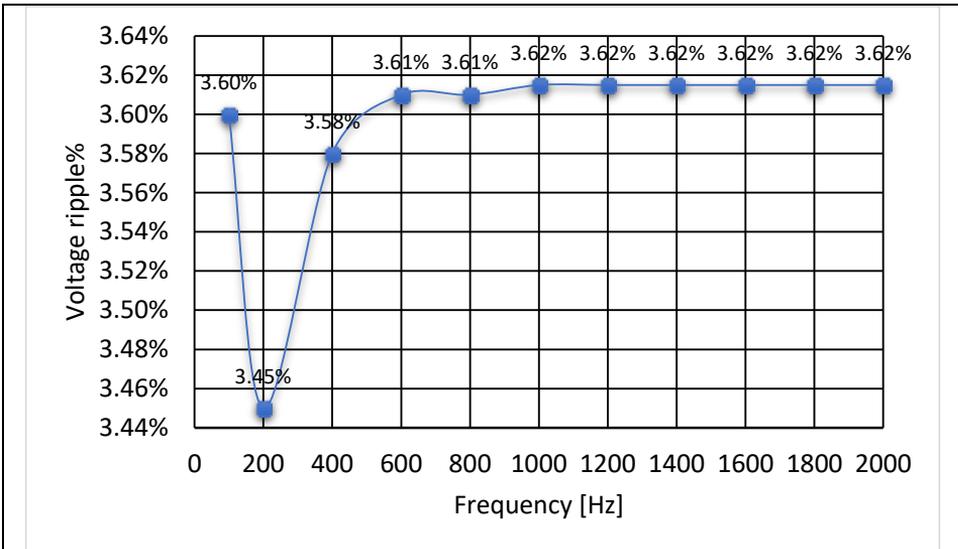
الشكل (25): تغير التشوه التوافقي الكلي لموجة تيار خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



الشكل (26): تغير مطال موجة التيار الدوار للمبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



الشكل (27): تغير التشوه التوافقي الكلي لموجة التيار الدوار للمبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



الشكل (28): تغير نسبة تموج جهود مكثفات الوحدات الفرعية للمبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz

توضح الأشكال (22 وحتى 28) أن تردد الإشارات الحاملة يؤثر بشكل أساسي في نوعية موجات تيارات المبدل حيث تؤدي زيادة هذا التردد إلى زيادة نقاوة الموجة

وانخفاض المحتوى التوافقي. بالنسبة لمطال جهد الخط فإن زيادة التردد من 100 وحتى 200 هرتز تؤدي إلى زيادة مطال الجهد من 532.4 V وحتى 550 V ل يبقى بعدها ثابتاً تقريباً على هذه القيمة، أما التشوه التوافقي الكلي لموجة جهد الخط فهو ضعيف التعلق بتردد الإشارات الحاملة والقيمة الوسطية له بلغت 26.8%. فيما يتعلق بتيار الخرج فيمكن ملاحظة زيادة مطاله من 23.7 A وحتى 25 A تقريباً عند تغير التردد من 100 وحتى 200 هرتز لتبقى هذه القيمة ثابتة تقريباً بعد ذلك (الشكل (24))، أما التشوه التوافقي الكلي في موجة تيار الخرج فهو ينخفض بشكل كبير من القيمة 7.69% عند التردد 100 هرتز إلى القيمة 1.09% عند التردد 400 هرتز ويتابع انخفاضه بعد ذلك ولكن بمعدل قليل (الشكل (25)). بالنسبة لمطال التيار الدوار فهو يزداد من 4.53 A إلى 6.82 A عند تغير التردد من 100 وحتى 400 هرتز ويبقى ثابتاً تقريباً بعد ذلك (الشكل (26))، أما التشوه التوافقي الكلي لموجة التيار الدوار فهو يتغير بشكل كبير حيث ينخفض من 36.88% عند التردد 100 هرتز إلى 3.98% عند التردد 400 هرتز ويتابع بعد ذلك انخفاضه بشكل طفيف (الشكل (27)). فيما يخص نسبة التموج في جهود مكثفات الوحدات الفرعية فيمكن القول إنها لا تتعلق عملياً بتردد الإشارات الحاملة أو إنها تتغير بشكل طفيف جداً والقيمة الوسطية لهذه النسبة تساوي 3.59% (الشكل (28))، أما تأثير التردد فيكون ملحوظاً على توازن جهود المكثفات كما تبين ذلك من مقارنة الشكلين (14 و 21) وقد بينت نتائج المحاكاة أنه انطلاقاً من قيمة 400 هرتز لتردد الإشارات الحاملة يكون هذا التوازن جيداً بشكل كافٍ.

6. الخاتمة

قمنا في هذا البحث بدراسة تأثير تغير قيمة تردد الإشارات الحاملة في أداء المبدلات الثلاثية الطور المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية، وذلك انطلاقاً من نموذج المبدل المكون من أربع وحدات فرعية في كل ذراع للمبدل. بينت نتائج الدراسة أنه وباستخدام تقنية التعديل النبضي العرضاني للتحكم في عمل القواطع الإلكترونية فإن تردد الإشارات الحاملة يؤثر بشكل أساسي في نوعية موجات تيارات المبدل وأن زيادة هذا التردد تقود إلى تخفيض التشوه التوافقي والحصول على موجات جيبيّة نقيّة. كما تؤثر

قيمة تردد الإشارات الحاملة في توازن جهود مكثفات الوحدات الفرعية وبزيادة التردد يزداد تحسن توازن هذه الجهود. بينت هذه الدراسة بشكل واضح أنه ليس من الضروري تشغيل المبدل عند ترددات عالية للإشارات الحاملة كما يفرضه استخدام تقنية التعديل النبضي العرضاني، ففي الحالة المدروسة تبين لدينا ان استخدام تردد بقيمة 400 هرتز (أي ثمانية أضعاف تردد الإشارة المرجعية) يكون كافياً للحصول على أداء ممتاز للمبدل من حيث نوعية الموجات الناتجة وتوازن جهود المكثفات. إن زيادة تردد الإشارات الحاملة وعلى الرغم من كونها مفيدة في تحسين نوعية موجات المبدل وتخفيض المحتوى التوافقي وتبسيط عملية الترشيح، إلا أنها تؤدي في الوقت نفسه إلى زيادة الإجهادات التي تتعرض لها القواطع الإلكترونية لوحدات المبدل بسبب عمليات الفصل والوصل السريعة وتؤدي إلى زيادة مفايد الإبدال للمبدل التي تتأثر بشكل كبير بزيادة التردد. بهدف تعميم نتائجنا هذه من المفيد إجراء نفس الدراسة على نماذج مبدلات بوحدات فرعية أكثر عدداً.

7. المراجع العلمية

- [1] H. Stemmler, "High-power industrial drives," *Proc. IEEE*, vol. 82, no. 8, pp. 1266–1286, Aug 1994.
- [2] L. M. Tolbert, F. Z. Peng, and T. G. Habetler, "Multilevel converters for large electric drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 1, pp. 36–44, Jan 1999.
- [3] S. Kouro, J. Rodriguez, B. Wu, S. Bernet, and M. Perez, "Powering the future of industry: High-power adjustable speed drive topologies," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 18, no. 4, pp. 26–39, Jul 2012.
- [4] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, and M. A. M. Prats, "The age of multilevel converters arrives," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 2, no. 2, pp. 28–39, Jun 2008.
- [5] M. Glinka and R. Marquardt, "A new ac/ac multilevel converter family," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 3, pp. 662–669, 2005.
- [6] A. Lesnicar and R. Marquardt, "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range," in *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, vol. 3, Jun 2003, pp. 23–26.
- [7] H. J. Knaak, "Modular multilevel converters and hvdc/facts: A success story," in *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, Aug 2011, pp. 1–6.
- [8] J. Glasdam, J. Hjerrild, L. H. Kocewiak, and C. L. Bak, "Review on multi-level voltage source converter based hvdc technologies for grid connection of large offshore wind farms," in *Power System Technology (POWERCON), 2012 IEEE International Conference on*, Oct 2012, pp. 1–6.
- [9] V. Khadkikar, "Enhancing electric power quality using upqc: A comprehensive overview," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 5, pp. 2284–2297, May 2012.
- [10] Z. Liu, J. Lu, Z. Ou, M. Ma, C. Yuan, X. Xiao, and H. Wang, "The start control strategy design of united power quality conditioner based on modular multilevel converter," in *Electric Machines Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International*, May 2013, pp. 933–937.
- [11] Asif A. Solangi Rameez Shaikh Noman Khan Pathan. Effects of Modulation Index on Harmonics of SP-PWM Inverter Supplying

- Universal Motor. (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 9, No. 7, 2018.
- [12] R. Mousa and S. Rabih, "Study of the effect of amplitude modulation index value on the output waves of the three-phase modular multi-level converters,". *Al-Baath University journal*, 2020.
- [13] R. Mousa and S. Rabih, "Effect of modulation index on the performance of the three phase modular multi-level converters," *2021 12th International Renewable Engineering Conference (IREC)*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IREC51415.2021.9427870.
- [14] S. Debnath, J. Qin, B. Bahrani, M. Saeedifard, and P. Barbosa, "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 1, pp. 37–53, Jan 2015.
- [15] A. Nami, J. Liang, F. Dijkhuizen, and G. Demetriades, "Modular multilevel converters for hvdc applications: Review on converter cells and functionalities," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 1, pp. 18–36, Jan 2015.
- [16] A. Dekka, B. Wu, N. Zargari, and R. Fuentes, "Dynamic voltage balancing algorithm for modular multilevel converter: A unique solution," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 2, pp. 952–963, Feb 2016.
- [17] E. Solas, G. Abad, J. Barrena, S. Aurtenetxea, A. Carcar, and L. Zajac, "Modular multilevel converter with different submodule concepts – part i: Capacitor voltage balancing method," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 10, pp. 4525–4535, Oct 2013.