

مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية
والكهربائية والمعلوماتية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 47 . العدد 10

1447 هـ - 2025 م

الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص

المدير المسؤول عن المجلة

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

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

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

الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص

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

. هاتف / فاكس : ++ 963 31 2138071

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

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

ISSN: 1022-467X

شروط النشر في مجلة جامعة حمص

الأوراق المطلوبة:

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

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

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

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

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

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

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

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

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

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

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

رسوم النشر في مجلة جامعة حمص

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

المحتوى

الصفحة	اسم الباحث	اسم البحث
42-11	د. معنز الحصريه	"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مُدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية "
60-43	د. م. سليمان يوسف	دراسة تأثير بارامترات القطع بالخراطة على قساوة الطبقة السطحية لمشغولات الفولاذ AISI 1025
96-61	د. م. يمان غازي	تأثير الشبكات الخاصة الافتراضية وخوارزمية التشفير AES و خوارزميات الترميز الصوتي على أداء بروتوكول VOIP (كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة حمص أنموذجاً)
138-97	م. سعاد دوار د. ياسر عملة د. عبد الكريم السالم	مقارنة أداء رادار MIMO و رادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية "

الباحث: الدكتور المهندس: معنز الحصريه

الملخص

إن الثورة الصناعية الرابعة والتطور التكنولوجي المتسارع يفرض الحاجة الدائمة إلى ابتكار مواد هندسية حديثة وتطوير المواد الهندسية التقليدية لتلبية المتطلبات الصارمة للتطبيقات الصناعية الحديثة من خفة في الوزن مع سلوك ميكانيكي مميز بتكاليف منخفضة ومن هنا ظهرت فكرة المواد المركبة المعدنية (MMCs) أو ما يُسمى "المعادن المدعمة" ونظراً للمكانة الصناعية للألمنيوم وسبائكه يتم حالياً تقويته بمواد تدعيم مختلفة بتقنيات تصنيع متنوعة والحصول على الألمنيوم المدعم (AMCs) بهدف تحسين خواصه الميكانيكية الأمر الذي من شأنه توسيع مساحة الاستخدام الصناعي له.

في هذا البحث تم تدعيم سبيكة (AA7075) بدقائق قاسية ميكروية من كربيد السليكون (SiC) بنسب وزنية (X= 5, and 10 wt%) و من كربيد البورون (B4C) بنسب وزنية (5, and 10 wt%) بشكل إفرادي ومن ثم تم التدعيم بشكل هجين بكلا النوعين من الكربيدات معاً (SiC + 5% B4C) بتقنية السباكة بالعصر أو بالضغط (SQT).

وقد أوضحت نتائج الفحص المجهرى توزيع الدقائق الداعمة الكربيدية بشكل شبه متجانس ضمن البنية الأساس للسبيكة (AA7075) وبالتالي نجاح عملية التدعيم و الحصول على الألمنيوم المدعم (AMCs) وفعالية تقنية السباكة بالعصر (SQT).

وقد بينت نتائج الاختبارات الميكانيكية أن القساوة ومقاومة الشد وإجهاد الخضوع ومقاومة الضغط ومقاومة الانحناء تحسنت مع إضافة كل من النوعين من دقائق التدعيم بشكل إفرادي وزيادة نسبتها وأن أفضل الخواص تم الحصول عليها بعد التدعيم المشترك بكلا النوعين معاً من الدقائق-العينة (S5) -بالمقارنة مع باقي العينات بنسبة تحسن بالخواص تجاوزت الـ (54%) حيث وصلت قيمة القساوة في العينة المذكورة إلى (155.3HV) وقيمة مقاومة الشد العظمى (274.6MPa) وقيمة

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية "

إجهاد الخضوع (205.3MPa) وقيمة مقاومة الضغط إلى (332MPa) وقيمة مقاومة الانحناء إلى (344Mpa).

الكلمات المفتاحية: سبائك الألمنيوم (AA7075) ، الدقائق الكربيدية، التدعيم الإفرادي، التدعيم الهجين، تقنية السباكة بالعصر ، الخواص الميكانيكية.

Manufacture of Metal Matrix Composites based Aluminum Alloy (AA7075) Reinforced with Different Carbide Particles by Squeeze Casting Technique (SQT) and Studying some of its Mechanical Properties

ABSTRACT

The Fourth Industrial Revolution and the technological development that is not required assume the need to create a new, modern and precise content for traditional materials and the modern need for low consumption of lightweight materials with specific control at costs. From here begins the idea of metal materials (MMCs) or what is called "reinforced metals". Given the industrial status of aluminum and its alloys, it is currently being reinforced with variable materials by various manufacturing technologies and obtaining (AMCs) to improve its mechanical properties, which would expand the space of industrial use for it.

In This research an aluminum alloy (AA7075) was reinforced with hard particles having size of micron of Silicon Carbide with a weight percentage (X= 5, and 10 wt%) and Boron Carbide particles are added in variable weight percentages (X= 5, and 10 wt%) Single and then better hybrid reinforced in both types of carbide (5% SiC + 5% B4C) by Squeeze casting technique (SQT).

The results of microscope have shown uniform distribution, Distribution of partially supported caridean particles as part of the alloy, reinforced Aluminum alloy successfully prepared and effectiveness of Squeeze casting technique.

The results of tests have show The VHN, UTS,YS , UCS, and Flexure strength were determined, with the addition of Single reinforcement particles and the increase in its percentage and. and that the best mechanical properties were obtained after hybrid reinforced in both types of carbide at reinforcement ratios (5% SiC + 5% B4C) (sample S5)compared to the rest of the samples with an improvement rate of studying properties exceeding (54%) as the hardness value in the mentioned sample reached (155.3 Hv), Ultimate tensile strength (274.6

(MPa), Yield strength(274.6 MPa), Compressive strength (332 MPa) and the Flexure strength(344 MPa) .

Keywords: AL-7075 alloys, Carbide Particles, Single reinforcement, Hybrid reinforcement ,Squeeze Casting ,Mechanical properties.

1. مقدمة:

تُعدُّ المواد المركبة المعدنية (**Metal Matrix Composites**) مواد مُرشحة لتطبيقات هندسية واستخدامات صناعية عديدة في مجال هندسة الطيران والفضاء والسيارات والصناعات العسكرية، وبديلة لمواد هندسية أخرى عالية التكلفة وغير مستقرة الخواص، و مواكبة لمتطلبات الثورة الصناعية من مواد ذات خواص خاصة مميزة حيث تقدم كفاءة أداة ميكانيكية بموثوقية أعلى من المعادن التقليدية المُفردة نتيجة لخواصها المُحسنة وخفة وزنها.

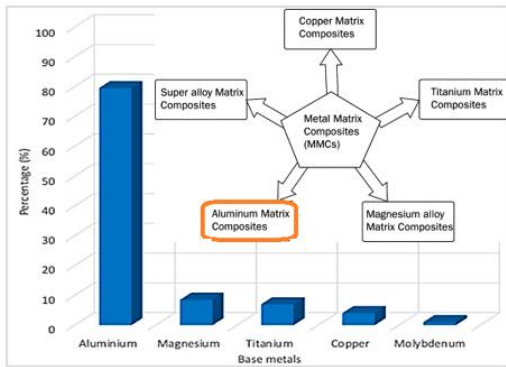
تتمتع سبائك الألمنيوم بخواص مُميّزة بالفعل تلبي المتطلبات التصميمية والتكنولوجية للتطبيقات الهندسية المختلفة إلا أن خواصها الميكانيكية كمقاومتها على الشد والضغط والانحناء وقساوتها منخفضة مقارنةً بمواد هندسية أخرى، حيث لا تزال بعض التطبيقات مُقتصرة على استخدام معادن مُحددة مرتفعة الوزن غالية الثمن ، ولن تتمكن من استخدام سبائك الألمنيوم - بهدف الاستفادة من خواصها المميزة - كمواد بديلة عن هذه المعادن مثلاً في تطبيق ما، إلا في حال تمكنا من تحسين خواصها الميكانيكية بنسب تحسن مميزة [2] [7].

لذلك لا يزال العمل البحثي مستمراً من قبل الدارسين في هذا المجال من أجل اقتراح واعتماد طرق جديدة لتحقيق التطوير والتحسين في الخواص الميكانيكية لسبائك الألمنيوم سواء بالتسبيك (إضافة العناصر السبائكية) أو عمليات التشكيل المتنوعة أو المعالجات الحرارية أو طرائق التدعيم المختلفة. ومن هنا تبرز أهمية وقيمة البحث الحالي في اعتماد ونشر وتوطين تقنية التدعيم الإفرادي والهجين كوسيلة في تحسين السلوك الميكانيكي لسبائك الألمنيوم بما يحقق إمكانية التوسع في استخدامها الصناعي.

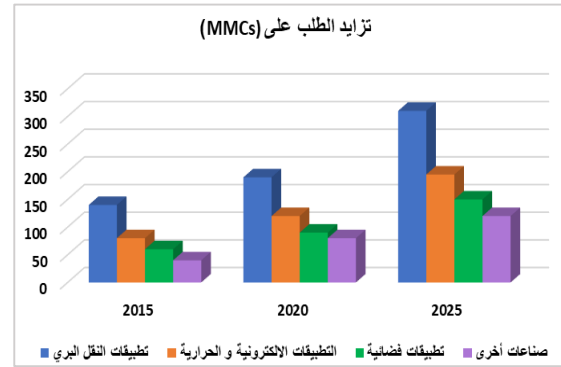
يوضح الشكل (1) تزايد الطلب على المواد المركبة ذات الأساس المعدني (MMCs) ما بين عامي (2015-2025) لأجل عديد التطبيقات الصناعية [2] [10] .

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية"

تكتسب سبائك الألومنيوم أهمية متزايدة (موضوع البحث) في التطبيقات الهندسية المعاصرة كبديل فعالة للمواد الهندسية التقليدية، ويُعزى هذا التحول إلى المزايا العديدة التي يوفرها الألومنيوم وسبائكه، علاوة على ذلك، تتميز سبائك الألومنيوم بوزن نوعي أقل، بالإضافة إلى فعالية من حيث التكلفة، مما يجعلها خياراً جذاباً لمختلف الصناعات [2] [3] ، وهو ما جعله أهم وأول سبائك المعادن الملونة الجاري تدعيمها في الوقت الحالي ثم يليه المغنيزيوم أما السبائك الأخرى الجاري تدعيمها بالإضافة لسبائك الألومنيوم و المغنيزيوم فهي موضحة بالشكل (2) [1] [2] [7] .



الشكل (2) أهم أنواع سبائك المعادن الجاري تدعيمها مع نسبة الاستخدام [2]



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

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

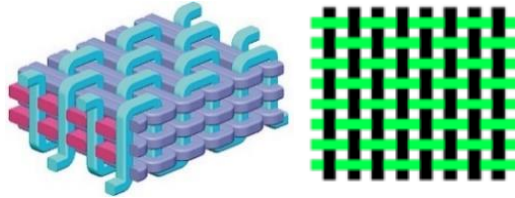
حيث إن الطرائق التقليدية للتدعيم تقوم على استخدام مادة تدعيم وحيدة (Single) بمقياس من مرتبة الميكرن (Micro scale) ويتموضع بسيط لمادة التدعيم ذات الطبيعية المعدنية أو السيراميكية أو الزجاجية لنحصل على : الألمنيوم المدعم بالدقائق (PAMCs) -الألمنيوم المدعم بألياف قصيرة أو شعيرات (SFAMCs) -الألمنيوم المدعم بألياف طويلة مستمرة (CFAMCs) - الألمنيوم المدعم بالطبقات (SLAMCs) [1] [7] . وهي موضحة كالتالي بالشكل (3):



الشكل (3) طرائق التدعيم التقليدية للألمنيوم

أما الطرائق المتطورة لتدعيم سبائك الألمنيوم : تعتمد على مواكبة التقنيات الحديثة والمتقدمة في التدعيم والتصنيع للحصول على ألمنيوم بخواص مميزة وتلافي العيوب والسلبيات في الطرائق التقليدية القديمة، ومن أهم الطرائق الحديثة لتدعيم سبائك الألمنيوم [7] [10]:

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

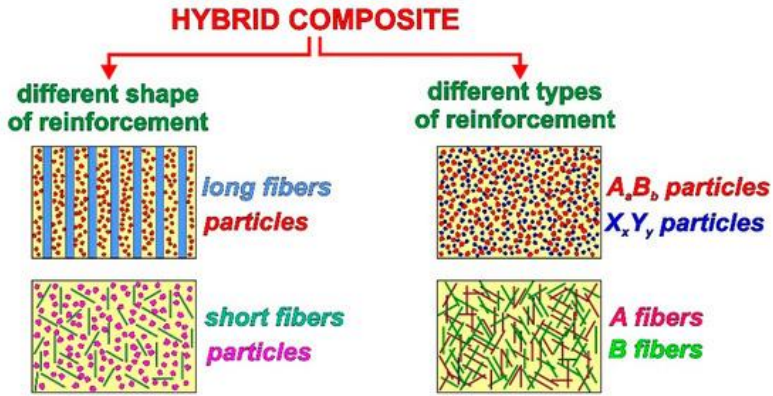


الشكل (4) التدعيم باستخدام شبكة -نسيج(2D-3D)

- (b) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام ألياف أو دقائق أو طبقات أو أنابيب نانوية Nano (composites AMNCs).
- (c) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام تقنية الساندويش تتم عن طريق ربط عدة طبقات صفائحية من الألياف الداعمة مع طبقات معدنية لتقويتها وتدعيمها (Sandwich Structure) . (composites
- (d) تدعيم سبائك الألمنيوم باستخدام تقنية التدعيم الهجين (Hybrid composites) (HAMCs) (التدعيم المُشترك) الطريقة (المعتمدة في بحثنا) والتي تعتبر تقنية هامة ومُتقدمة وقد بدأ هذا النوع من الألمنيوم المُدعم الهجين بالانتشار والتطور بعد عام (2010) (بسرعة فائقة والدخول في تطبيقات كثيرة ، يتم فيه تدعيم الألمنيوم هنا بخليط من أكثر من نوع من مواد التدعيم المذكورة سابقاً وله نوعين:

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مُدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية "

النوع الأول: مواد تدعيم مختلفة بالشكل: الجمع بين التدعيم بالدقائق والتدعيم بالألياف الطويلة والدمج بين التدعيم بالألياف والقصيرة والتدعيم بالدقائق أما النوع الآخر مواد تدعيم مختلفة بالنوع : التدعيم بنوعين مختلفين من الدقائق أو الألياف أو أكثر (دقائق نانوية-دقائق ميكروية) (ألياف كربون-ألياف زجاج) (دقائق أكسيد-دقائق كربيد). وكيفية التدعيم الهجين موضح بالشكل (5) [7] [10] [12] :



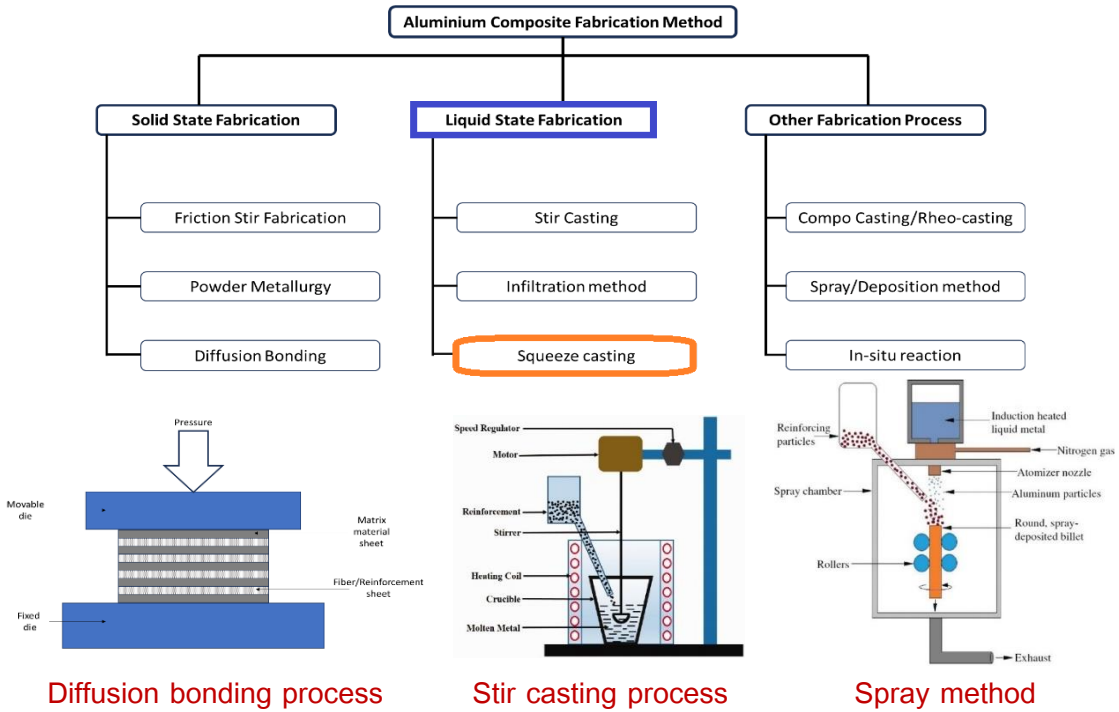
الشكل (5) طريقة التدعيم الهجين -المشترك-

يتم تنفيذ التدعيم لسبائك الألمنيوم بتقنيات تصنيع متعددة أغلبها حديثة و متطورة، وقد تم تعديل العديد من تقنيات التصنيع التقليدية لتناسب مع متطلبات تصنيع المعادن المُدعمة ويعتمد اختيار الطريقة الهندسية الأفضل وفق كمية وتوزيع وشكل المواد الداعمة ونوع المعدن الأساس وطبيعة التطبيق الذي سوف تدخل المادة المركبة المصنعة فيه.

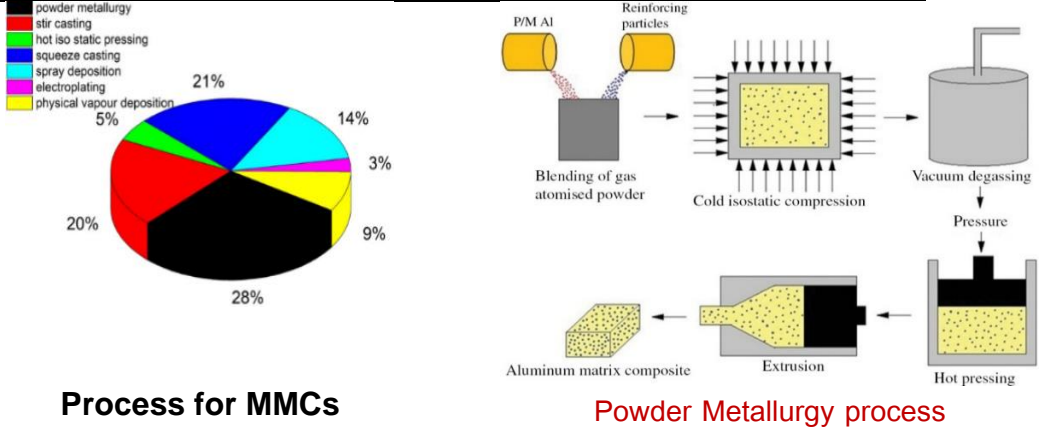
إن اختيار الطريقة الصحيحة لتصنيع (MMCs) يمثل أحد العوامل الأساسية لضمان نجاح المواد المركبة المعدنية، فالخصائص النهائية التي تتمتع بها المادة تعتمد بشكل مباشر على تقنية التصنيع المُختارة، وبارامترات هذه التقنية (درجة الحرارة، الضغط، زمن المعالجة)، إلى جانب نوعي المعدن الأساس والمادة الداعمة [7].

شهدت تقنيات تصنيع المواد المركبة تطوراً ملحوظاً على مر السنين، بهدف تحسين البنية المجهرية (الميكروية) والخواص الميكانيكية لـ (MMCs)، ويُعد التحدي الرئيسي في اختيار طريقة التصنيع المناسبة هو ضمان توزيع متجانس لأطوار التدعيم (سواء كانت دقائق أو ألياف أو خليط منهم) داخل المعدن الأساس، لتحقيق بنية خالية من العيوب المجهرية وضمان أداء عالي في التطبيقات

النهائية. وبشكل عام تصنف أساليب التصنيع المستخدمة في صناعة (MMCs) تبعاً لدرجة حرارة المعدن الأساس أثناء عملية تصنيع (MMCs) كما في الشكل (6) الذي يُظهر بعض طرائق تصنيع (MMCs) [1] [2] [7].



"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية"

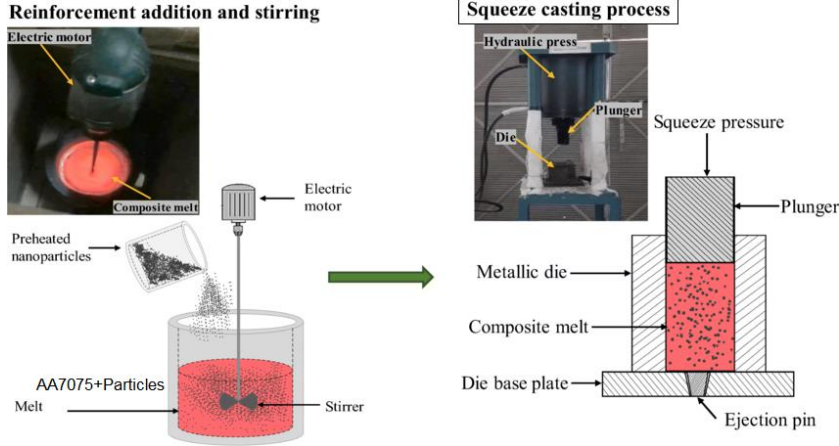


Process for MMCs

Powder Metallurgy process

الشكل (6) بعض طرائق تصنيع المواد المركبة المعدنية (MMCs) -تصنيف طرائق تصنيع من حيث الاستخدام [7]

تقنية السباكة بالعصر أو بالضغط (SQT= Squeeze Casting Technique) تعتبر أهم طرائق تصنيع المعادن المدعمة وأكثرها شيوعاً في الحالة السائلة (تحتل المرتبة الثانية من حيث تقنيات التصنيع عامةً بعد تقنية المساحيق PM) التي تكون فيها المواد الداعمة دقائق (P) أو ألياف قصيرة (SF) بنسبة وزنية قد تصل إلى (40%) تخلط مع مصهور المعدن الأساس بطرق التحريك الميكانيكية كما في الشكل (7) يتم بعد ذلك صب المواد المركبة المصهورة في قوالب الصب المُجهزة تحت مكبس وتعريضها لضغط قبل التجمد وتعتمد التقنية على تجميد المعدن تحت الضغط أحادي الاتجاه عادة $MPa (30 \rightarrow 150)$ (في بعض الأحيان تُصنع المادة الداعمة على شكل وسادة Perform ويصب عليها المعدن المصهور ثم يطبق ضغط العصر) و قد يتم معالجة المسبوكات فيما بعد بتقنيات تشغيل والمعالجة الحرارية المعروفة التي غالباً ما تكون قليلة وأحياناً نحصل على منتجات مُشكلة نهائية و تتميز هذه التقنية للتصنيع ببساطتها وسهولتها وفعاليتها والحصول على بنية ناعمة دقيقة نتيجة سرعة التبريد والتغلب على مشكلة قابلية التبلل والتقليل من المسامية والغازات والحصول على إنهاء جيد للسطح وخواص ميكانيكية جيدة وانخفاض تكلفتها من خلال انخفاض الهدر في المعدن مقارنة بالطرائق الأخرى مما جعلها من الأكثر انتشاراً وتطبيقاً بين باقي الطرق من سلبيات هذه الطريقة كثرة متغيراتها وشروطها وإن ضبط والتحكم بها يعدّ مفتاحاً لنجاح العملية وتحقيق البنية والخواص المطلوبة [7] [11].



الشكل (7) تقنية السباكة بالعصر (SQT) [7].

تبرز مبررات وأهمية البحث كما ذكرنا سابقاً نظراً للمكانة الاقتصادية العالية لسبائك الألمنيوم كونه يأتي بالمرتبة الثانية بعد الفولاذ من حيث الاستخدام ونظراً لتوافره وانخفاض سعره وخفة الوزن - مقاومة نوعية عالية - High Specific strength وما يتمتع به من ميزات عديدة وخواص ميكانيكية جيدة مقارنة بالسبائك التقليدية أتت الحاجة إلى تدعيمه لتحقيق متطلبات الأداء والموثوقية والتحكم بخواصه الميكانيكية من خلال طريقة التدعيم ونسبته ومتغيرات تقنية التصنيع لزيادة فعاليته ومساحة الاستفادة منه صناعياً - رفع الكفاءة ومستوى الأداء الكلي - بما يتوافق مع الحاجات في مجال السيارات والطائرات والتطبيقات الفضائية والتجهيزات الرياضية مع تحقيق التخفيض في التكلفة والوزن [1] [3] [7].

إن تدعيم سبائك الألمنيوم بالصفائح والألياف بأنواعها المختلفة تقيدته التكاليف الباهظة لمواد التقوية ولتصنيع الألمنيوم المدعم وصعوبة الوصول إلى الخواص المرجوة في كثير من الحالات وصعوبة التطبيق والحاجة إلى تجهيزات تصنيع خاصة و بالإضافة إلى تأخر في مواكبة التطورات التكنولوجية الحديثة نظراً لاستخدام تقنيات تصنيع محدودة كل ما سبق دفع إلى الاهتمام بتدعيم الألمنيوم بالدقائق المتنوعة من بين الطرائق التقليدية لانخفاض تكاليفه وسهولة تحقيق التدعيم باستخدامها وتعدد تقنيات تصنيع الـ AMCs المتأخرة عند التدعيم بالدقائق

سواء بشكل إفرادي (Single) أو هجين (Hybrid) [7] [10].

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية "

إن استخدام مواد تدعيم رخيصة وذات قابلية عالية للاندماج مع الأساس المعدني كالدقائق المتنوعة (مقارنة بمواد التدعيم الأخرى كالمواد النانوية NAMCs وشبكات التدعيم Woven والألياف المستمرة CF) عند التدعيم الهجين (Hybrid Reinforcement) أو ما يسمى التدعيم المزدوج (Daul Reinforcement) كطريقة تدعيم حديثة لسبائك الألمنيوم تحقق الجدوى الاقتصادية بالإضافة إلى الوصول إلى الخواص المطلوبة من خلال الاستفادة من جمع ومزج خواص دقائق التدعيم المُضافة معاً عدا عن سهولة تصنيع الألمنيوم الهجين المدعم بالدقائق وتعدد تطبيقاته وإمكانية التحكم بخواصه من خلال نسب ومواد التدعيم (ينطبق هذا أيضاً عند التدعيم الإفرادي) وقابلية إعادة التدوير من خلال الصهر وإعادة تشكيل مرات كثيرة [7] [12].

وأن ما يحقق فعالية عملية تصنيع الألمنيوم المدعم بالدقائق (AMCp) سواء عند التدعيم الإفرادي أو الهجين اختيار طريقة ملائمة ومجدية للتصنيع مثل تقنية السباكة بالعصر أو بالضغط (SQT) والتي تجمع ما بين السباكة بالترشيح (Infiltration) وعملية التشكيل بالطريق (Forging) وتتفوق تقنية (SQT) على باقي تقنيات التصنيع بالحالة السائلة كما ذكرنا من حيث انخفاض التكلفة والبساطة والمرونة وسهولة التطبيق وتميّز خواص المنتج المُصنع بها وهي معتمدة تجارياً [7] [9] [11].

وفي عديد من الحالات كون منتجات (SQT) شبه نهائية يمكن أن نكتفي بالمعالجة الحرارية فقط كعملية لاحقة في حال أردنا تعديل خواص (AMCs) الميكانيكية دون تغيير شكلها.

إن استخدام الضغط وضبطه بشكل مناسب خلال عملية تصنيع (AMCs) بطريقة السباكة بالعصر من شأنه تحسين الخواص الميكانيكية والتشكيل إلى الأجزاء النهائية بدقة عالية وتقليل العيوب الناتجة عن السباكة وتصحيح عيوب البنية وتحسين التجانس وهذا ما يُعزز من الأداء والسلوك الميكانيكي للمنتجات [3] [8].

لذا في هذا البحث تم تسليط الضوء على تصنيع مادة مركبة معدنية ذات أساس من سبائك الألمنيوم (AA7075) مدعمة تدعيماً إفرادياً ثم هجيناً باستخدام دقائق كربيدية مختلفة من (SiC-B4C) بتقنية (السباكة بالعصر SQT) ودراسة تأثير زيادة نسبة التدعيم من كل نوع من الكربيدات على حدا عند التدعيم الإفرادي وتحديد الأفضل من الكربيد المُستخدمين ومن ثم مقارنة التدعيم الإفرادي مع التدعيم الهجين باستخدام نوعي الكربيدات المختلفين معاً على

السلوك الميكانيكي: (القساوة - خواص شد والضغط - مقاومة الانحناء) على الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم المدعم الهجين المُصنع. بالرجوع إلى بعض الأوراق البحثية الحديثة التي تمحورت حول تقوية سبائك الألمنيوم بالدقائق المختلفة بتقنيات تصنيع متنوعة ودراسة تأثير التدعيم بنوعيه الإفرادي والهجين على خواصها الميكانيكية نجد ما يلي:

في مقالة (2020) تناول الباحثان (Nazeer and Safiulla) دراسة السبيكة AA6063 المُنتجة بطريقة السباكة بالمزج (SCT) والمدعمة بدقائق مختلفة وبشكل إفرادي من كربيد السيلكون وأوكسيد الألمنيوم وأوكسيد السيريوم CeO₂ بنسب (X = 0, 2, 4, 6, 8%) وقد بينت النتائج أن ازدياد نسبة التدعيم و إجراء التشكيل بالبتق على الباراد أدى إلى تحسين القساوة وخواص الشد مع انخفاض المتانة الصدمية وانخفاض معدل الاهتراء وازدياد نسبة التدعيم حسن من السلوك الميكانيكي و التدعيم بكربيد السيلكون أعطى أفضل النتائج [4].

في عام (2022) قام الباحث (Lemine) وآخرون بتدعيم الألمنيوم بدقائق من الكرييدات القاسية من كربيد البورون B₄C وكربيد النيوبيوم NbC بنسب متغيرة بتقنية المساحيق (Powder metallurgy) بشكل إفرادي ومن ثم هجين و قد أظهرت نتائج الدراسة أنه مع زيادة نسبة الدقائق تتحسن الخواص الميكانيكية المدروسة (القساوة ومقاومة الضغط ومعامل يونغ) وكانت أفضلها عند نسبة تدعيم هجين (2%B₄C+5 %NbC) [5].

في دراسة نُشرت في (2022) تطرق الباحث (Haripriya) وفريقه البحثي إلى مقارنة بعض خواص الألمنيوم النقي المدعم بدقائق من أوكسيد التيتانيوم بشكل إفرادي بنسب متزايدة وصلت حتى (9%) والمصنعة بطريقة السباكة بالمزج أو بالتحريك (SCT) مع خواص الفولاذ متوسط الكربون (MCS) وقد أظهر البحث تفوق الفولاذ بالخواص بالرغم من ارتفاع مقاومة الشد الأعظمية ومقاومة الضغط ومقاومة الانحناء والقساوة مع انخفاض في الاستطالة لمعظم عينات الألمنيوم المدعم وذلك مع ازدياد نسبة التدعيم بالأوكسيد [6].

في ورقة بحثية عام (2024) صنَّع (Seshappa) وزملائه سبائك الألمنيوم المدعم الهجين بتقنية السباكة بالعصر أو بالضغط (Squeeze Casting) حيث تم تقوية سبيكة الألمنيوم (AA7075)

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية "

بدقائق مختلفة من الألومينا بنسبة ثابتة (3%) ودقائق أوكسيدية من Rice Husk) (Ash) بنسب متغيرة (5%, 10%, 15%) تدعياً مشتركاً مع تطبيق ضغط على الألمنيوم المدعم يصل إلى (60Mpa) وقد أظهرت النتائج نجاح إنتاج الألمنيوم الهجين من خلال الصور المجهرية وتحليل XRD وتحسن في السلوك الميكانيكي على الشد والقساوة وتفاوت في المتانة الصدمية مع ازدياد نسبة دقائق التدعيم المُضافة [8].

في (2024) قام الباحث (Habelalmateen) وآخرون بتدعيم الألمنيوم AA6105 بدقائق من كربيد السيلكون وكربيد التيتانيوم بشكل هجين بتقني (السباكة بالمزج SCT) والسباكة بالعصر (SQT) وإجراء المقارنة بين تأثير الطريقتين على مقاومة الشد والقساوة للعينات المدعمة عدا عن ذلك عمل الباحثون على دراسة تأثير مجموعة من متغيرات التصنيع على الخواص في كلا الطريقتين (سرعة الخلط-زمن الخلط-نسبة التدعيم) وقد وجد الباحثون أن تقنية السباكة بالعصر (Squeeze Casting) أعطت نتائج أفضل من السباكة بالمزج (Stir Casting) من حيث الخواص المدروسة وأن تأثير المتغيرات على الخواص اختلف من حيث الأهمية حسب تقنية التصنيع المتبعة [9].

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

في أحدث الدراسات (2025) عمل كل من (Yakoub) (Bakrey) على تدعيم سبيكة AA 6061 بمواد تدعيم مزدوجة من دقائق ميكروية من أوكسيد التيتانيوم و كربيد السيلكون باستعمال تقنية السباكة بالتحريك الميكانيكي (SCT) ومن ثم مقارنة التدعيم الإفرادي بكل منها على حدا مع التدعيم الهجين بكلا النوعين للوصول للخواص الميكانيكية الأمثل من خلال دراسة ثنائي حالات للتدعيم وقد أظهرت النتائج نجاح إنتاج الألمنيوم الهجين وتحسن في مقاومة الانحناء والقساوة ومقاومة الشد الأعظمية مع زيادة نسب دقائق التدعيم لكل نوع حتى حد معين (8%)

ولكن أفضل النتائج على الشد والانحناء والقساوة كانت بعد عملية التدعيم الهجين بالأوكسيد والكربيد بنسبة (8%) أوكسيد ونسبة (6%) كربيد العينة [12]S8.

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

2. هدف البحث:

1. تصنيع الألمنيوم المدعم بدقائق الكربيدات المختلفة (AMCs) بتقنية السباكة بالعصر (SQT) انطلاقاً من السبيكة الأساس (AA7075) ودراسة الخواص الميكانيكية - القساوة وخواص الشد والضغط ومقاومة الانحناء - لسبيكة (AA7075) عند زيادة نسبة دقائق التدعيم بشكل إفرادي دقائق (SiC) حتى (10%) ودقائق (B4C) حتى (10%) وإجراء المقارنة بينهم.
2. دراسة تأثير التدعيم الهجين بدقائق النوعين من الكربيدات معاً بنسبة (5% SiC + 5% B4C) في الخواص الميكانيكية المدروسة لسبيكة (AA7075) ومقارنته مع التدعيم الإفرادي بكل نوع على حدا.
3. التوصل إلى مواد هندسية حديثة ذات أساس معدني من سبائك الألمنيوم (AA7075) وفق نسب تدعيم محددة والحصول على تصور أوضح حول ربط نوع ونسبة الدقائق الداعمة وطريقة التدعيم (إفرادي-هجين) بتغير خواص الألمنيوم المدعم الناتج بما يتلاءم مع التطبيق المطلوب وبالتالي توقع مجال الاستخدام صناعياً.

3. مواد وطرق البحث :

1.3 المواد الأولية المُستعملة لتصنيع الألمنيوم المدعم (AMCs):

1.3.1 المعدن الأساس (Metal Matrix):

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

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية"

الجدول (1) التركيب الكيميائي لسبيكة (AA7075)

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

1.3.2 مواد التدعيم (Reinforcement Materials):

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

1.3.3 مواد مساعدة (Added Materials):

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

2.3 التجهيزات المُستعملة لتحضير (AMCs) بطريقة السباكة بالعصر (SQT):

2.3.1 تجهيزات السباكة بالعصر Squeeze Casting Set up:

تضم الأجزاء التالية الموضحة بالشكل (8) (9) [7] [8] [9] [11]:

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

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

*فرن الصهر: النوع (CurboLite, Hope watt: 3100 w) فرن كهربائي استطاعته $3Kw$ بدرجة قصوى $1200C^\circ$ لصهر الألمنيوم (AA7075) وضمنه تتم عملية الخلط وقد تم تركيب قاعدة حاملة لآلية الخلط أعلى الفرن وتم تجهيز الفرن بمنظم حساس لضبط درجة الحرارة.

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

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

2.3.1. قالب الصب المعدني Metal Mold :

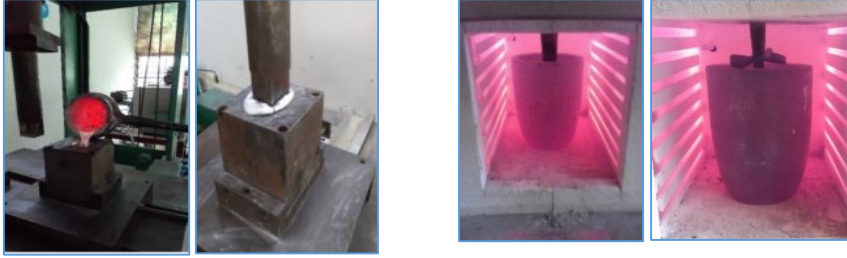
قمنا بتصنيع قالب الصب المعدني من الفولاذ في المخبر الجامعي للتشغيل المبرمج على الفارزة المبرمجة مع تجهيزه بفتحة لصب الألمنيوم المدعم عن طريق البوتقة ومن خلال هذه الفتحة بعد الانتهاء من الصب يتم تسليط الضغط على الألمنيوم المدعم بالإضافة لفتحة أسفل القالب للفظ المنتج بعد التجمد الشكل(9).

2.3.2. ميزان حساس Weighing Machine :

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



"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية "



الشكل (9) مكبس الضغط - قالب الصب المعدني - حامل البوتقة - تطبيق ضغط العصر (50 MPa)

الشكل (8) فرن الصهر - ميكانيزم الخلط - بوتقة الصهر - منظم الحرارة - وحدة ضبط السرعة - عبوات دقائق الكريد

3.3.3 طريقة تنفيذ البحث:

3.3.1 تصنيع الألمنيوم المدعم [7] [8] [9] [11] [12]:

يتم تقطيع بيليت الأساس (AA7075) إلى قطع صغيرة ووزنها وتحديد أوزان دقائق الكرييدات المضافة بنوعيتها حسب النسب الوزنية المطلوبة (wt%) في العينات المدروسة ثم وضع قطع الألمنيوم في البوتقة الغرافيتية داخل الفرن ورفع درجة حرارته إلى $850C^{\circ}$ لضمان انصهار السبيكة التام وبعد التأكد من انصهار الألمنيوم يتم خفض درجة الحرارة ضمن الفرن إلى درجة حرارة $750C^{\circ}$ ليتم إضافة الدقائق الداعمة (B4C- SiC) المعلومة الحجم والوزن والنسبة والمُسَخنة مسبقاً إلى درجة الحرارة حوالي $200C^{\circ}$ لخمس دقائق وذلك لإزالة الرطوبة والغازات الممتصة وتنظيف السطح من طبقة الأكاسيد وتحسين توزيع الدقائق داخل المصهور تتم الإضافة بشكل إفرادي ثم بشكل مشترك ويتم معها إضافة كمية قليلة من المغنيزيوم (لا تتجاوز 1%) لتحسين التبلل أيضاً ولتعويض الفقد نتيجة الاحتراق والتأكسد مع تنفيذ الخلط يدوياً بقضيب مزج لضمان تجانس التوزع، بعد ذلك يتم إدخال الخلاط الميكانيكي في المصهور ضمن البوتقة الموجودة داخل الفرن وتدويره بسرعة (400r.pm) ولمدة (15min) للحصول على دوامة ضمن المصهور Vortex

(تم اختيار هذه الشروط اعتماداً على مجموعة تجارب تحضيرية قمنا بها وعلى الدراسات المرجعية) ونتيجة لفعل الدوامية يتم سحب خليط الدقائق الى داخل المصهور وتوزيعه خلاله وأثناء عملية الخلط يتم إعادة تسخين الخليط إلى درجة الحرارة $800C^{\circ}$ لتحسين انتشار وتوزيع الدقائق الداعمة ضمن المصهور وبعد انتهاء الخلط وعند درجة الحرارة $800C^{\circ}$ تتم عملية صب خليط الألمنيوم والدقائق في القالب المعدني المُسخن مسبقاً لدرجة حرارة $200C^{\circ}$ لتلافي التجمد المسبق للمصهور وللتقليل من عيوب السباكة والموضوع تحت المكبس وعند الانتهاء من الصب وامتلاء القالب يتم تطبيق ضغط Squeeze Pressure مقداره (50MPa) لزمن Pressure time مقداره حوالي (60 sec) وأخيراً بعد التجمد (Solidification) يتم لفظ العينات من داخل القالب بعد تبريده الشكل (9) (10) وتكرر العملية عدة مرات وفقاً للنسب المطلوب إضافتها من الدقائق الداعمة الأساس لنحصل على ست عينات لكل اختبار (S0, S1, S2, S3, S4,) والجدول (2) يوضح بارامترات (SQT) المُستخدمة أثناء التصنيع [8] [9]:

الجدول (2) بارامترات (SQT) المستخدمة أثناء التصنيع

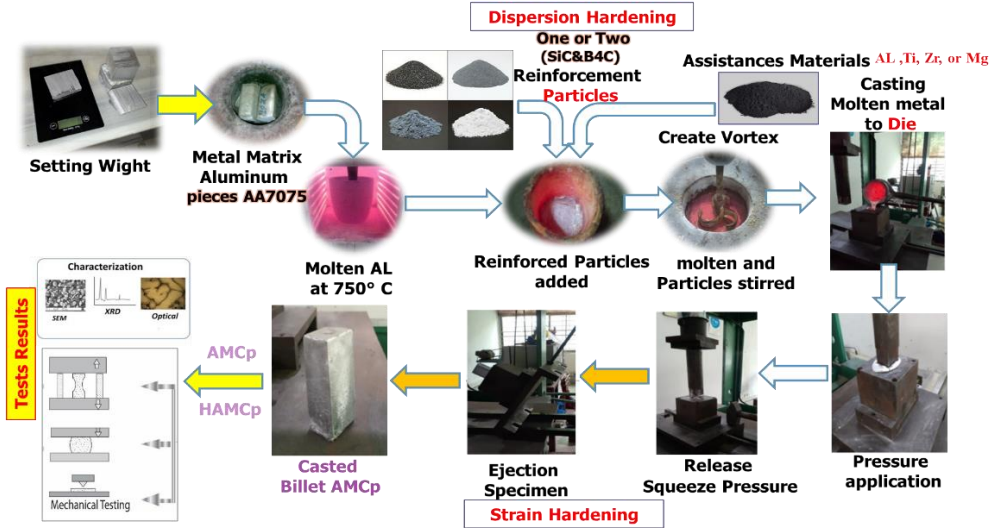
Squeeze Casting Parameters	
Preheating temperatures of reinforcements	($200C^{\circ}$)
Preheating temperatures of die	($200C^{\circ}$)
Spindle speed	(400r.p.m)
Stirring time	(15 min)
Stirring temperature	($750C^{\circ}$)
Squeeze Pressure	(50MPa)
Pressure time	(60sec)

بعد عملية التدعيم ستكون المسبوكات مُجهدة نتيجة عملية التجمد لذا تم إجراء عملية المُجانسة (Homogenization) (إحدى عمليات التخثير) لجميع مسبوكات الألمنيوم المُدعمة لتحقيق

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مُدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية"

التجانس وإزالة الإجهادات الداخلية بالتسخين لدرجة 410°C وإبقاء لزمان 2hour ثم تبريد بطيء بجر الفرن لتكون العينات جاهزة للاختبارات [7] [10].

وبالتالي يمكن تلخيص خطوات تنفيذ البحث كما في المخطط التالي الشكل (10):



الشكل (10) مخطط تنفيذ البحث الذي أنجز في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

4.3. التجهيزات المستعملة لإجراء الفحوصات والاختبارات الميكانيكية:

وهي موضحة بالشكل (11):



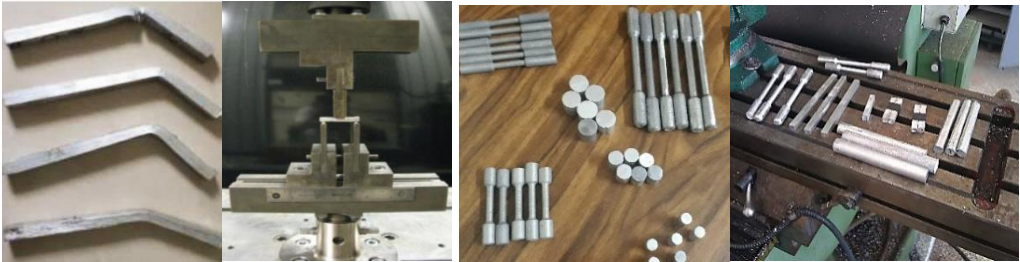
الشكل (11) أجهزة الفحص والاختبارات : (السيكرومتر - المجهر الضوئي -جهاز الشد والضغط والانحناء- جهاز القساوة) في مخبر علم المواد والمعالجات الحرارية بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة حمص.

قبل إجراء الاختبارات على العينات المدعمة تم تقسيمها إلى ست عينات وفقاً لنسب المواد المُضافة (نسب التدعيم) (S0, S1, S2, S3, S4, S5) وبعد ذلك تم تجهيز العينات (مع عينات إضافية عند نفس الشروط لتحقيق من النتائج) بعمليات التشغيل للاختبارات الميكانيكية وفق (ASTM standards) كما في الجدول (3) الذي يوضح أنواع وتسميات العينات حسب نسب التدعيم الإفرادي و الهجين:

الجدول(3) أنواع العينات المدعمة مع نسب التدعيم

Sample Name(ID)	AA7075(%)	SiC(%)	B4C(%)
S0	100	0	0
S1	95	5	0
S2	90	10	0
S3	95	0	5
S4	90	0	10
S5	90	5	5

والشكل (12) يوضح عمليات تحضير عينات الاختبارات الميكانيكية والفحص المجهرى:



"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية "



الشكل (12) تجهيز وتشغيل عينات الاختبارات الميكانيكية والفحص المجهرى

4. النتائج ومناقشتها (Results and Discussion):

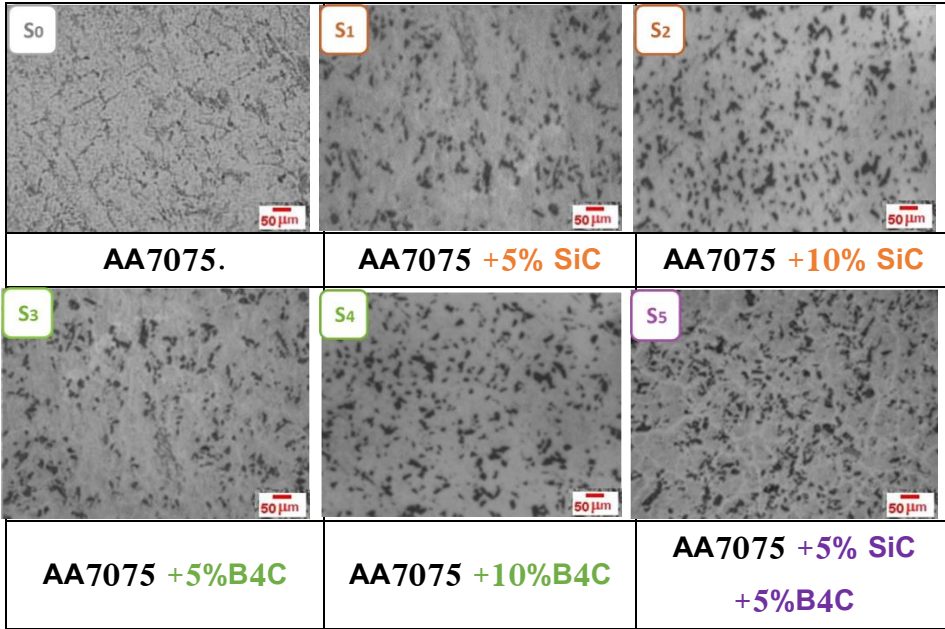
النتائج:

1) نتائج الفحص المجهرى Results of optical Microscope:

تم شحذ عينات الألمنيوم المدعم بأوراق صنفرة بدرجات نعومة مختلفة (600, 800, 1200, 1500, 2000) على جهاز الشحذ نصف الآلي بوجود تيار مائي ثم عملية التلميع باستعمال معجون الألماس الصناعي بحجم ($0.25\mu m$) ثم أجريت عملية غسل للعينات بالماء والكحول ثم التحفيف بالهواء أما إظهار البنية - التخريش - فتتمت بالغمس لمدة حوالي (30sec) على الأقل بمحلول كاشف كيلر (Keller) ذو التركيب التالي (5ml H₂O, 3ml HCL & 2ml HF) ثم تم فحصها على المجهر الضوئي وبمقدار تكبير قدره 200X وفق المواصفة ASTM-E3.

كما هو موضح بالشكل (13) في الصور المجهرية حيث توزعت الدقائق الداعمة من الكربيدات بنوعيتها والعديد من الرواسب ضمن الألمنيوم الأساس بشكل شبه منتظم تقريباً وكان تظهر ضمن البنية بشكل أغزر وأكثر حيث تزداد المساحة المشغولة فيها على الصور المجهرية -المناطق العاتمة- مع زيادة نسبتها في الألمنيوم AA7075 [8] [12].

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



الشكل (13) صور المجهر الضوئي توضح توزيع دقائق التدعيم المفردة والهجينة ضمن الألمنيوم
الأساس AA7075 . نسبة تكبير 200X

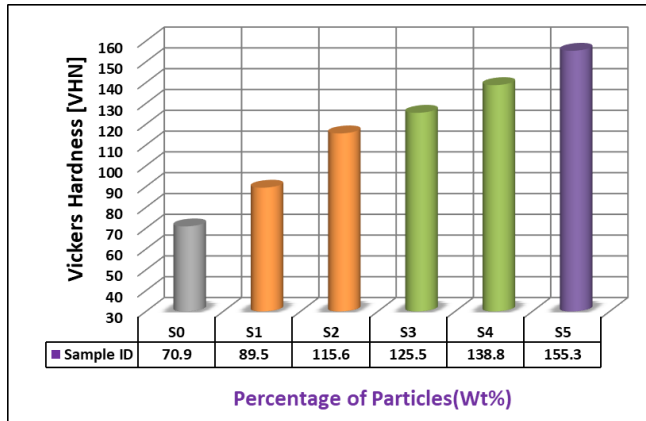
(2) نتائج اختبار القساوة Hardness test Results :

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

الهدف من إجراء القساوة مراقبة نجاح التدعيم وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (14) حيث
إنّ ازدادات قيم قساوة الألمنيوم (AA7075) مع ارتفاع نسبة الدقائق الداعمة لكل نوع من
الكربيدات القاسية الموزعة ضمنه .

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مُدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية"

أما التدعيم الهجين فقد ساعد على الحصول على أعلى قيمة للقساوة لعينات الألمنيوم المدعم حيث ارتفعت القساوة وبلغت أعلى قيمة (155.3HV) العينة S5- .-

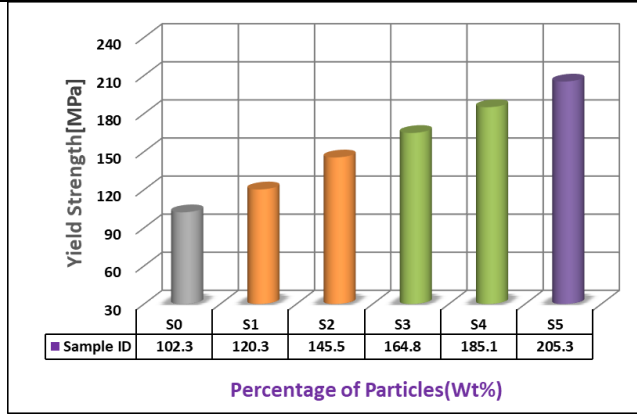


الشكل (14) تأثير التدعيم الإفرادي والهجين على قيم القساوة لسبيكة الألمنيوم AA7075

(3) نتائج اختبار الشد Tensile Test Results :

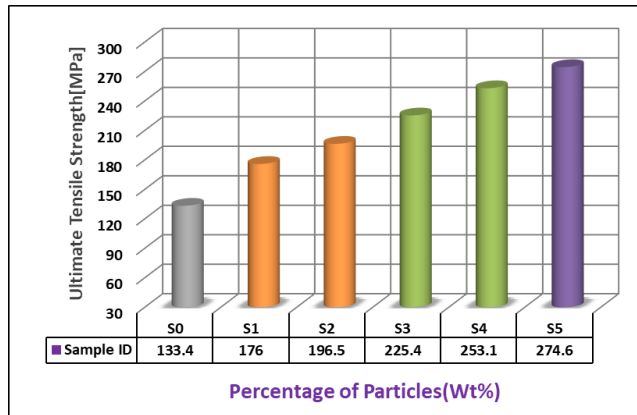
تم إجراء اختبار الشد والضغط على جهاز الشد (TINIUS OLSEN H25KS) المزود براسم بياني إلكتروني لمنحني الشد وبأخذ عينتين لكل قراءة ومن ثم المعدل الوسطي بعد أن تم تحضير جميع العينات حسب المواصفة القياسية (ASTM- B557) وبمقاطع مسطحة (10X15mm) بطول قياس (36mm) وبعد الحصول على مخططات الشد للعينات تم التركيز على تحديد قيم كل من: (مقاومة الخضوع YS- مقاومة الشد الأعظمية UTS- الاستطالة النسبية).

وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (15) (16) (17) حيث إن قيم إجهاد الخضوع ومقاومة الشد العظمى للألمنيوم الأساس (AA7075) زادت مع ازدياد نسبة دقائق كل من كربيد السيليكون والبورون القاسية حتى 10% , وعند التدعيم الهجين بكلا النوعين من الكربيدات حصلنا على أفضل وأميز خواص شد بنسبة تحسن كبيرة عن (AA7075) الأساس غير المدعم . أما بالنسبة للاستطالة النسبية (المطيلية) فإنها انخفضت مع ازدياد نسبة الدقائق الداعمة وأيضاً عند التدعيم الهجين ، وكانت قد بلغت أفضل خواص للشد للقيم التالية: (YS=205.3MPa&UTS=274.6MPa) عند التدعيم الهجين بنسبة تدعيم S5- (Wt=5%SiC+5%B4C) .



الشكل (15) تأثير التدعيم الإفرادي والهجين على قيم إجهاد الخضوع لسبيكة الألمنيوم

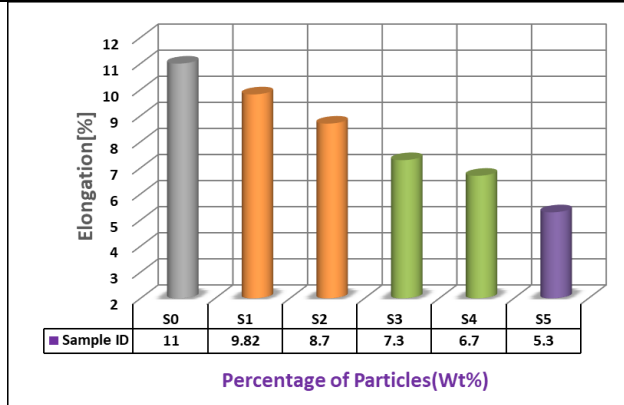
AA7075



الشكل (16) تأثير التدعيم الإفرادي والهجين على قيم مقاومة الشد الأعظمية لسبيكة الألمنيوم

AA7075

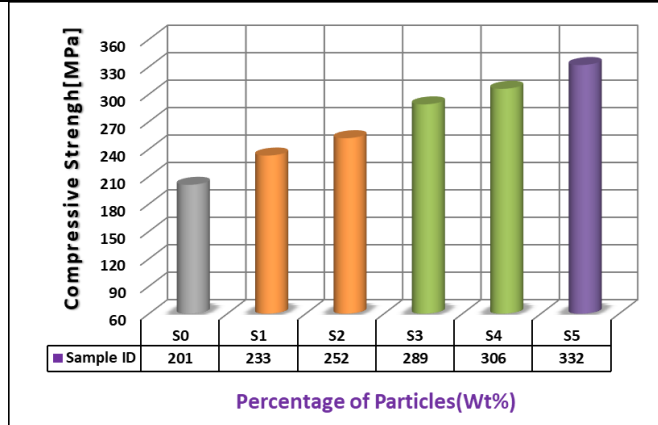
"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية"



الشكل (17) تأثير التدعيم الإفرادي والهجين على قيم الاستطالة النسبية لـ AA7075 يمكننا القول أن التدعيم الهجين في العينة -S5- أعطى أفضل خواص شد مقارنة بالتدعيم الإفرادي فقط في العينات (S1.....S4) وحالة عدم التدعيم العينة العيارية -S0- مع تراجع وانخفاض في المطيلية (معبراً عنها بالاستطالة كنسبة مئوية).

4) نتائج اختبار الضغط Compressive Test Results :

إن اختبار تحديد مقاومة الانضغاط للمعادن المدعمة غاية في الأهمية بالأخص إنه لا يتأثر بمسامية العينات المدروسة مثل اختبار الشد وقد تم إجراء اختبار الضغط على نفس جهاز اختبار الشد (TINIUS OLSEN H25KS) تحت حمولة ضغط تدريجية مُطبقة من الجهاز وبعد الحصول على منحنى الضغط وبأخذ عينتين لكل قراءة ومن ثم المعدل الوسطي بعد أن تم تحضير جميع العينات بسطوح مصقولة جيداً لضمان انتظام التحميل وبمقاطع دائرية متناسبة مع ارتفاع العينة حتى لا يحصل التواء أو انبعاج أثناء إجراء الاختبار حسب المواصفة القياسية (ASTME9-95) بطول ($L_0=25mm$) وقطر قيمته ($D_0=15mm$) وبعد الحصول على المخططات للعينات تم التركيز على تحديد قيمة : (مقاومة الانضغاط الأعظمية UCS Ultimate Compressive Strength) الشكل (18).



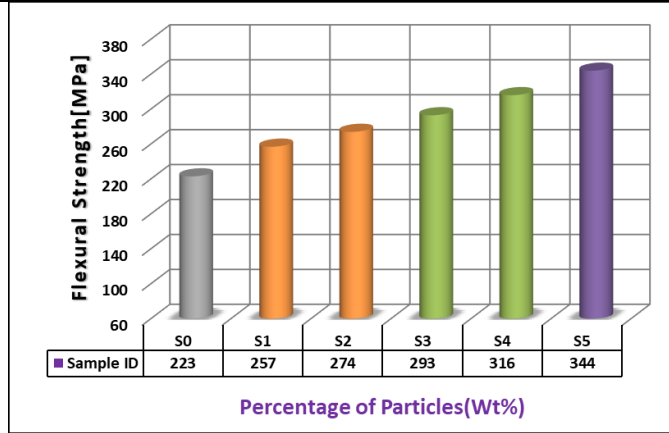
الشكل (18) تأثير التدعيم الإفرادي والهجين على مقاومة الضغط العظمى

وكانت النتائج كما هو موضح بالشكل (18) حيث إن مقاومة الضغط العظمى (UCS) للألمنيوم الأساس AA7075 زادت مع ازدياد نسبة دقائق الكرييدات القاسية الموزعة ضمنه. كما يمكن ملاحظة أن التدعيم الهجين فقد أدت إلى تحسن قيمتها لتبلغ (UCS=332MPa) وذلك للعينة S5- متفوقة على باقي العينات المدعمة بشكل إفرادي والعينة غير المدعمة.

(5) نتائج اختبار الانحناء Flexural Test Results :

تم إجراء اختبار الانحناء ثلاثي النقاط (three-point bending test) الذي يعطي نتائج أكثر واقعية من اختبار الشد والضغط في دراسة المواد المركبة ذات الأساس المعدني المدعمة بالدقائق عند تعرضها لعزوم انحناء (انعطاف) يتم إجراء اختبار الانحناء على نفس جهاز اختبار الشد (TINIUS OLSEN H25KS) مع تركيب رأس خاص يسمى برأس التحميل الأسطواني تطبق الحمولة في منتصف العينة عن طريقه بشكل بطيء وتدرجي حتى نهاية الاختبار بعد أن تم تحضير جميع العينات بمقاطع مسطحة للاختبار حسب المواصفة القياسية (ASTM- B557) بأبعاد (160x20x10mm³) توضع العينة بشكل أفقي لضمان توازنها وعدم انزلاقها على مسندين أسطوانيين البعد بينها بطول العينة القياسي (L₀=120mm) وبعد الحصول على المخططات للعينات تم التركيز على تحديد وحساب قيمة: (مقاومة الانحناء الأعظمية Flexural Bending Strength=Strength).

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية "



الشكل (19) تأثير التدعيم الإفرادي والهجين على مقاومة الضغط العظمى

من الشكل (19) نجد إن مقاومة الانحناء للألمنيوم الأساس ازادت مع ارتفاع نسبة دقائق الكرييدات الداعمة الموزعة خلاله . كما يمكن ملاحظة أن التدعيم الهجين فقد أدت إلى تحسن قيمتها لتبلغ (344MPa) وذلك للعينة S5 - متفوقة على باقي العينات المدعمة بشكل إفرادي من AA7075 وغير المدعمة العينة العيارية-S0-.

مناقشة وتفسير النتائج:

المناقشة والتقييم:

يوضح الجدول (4) مقدار التحسن بالخواص الميكانيكية المدروسة للعينات الخمسة مقدرة كنسبة مئوية بعد التدعيم الإفرادي و الهجين والذي يُحسب من العلاقة:

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

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

الجدول (4) مقدار التحسن في الخواص الميكانيكية المدروسة بعد التدعيم

Sample (ID)	القساوة (HV)	مقدار التحسن (%)	مقاومة الشد (UT S)	مقدار التحسن (%)	مقاومة الضغط (CS)	مقدار التحسن (%)	مقاومة الانحناء	مقدار التحسن (%)
S0	70.9	0	133.4	0	201	0	223	0
S1	89.5	27	176	32	233	16	257	15
S2	115.6	63	196.5	48	252	25	274	23
S3	125.5	77	225.4	69	289	44	293	31
S4	138.8	96	253.1	90	306	52	316	41
S5	155.3	118	274.6	106	332	65	344	54

نلاحظ أن حققنا مقدار تحسن في الخواص تراوح بين (15%-118%) حسب بارامترات العمل في بحثنا وأنه عند نسبة التدعيم الهجين (5%SiC+5%B4C) العينة (S5) كانت أعلى قيم للخواص الميكانيكية وبالتالي أصبح لدينا طيف واسع من العينات بخواص مختلفة تحقق (الكفاءة العالية والتكلفة المخفضة) بما يتلاءم مع التطبيق المفروض .

يجدر بنا الإشارة إلى أن التحسن الحاصل في السلوك الميكانيكي عند الخواص المدروسة عند التدعيم الهجين إلى نسبة معينة (5%SiC+5%B4C) والذي توصلنا له في بحثنا الحالي يتوافق مع ما توصل له العديد من الباحثين بالأبحاث الحديثة ذات الصلة بموضوعنا مع اختلاف نوع دقائق التدعيم ونسبتها وسبائك الألمنيوم الجاري تدعيمها والخواص الميكانيكية المدروسة وطريقة التصنيع ومُتغيرتها [5] [8] [9] [10] [12].

تفسير النتائج:

يتعلق الميكانيزم المسؤول عن تحسن الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم المدعم الهجين بانتظام وحسن توزع الدقائق الداعمة ضمن الأساس بشكل شبه متجانس بالإضافة لتفاعلها معه وارتباطها والتصاقها به ويمكن تلخيص هذا الميكانيزم في نقاط رئيسية توضح آليات التقوية وتحسن الخواص في (MMCs): [7] [10] [12]:

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مُدعمة بدقائق كبريدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية "

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

*نقل الحمل (Load Transfer): هو المبدأ الأساسي في عمل المواد المركبة فعندما تتعرض لقوة خارجية (قوة شد أو ضغط مثلاً) تقوم مادة الأساس الأضعف بنقل جزء كبير من الحمل إلى الدقائق الداعمة الأكثر قساوة ومقاومة ويتم هذا النقل عبر سطوح التماس البينية بين المكونات مما يؤدي إلى توزيع الحمل المطبق على هذه السطوح للتغلب على قوة الربط القوية بينها وتحقيق التشوه اللدن وكلما كان الترابط أقوى بين المعدن والدقائق كان نقل الحمل أكثر كفاءة مما يزيد بشكل كبير من مقاومة المعدن المدعم.

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

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

1. تصغير الحجم الحبيبي: تعمل الدقائق الداعمة المقدمة للمصهور كعوامل وبنور وأنوية تبلور (Nucleating agents) أثناء تصلب المادة وتُسهم في تصغير الحجم الحبيبي (decreasing the grain size) مما يؤدي إلى تكوين عدد أكبر من الحبيبات الدقيقة وفقاً

لقانون (هول- بيتش Hall-Petch) فإن مقاومة المادة تزداد مع تناقص حجم حبيباتها. تساهم الدقائق في تقليل العيوب الداخلية والمسامية مما يزيد من كثافة المادة وخواصها الميكانيكية.

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

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

بينما انخفاض قيم الاستطالة للألمنيوم AA7075 يُعزى إلى وجود الدقائق الداعمة التي تسبب مناطق تركيز للإجهادات الموضعية عند أسطح التماس بين الدقائق والمعدن عدا على أن إضافة هذه الدقائق يولد مناطق انزلاق (Slip regions) في المعدن أو نتيجة اختلافات كبيرة في السلوك المرن بين المعدن الأساس والدقائق المبعثرة وكون إضافة الدقائق له تأثير مشابه للتشحييم حيث يسهل حركة الدقائق على طول مستويات الانزلاق.

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

5. الاستنتاجات والتوصيات للأعمال المستقبلية:

الاستنتاجات:

1. من خلال هذه الدراسة توصلنا إلى تحديد الشروط العملية لتصنيع مادة مركبة معدنية (AMCp) من أساس سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة تدعيماً إفرادياً وهجيناً بنوعين مختلفين من الدقائق الكريبيدية القاسية بتقنية السباكة بالعصر (SQT).

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مُدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية "

2. تحسن وارتفاع الخواص الميكانيكية له صلة وثيقة بطريقة التدعيم (إفرادي - هجين) وضبط نسب التدعيم وبالاختيار المناسب لمتغيرات طريقة التصنيع بما يتلاءم مع الاستخدام المطلوب.
3. في ضوء الدراسة الحالية أدت زيادة نسبة دقائق كربيد السيلكون المُضافة ودقائق كربيد البورون المُضافة عند التدعيم بشكل إفرادي (10 wt% → 5 wt%) إلى تحسن الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم الأساس (AA7075) بالمقارنة مع الأساس (AA7075) غير المدعم -العينة العيارية- وأن التدعيم الإفرادي بكربيد البورون أعطى نتائج أفضل من التدعيم الإفرادي بكربيد السيلكون عند نفس نسب التدعيم.
4. أدى التدعيم الإفرادي والهجين إلى انخفاض في المطيلية (ممثلة بالنسبة المئوية للاستطالة) مع زيادة نسبة التدعيم بالمقارنة مع (AA7075).
5. تفوق التدعيم الهجين بكلا النوعين من الدقائق الكربيدية معاً عن التدعيم الإفرادي بالدقائق عند نفس نسبة التدعيم الكلية (10%) من حيث التحسن في الخواص الميكانيكية المدروسة للألمنيوم الأساس (AA7075) بالمقارنة مع المعدن الأساس (AA7075) غير المدعم - العينة العيارية S0-.
6. أفضل قيم للخواص الميكانيكية للألمنيوم المدعم (القساوة وإجهاد الخضوع ومقاومة الشد الأعظمية ومقاومة الضغط ومقاومة الانحناء) تم الحصول عليها عند نسب تدعيم هجين (5%B4C+5%SiC) - العينة (S5)-.

التوصيات لأعمال المستقبلية:

1. مقارنة النتائج التي توصلت لها الدراسة مع طرق وتقنيات تصنيع أخرى (تكنولوجيا المساحيق أو السباكة بالمزج الميكانيكي) كما نوصي باستخدام دقائق داعمة نانوية في تحقيق التدعيم للألمنيوم واستخدام ومقارنة سبائك أخرى من الألمنيوم مع ما تناولناه في دراستنا الحالية.
2. نوصي بدراسة تأثير نسب تدعيم أعلى من تلك التي استخدمناها في هذه الدراسة على نفس الخواص وعند نفس الشروط المطبقة.
3. دراسة تأثير متغيرات وشروط التصنيع (سرعة الخلط -ضغط العصر -نسبة التدعيم- نوع الدقائق-.....) على الخواص الميكانيكية للألمنيوم المُدعم المُصنع.

4. نوصي في مجال توصيف سلوك هذا النوع من المواد بتوسيع النتائج لتشمل دراسة خواص ميكانيكية أخرى للألمنيوم بعد التدعيم (مقاومة التعب والزحف....) بالإضافة إلى دراسة خواص الاهتراء والاحتكاك والصلمود الحراري عند درجات حرارة مرتفعة .
5. دراسة تأثير عمليات المعالجة اللاحقة سواء ميكانيكية او حرارية أو كليهما ودراسة تأثير تغيير بارامتراتنا وشروطها على خواص للألمنيوم المُدعم المُصنع.

6. المراجع:

- [1] SURAPPA, M 2003- **Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities**. Vol. 28, Parts 1 & 2, Printed in S⁻adhan⁻a, First Edition, India, 319–334 p.
- [2] Chawla, N and Chawla, K, 2013, **Metal Matrix Composites**. Springer Science +Business Media New York Journal of Metals Vol. 2, Second Edition USA,1-381p.
- [3] Stojanović, B and Ivanović ,L 2015-**APPLICATION OF ALUMINIUM HYBRID COMPOSITES IN AUTOMOTIVE INDUSTRY**. Vol.22, Issue 3 Ver, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME) Tehnički vjesnik, Serbia, 247-251 p.
- [4] Nazeer, A and Safiulla ,M, 2020-**Mechanical and Wear Properties of Cold Extruded Al6063 Metal Matrix Alloy Reinforced with Silicon Carbide, Alumina and Cerium Oxide**. Vol.9, Issue 3, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), India, 4091-4097p.
- [5] Lemine, S., Fayyaz, O., Bhadra , J., and Thani, J., 2022 - **Microstructure and mechanical properties of aluminum matrix composites with bimodal-sized hybrid NbC-B4C reinforcements**, Vol (33), Journal Materials Today Communication ELSEVIER, Qatar, 1-10p. [6] Haripriya ,M and Rao ,N, 2022-**Fabrication and Tensile, Compressive, Flexural Mechanical Testing of Aluminium Metal Matrix Composites Reinforcement with TiO2**. Vol.7, No 1, International Journal of Mechanical Engineering Kalahari Journals, India, 2523-2531p.

"تصنيع مواد مركبة معدنية ذات أساس من سبيكة الألمنيوم (AA7075) مدعمة بدقائق كربيدية مختلفة بتقنية السباكة بالعصر (SQT) ودراسة بعض خواصها الميكانيكية"

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

[8] Seshappa, A., Ra,K., Pranavi,U., and Chhabra ,S., **2024-Manufacturing while Investigations of Al-7075/RHA/Al₂O₃ Composite by Squeeze Casting.** Vol ,(04)(392), Issue 04, Journal of MATEC Web of Conferences EDP Sciences (ICMED), India, 1-12p.

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

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

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

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

دراسة تأثير بارامترات القطع بالخراطة على قساوة الطبقة السطحية

لمشغولات الفولاذ AISI 1025

د.م. سليمان يوسف*

ملخص البحث:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير بارامترات القطع الأساسية (سرعة القطع، معدل شالتغذية، وحالة التبريد) على قساوة الطبقة السطحية لمشغولات فولاذ AISI 1025 أثناء الخراطة التقليدية. أجريت التجارب باستخدام سرعات قطع مختلفة (منخفضة، متوسطة، عالية) وثلاثة مستويات للتغذية، في حالتها التشغيل الجاف ومع التبريد.

بينت النتائج أن جميع البارامترات أثرت بشكل أو بآخر على القساوة السطحية، حيث أدت زيادة سرعة القطع أو معدل التغذية إلى ارتفاع القساوة نتيجة التشوه اللدن والحرارة المتولدة في منطقة القطع، بينما أدى استخدام التبريد إلى تقليل القساوة عبر تقليل الاحتكاك وخفض درجة الحرارة. بين تحليل التباين (ANOVA) أن سرعة القطع هي العامل الأكثر تأثيراً، تليها التغذية، ثم التبريد. وخلصت الدراسة إلى أن القيم المثلى للحصول على توازن بين قساوة سطحية معتدلة وعمر أداة أطول تتمثل في اختيار سرعات قطع متوسطة مع معدل تغذية منخفض واستخدام التبريد المستمر.

الكلمات المفتاحية:

الخراطة، قساوة السطح، سرعة القطع، معدل التغذية، عمق القطع، سائل التبريد

*: عضو هيئة فنية في قسم هندسة التصميم والإنتاج- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

Abstract:

This study aims to evaluate the effect of cutting parameters (cutting speed, feed rate, and cooling condition) on the surface hardness of AISI 1025 steel workpieces during conventional turning.

Experiments were conducted at three cutting speeds (low, medium, and high) and three feed rates, under both dry and wet machining conditions.

The results showed that all parameters influenced the surface hardness to varying degrees. Increasing cutting speed and feed rate led to higher hardness values due to greater plastic deformation and heat generation, while the use of coolant reduced hardness by dissipating heat and minimizing friction. Analysis of variance (ANOVA) indicated that cutting speed was the most influential factor, followed by feed rate and coolant. The study concludes that optimal machining conditions for balanced surface hardness and tool life are achieved at medium cutting speeds, low feed rates, and continuous coolant application.

Keywords: Turning, Surface Hardness, Cutting Speed, Feed Rate, Depth of Cut, Coolant

1- المقدمة:

تُعد عملية الخراطة من أبرز عمليات التشغيل المستخدمة للحصول على أبعاد دقيقة وتشطيب سطحي جيد، وتعتبر القساوة السطحية من الخصائص الميكانيكية الأساسية التي تحدد أداء الأجزاء في الخدمة، إذ ترتبط بشكل مباشر بمقاومة التآكل، مقاومة التعب، والعمر التشغيلي للأجزاء. وتلعب الظروف التشغيلية أثناء الخراطة دورًا بارزًا في تغيير القساوة السطحية، سواء عبر التشوه الميكانيكي الناتج عن قوى القطع، أو عبر التأثير الحراري الناجم عن الاحتكاك وارتفاع درجات الحرارة في منطقة القطع [1][2].

تشير التقارير الحديثة إلى أن عمليات الخراطة التقليدية لا تزال تُستخدم في أكثر من 55% من عمليات التشغيل في المصانع الصغيرة والمتوسطة، نظرًا لتكلفتها المنخفضة ومرونتها في التصنيع [4][6]. تؤثر بارامترات القطع تأثيرًا جوهريًا على خواص الطبقة السطحية الناتجة، بما في ذلك القساوة السطحية، التي تؤثر بدورها على مقاومة التآكل والتعب [3][4].

يُصنّف الفولاذ AISI 1025 كفولاذ منخفض الكربون يحتوي على نحو 0.25% كربون، ويتميز بقابلية جيدة للتشغيل، إضافة إلى متانة ومرونة مناسبة تجعله مادة مفضلة في الصناعات الميكانيكية. إلا أن خواصه السطحية يمكن أن تتغير بفعل عمليات القطع، مما يحتم دراسة العلاقة بين بارامترات الخراطة والقساوة السطحية [3][10].

بناءً على ذلك، يهدف هذا البحث إلى تحديد أثر كل من سرعة القطع، معدل التغذية، وحالة التبريد على القساوة السطحية للفولاذ AISI 1025، باستخدام منهجية تجريبية مدعومة بتحليل التباين (ANOVA) [7][4][3].

تشير بعض الدراسات إلى أن ظروف القطع وهندسة قلم القطع ومعدن المشغولة تؤثر في القساوة السطحية. أظهر (Zurita–Hurtado et al. (2017) أن زيادة سرعة القطع في خراطة الفولاذ منخفض الكربون تؤدي إلى ارتفاع القساوة السطحية نتيجة الحرارة المتولدة [10]. كما أن خصائص السطح الناتجة عن عمليات الخراطة تتأثر بشكل مباشر بكل من سرعة القطع ومعدل التغذية وزاوية الأداة [4][6].

وجد الباحثون أن القطع الجاف للفولاذ AISI 4340 أدى إلى خشونة سطحية $0.85 \mu\text{m Ra}$ مقابل $0.42 \mu\text{m}$ في حالة التبريد باستخدام MQL ، كما زادت القساوة السطحية من HV 258 إلى HV 278 عند السرعات الأعلى (200–250 م/دقيقة) [8][9]. كذلك، أظهر Ebrahimi et al. (2021) أن التغذية العالية (>0.2 مم/دورة) سببت انخفاض القساوة بنسبة 10% بسبب زيادة حرارة التشوه [5].

كما أوضحت أبحاث أخرى أن التبريد يقلل من القساوة السطحية نتيجة خفض درجات الحرارة وتقليل التشوه الحراري [7][5]. وتشير الدراسات إلى أن اختيار ظروف تشغيل مناسبة يساهم في ضبط خواص السطح وتحسين عمر الأداة [11][12].

يمكن استخلاص النقاط التالية من الدراسات السابقة:

- التأثير الأكبر على القساوة يأتي من سرعة القطع، تليها معدل التغذية.
- استخدام تبريد MQL أو الزيوت الحيوية يعطي نتائج أفضل من القطع الجاف بمعدل HV 10–20 زيادة.

تأتي هذه الدراسة استكمالاً لهذه الأبحاث، حيث تم تطبيق منهج تجريبي مباشر على عينات من فولاذ AISI 1025 باستخدام مخرطة تقليدية، وقياس القساوة، مع تحليل العلاقة بين متغيرات القطع (السرعة، التغذية، التبريد) على قساوة السطح.

أهمية البحث:

- تكمن أهمية البحث في تحديد العلاقة بين متغيرات القطع وتغير القساوة السطحية.

- يساعد في اختيار بارامترات تشغيل مثلى للمحافظة على خواص السطح المشغل خلال عملية التشغيل.
- 2- هدف البحث:

- ✓ يهدف هذا البحث إلى تحليل تأثير متغيرات القطع الأساسية وهي سرعة القطع، ومعدل التغذية، وحالة التشغيل على المساواة السطحية لفولاذ AISI 1025 باستخدام تصميم التجارب من نوع Taguchi L9 لتحديد العوامل الأكثر تأثيراً وتقييم ثبات العملية.
 - ✓ وضع توصيات عملية لظروف تشغيل مثلى تحقق تحسين الخواص السطحية.
- 3- مواد وطرائق البحث:

تحضير العينة والتجهيز للعمل:

تم فحص عينات البحث بعد شحذها بورق الشد وتعيمها بشكل جيد للتأكد من نسبة العناصر السبائكية الموجودة بجهاز التحليل الطيفي للمعادن، كانت نتائج فحص البنية موضحة بالجدول (1):

جدول (1) التركيب الكيميائي لمعدن المشغولة

اسم العنصر	C	S	P	Si	Mn	Fe
النسبة %	0.24	0.01	0.001	0.2	0.78	98.74

نلاحظ من خلال نتائج التحليل أن الفولاذ المستخدم هو فولاد منخفض نسبة الكربون AISI 1025 ويفضل استخدام أداة قطع من نوع HSS صلب السرعات العالية.

شحذ وتحضير قلم القطع:

تم اختيار الزوايا استناداً إلى توصيات دليل Machining Data Handbook لضمان أفضل أداء في خراطة الفولاذ منخفض الكربون. وفيما يلي جدول (2) يبين قيم بعض زوايا قلم قطع مصنوع من صلب السرعات العالية (HSS).

جدول (2) قيم زوايا قلم القطع المستخدم للخراطة

اسم الزاوية	مقدارها
زاوية الخلوص الرئيسية α	12°
زاوية الجرف الرئيسية γ	8°
زاوية القطع δ	70°

تم استخدام جهاز محمول لقياس القساوة (Metal Hardness Tester) حيث تم اعتماد قساوة فيكرز علماً أن الجهاز يعطي أكثر من نوع، والجهاز نوع (yamayo TH-180). ويوضح الشكل (1) تجهيز عينات الخراطة للاختبار:



الشكل (1) تجهيز العينات قبل الاختبار

بارامترات عملية التشغيل:

أجريت في هذا البحث دراسة تأثير كلاً من سرعة القطع والتغذية في قساوة السطح المشغل (رطب وجاف) وتم تثبيت عمق القطع لأن تأثيره محدود في قساوة السطح من خلال التجربة، حيث تم تجريب ثلاثة قيم لكل بارامتر.

تم اختيار قيم السرعة وعمق القطع والتغذية وفقاً لإمكانات المخرطة المتوفرة في المخبر، وتم تكرار كل تجربة ثلاث مرات، وتم حساب المتوسط الحسابي لقيم القساوة لتقليل الخطأ التجريبي وضمان الثبات الإحصائي للنتائج، وتم تدوين النتائج، ويوضح الجدول (3) قيم بارامترات القطع المستخدمة في التشغيل:

جدول (3) قيم بارامترات القطع المستخدمة أثناء الخراطة

رقم	عمق القطع mm	قطر العينة D mm	التغذية mm/rev	سرعة الدوران RPM	سرعة القطع m/min
1	0.5	25	0.052	200	15.7
2			0.065	600	47.1
3			0.081	1000	78.5

تصميم Taguchi L9 :

تم اعتماد منهجية تصميم التجارب (Taguchi L9 Orthogonal Array) لتحديد تأثير أهم بارامترات القطع على القساوة السطحية للفولاذ AISI 1025، والحصول على دقة إحصائية عالية بأقل تكلفة وجهد. اعتمد التصميم على ثلاثة عوامل رئيسية، ولكل منها ثلاثة مستويات كما هو موضح في الجدول (4):

الجدول (4) المستويات التي اعتمدت في الاختبارات

الرمز	العامل	الوصف	المستويات المختارة
A	سرعة القطع (Cutting Speed)	سرعة دوران المخرطة (rpm)	200 – 600 – 1000
B	معدل التغذية (Feed Rate)	معدل الإزاحة الخطية للأداة (mm/rev)	0.052 – 0.065 – 0.081

دراسة تأثير بارامترات القطع بالخراطة على قساوة الطبقة السطحية لمشغولات الفولاذ AISI 1025

جاف - تبريد هوائي - تبريد سائل (زيت+ماء)	نوع وسط القطع المستخدم	حالة التشغيل (Cutting Condition)	C
---	---------------------------	--	---

أُجريت تسع تجارب اعتمادًا على مصفوفة **Taguchi L9**، بدل من 27 تجربة مفترضة، حيث شمل كل عامل ثلاثة مستويات مختلفة لتحقيق تغطية إحصائية متوازنة للعوامل التشغيلية. والجدول (5) يبين ترتيب التجارب التسع المستخدمة في هذه الدراسة:

الجدول (5) ترتيب التجارب التسع التي تم اختيارها

الغرض من التجربة	حالة التشغيل	معدل التغذية (mm/rev)	سرعة القطع (rpm)	رقم التجربة
تقييم تأثير السرعة المنخفضة والتغذية الصغيرة على القساوة	جاف	0.052	200	1
دراسة أثر التبريد الهوائي عند السرعة المنخفضة	تبريد هوائي	0.065	200	2
قياس تأثير التغذية العالية مع السرعة المنخفضة	تبريد سائل	0.081	200	3
تحديد أثر السرعة المتوسطة والتبريد الجزئي	تبريد هوائي	0.052	600	4
تحديد التفاعل بين التغذية المتوسطة وسرعة متوسطة	تبريد سائل	0.065	600	5
اختبار تأثير التغذية العالية دون تبريد	جاف	0.081	600	6

فحص تأثير السرعة العالية مع أقل تغذية	تبريد سائل	0.052	1000	7
دراسة تأثير التغذية المتوسطة تحت السرعة العالية	جاف	0.065	1000	8
تحليل تأثير أعلى سرعة وتغذية مع تبريد هوائي	تبريد هوائي	0.081	1000	9

تمثل هذه التجارب التسع التصميم الكامل لطريقة (3³) Taguchi L9، التي تجمع بين ثلاثة مستويات لكل عامل من العوامل الثلاثة.

بعد تنفيذ جميع التجارب، تم إيجاد المتوسط الحسابي القساوة السطحية (HV) لكل عينة، وتحليل النتائج باستخدام طريقتي نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N Ratio) وتحليل التباين (ANOVA) لتحديد العوامل الأكثر تأثيراً والمستوى الأمثل لكل متغير.

4- النتائج والمناقشة:

بعد دراسة تأثير كلاً من التغذية سرعة القطع في قساوة السطح حصلنا على النتائج التالية في الجدول (6) التالي:

الجدول (6) نتائج تجارب Taguchi L9 لتأثير متغيرات القطع في القساوة السطحية

نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N Ratio, dB)	القساوة السطحية (HV)	حالة التشغيل	معدل التغذية (mm/rev)	سرعة القطع (rpm)	رقم التجربة
-40.67	108.0	جاف	0.052	200	1
-40.69	108.3	تبريد هوائي	0.065	200	2
-40.95	111.6	تبريد سائل	0.081	200	3
-41.34	116.6	تبريد هوائي	0.052	600	4

دراسة تأثير بارامترات القطع بالخراطة على قساوة الطبقة السطحية لمشغولات الفولاذ AISI 1025

-40.99	112.3	تبريد سائل	0.065	600	5
-41.63	120.6	جاف	0.081	600	6
-41.95	115	تبريد سائل	0.052	1000	7
-42.14	128.0	جاف	0.065	1000	8
-42.00	126.0	تبريد هوائي	0.081	1000	9

❖ تحليل نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N Ratio):

تم حساب نسبة الإشارة إلى الضوضاء وفق معيار "الأقل هو الأفضل (Smaller-is-Better)" أي القساوة الأقل (لم تتغير مواصفات السطح) بهدف تحديد ثبات النتائج، وقد تبين أن أفضل أداء تحقق عند سرعة قطع منخفضة (200 rpm) ومعدل تغذية صغير (0.052 mm/rev)، مما يدل على استقرار العملية وجودة السطح الناتج. في المقابل، انخفضت قيم S/N (زادت القساوة) عند السرعات والتغذيات العالية، مما يشير إلى تباين أعلى في النتائج وزيادة الضوضاء التجريبية.

تم حساب قيم الضوضاء بناءً على العلاقة القياسية في طريقة تاجوشي:

$$\left(\frac{1}{2y} \sum \frac{1}{n} \right) 10^{\log \times 10} = S/N$$

N: عدد القراءات (3 تكرارات لكل تجربة)

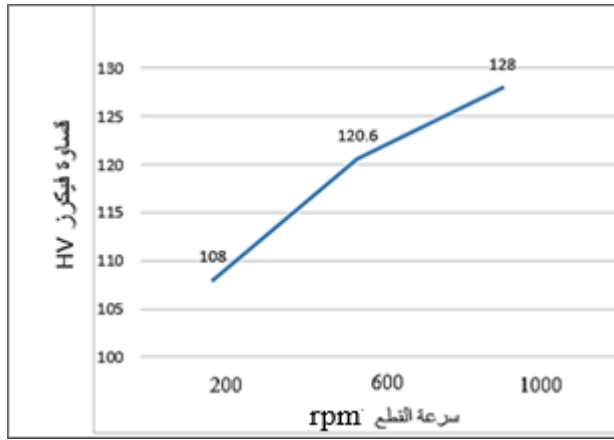
y: القيمة المقاسة للاستجابة (القساوة هنا)

يتضح أن القساوة تزداد تدريجيًا مع ارتفاع سرعة القطع ومعدل التغذية، وتكون أعلى قيمها في حالة التشغيل الجاف، في حين تقل نسبيًا عند استخدام التبريد السائل. هذا السلوك يعكس التفاعل بين الحرارة المتولدة أثناء القطع والعمل اللدن (plastic deformation) الذي يؤدي إلى تصلب السطح (work hardening).

4-1- تأثير سرعة القطع (Cutting Speed):

عند رفع سرعة القطع من 200 إلى 1000 rpm، ارتفعت القساوة السطحية من 108 HV إلى 128 HV تقريباً. هذه الزيادة تُعزى إلى ارتفاع درجة حرارة المنطقة المتأثرة بالقطع مع زيادة السرعة، مما يؤدي إلى زيادة في معدل التشوه اللدن للسطح. نتيجة ذلك، تحدث إعادة تبلور جزئية (partial recrystallization) وتكون حبيبات أدق، مما يزيد القساوة.

استنتاج: ارتفاع سرعة القطع يؤدي إلى زيادة القساوة السطحية كما يبين المنحني في الشكل (2):

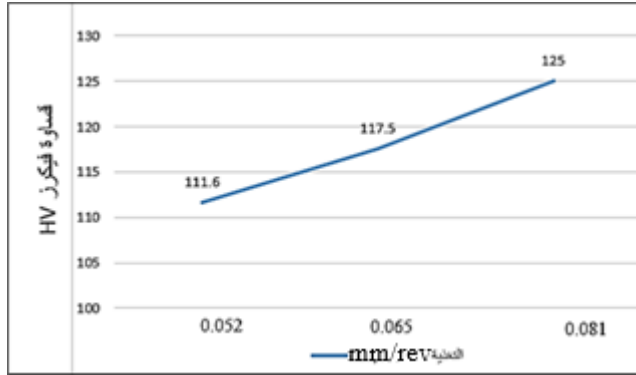


الشكل (2) المنحني البياني لتأثير سرعة القطع في القساوة السطحية

4-2- تأثير معدل التغذية (Feed Rate):

يُلاحظ ارتفاع القساوة بزيادة معدل التغذية من 0.052 إلى 0.081 mm/rev. هذا التأثير يُفسر بأن زيادة التغذية تؤدي إلى إزالة حجم أكبر من المادة في كل دورة، ما يولد قوى قطع أعلى وحرارة أكبر. هذه الحرارة الإضافية تُعزز التصلب السطحي من خلال زيادة الإجهادات المتبقية ورفع كثافة الانخلاعات (dislocations) داخل البنية البلورية.

استنتاج: تزداد القساوة السطحية تدريجياً مع زيادة معدل التغذية كما يبين المنحني في الشكل (3):



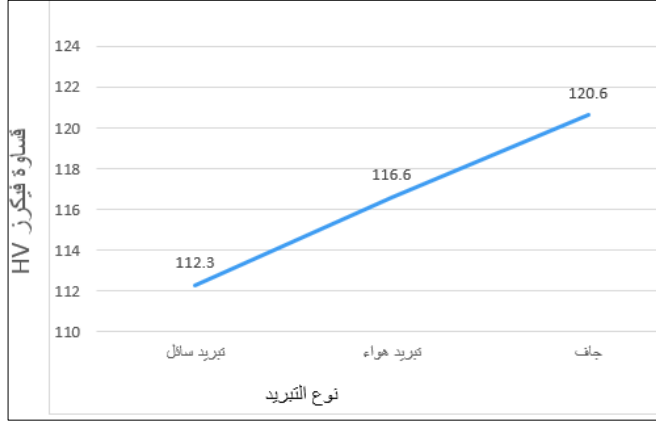
الشكل (3) المنحني البياني لتأثير معدل التغذية في القساوة السطحية

4-3- تأثير حالة التشغيل (Cutting Condition) :

بينت النتائج أن التشغيل الجاف أعطى قيم قساوة أعلى (حتى 128 HV) يليه التبريد الهوائي (126 HV)، ثم التبريد السائل (زيت+ماء) (112 HV) كأدنى قيمة. في التشغيل الجاف، ترتفع درجة الحرارة الموضعية بدرجة كبيرة، مما يحدث تصلباً سطحياً ملحوظاً بسبب التشوه اللدن. في المقابل، يؤدي استخدام التبريد السائل إلى تقليل الحرارة، فينتج سطح أقل إجهاداً حرارياً وبالتالي أقل قساوة.

استنتاج: التبريد يقلل القساوة بسبب انخفاض درجة الحرارة، بينما يزيد التشغيل الجاف القساوة نتيجة التسخين والتصلب الانفعالي كما يبين المنحني في الشكل (4):

الشكل (4) المنحني البياني لتأثير حالة التشغيل في القساوة السطحية



4-4- مقارنة نتائج البحث مع نتائج الدراسات السابقة:

نبين في الجدول التالي (7) مقارنة نتائج الدراسات السابقة بنتيجة البحث الحالي

الجدول (7) مقارنة نتائج الدراسات السابقة بالدراسة الحالية

رقم	الدراسة	نوع الفولاذ	ظروف القطع	أهم المتغيرات المدروسة	القساوة السطحية (HV)	ملاحظات رئيسية	المقارنة مع البحث الحالي
1	Zhou et al. (2020)	AISI 1025	تشغيل جاف	سرعة، القطع، التغذية	210 → 232	زيادة القساوة مع السرعة	مماثل للاتجاه الحالي
2	Singh & Garg (2021)	AISI 1040	تشغيل جاف	السرعة، التغذية	245 → 265	القساوة ترتفع مع زيادة السرعة	متفق جزئياً
3	Ebrahimi et al. (2021)	AISI 630	ساخن (300°C)	الحرارة، التغذية	235 → 260	التسخين المسبق يرفع القساوة بمقدار 25 HV	مشابه في الأثر الحراري

دراسة تأثير بارامترات القطع بالخراطة على قساوة الطبقة السطحية لمشغولات الفولاذ AISI 1025

متطابق في الاتجاه	التبريد يقلل القساوة	248 (جاف) → 229 (مبلل)	السرعة، التغذية	جاف/مبلل	فولاذ متوسط الكربون	Mandal & Paul (2022)	4
مماثل لنتائج البحث الحالي	التحليل ANOVA أظهر تأثيراً معنوياً للسرعة	225 → 250	السرعة، التغذية	تشغيل جاف	فولاذ منخفض الكربون	Kumar & Sharma (2023)	5
متوافق عملياً	القيم المثلثية عند سرعة متوسطة 200 م/د	240 → 265	السرعة، عمق القطع	تشغيل جاف	AISI 1045	Patel & Gohil (2023)	6
متشابه في الاتجاه العام	زيادة القساوة 12 عند HV رفع السرعة إلى 250 م/د	260 → 272	السرعة، التغذية	تشغيل جاف	AISI 316	Surya (2024)	7
متوافق	التغذية العالية تقلل القساوة	0.08)255 → (م/د) 0.24) 240 (م/د)	السرعة، التغذية	جاف/هوائي	فولاذ أوستنيتي	Kónya et al. (2024)	8
يتفق في الأثر الحراري العكسي	التبريد الجزئي رفع القساوة 20 HV	258 → 278	السرعة، التبريد	MQL	AISI 4340	Yaqoob et al. (2024)	9
نتائج مكملة تؤكد الاتجاه العام	القساوة الأعلى عند السرعة المرتفعة والتغذية المرتفعة	128 (جاف) 108 (ميرد)	السرعة، التغذية، التبريد	جاف/ميرد	AISI 1025	البحث الحالي (2025)	10

4-5- الاستنتاجات العامة من تحليل Taguchi :

1. سرعة القطع هي العامل الأكثر تأثيراً في القساوة السطحية بنسبة تأثير تقديرية $\approx 50\%$
2. معدل التغذية يأتي في المرتبة الثانية بتأثير نسبي $\approx 30\%$

3. حالة التشغيل لها التأثير الأقل (حوالي 20%)، لكنها تظل مهمة في ضبط استقرار العملية.
4. التشغيل الجاف يعزز التصلب السطحي، بينما التبريد السائل يقلله، ما يوفر مجالاً للتحكم في القساوة وفق نوع التطبيق الصناعي المطلوب.

4-6- التوصيات والمقترحات:

للحصول على سطوح مثالية أثناء عمليات التشغيل وبعد الانتهاء، بحيث يكون السطح قليل التغيرات من ناحية البنية وقساوة السطح يجب اتباع قواعد التشغيل والقيم المسموح بها من تغذية وسرع قطع واستخدام سوائل التبريد دائماً للمحافظة على عمر أداة القطع أولاً ثم المحافظة على بنية الطبقة السطحية للمشغولة دون تغيير.

القيم المثلى الموصى بها: سرعة قطع متوسطة ($600 \text{ rpm} \approx$) ، تغذية منخفضة (0.052 mm/rev)، واستخدام التبريد المستمر.

5- المراجع العملية:

1. Li, B., & Zhang, Y. (2019). Modeling of temperature and strain effects on surface hardness in turning operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9–12), 4529–4542.
2. Dash, L., Padhan, S., & Das, S. R. (2020). Experimental investigations on surface integrity and chip morphology in hard turning of AISI D3 steel under sustainable nanofluid-based minimum quantity lubrication. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(5), 236.
3. Zhou, Y., Wang, L., & Liu, Q. (2020). Surface integrity and mechanical performance of AISI 1025 steel in precision turning. *Procedia Manufacturing*, 53, 480–487.
4. Kumar, S., & Sharma, V. S. (2023). Optimization of machining parameters for surface integrity in turning of low-carbon steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 94, 118–127.
5. Ebrahimi, S. M., Hadad, M., & Araee, A. (2021). Influence of machining conditions on tool wear and surface characteristics in

- hot turning of AISI 630 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(9–10), 2603–2618.
6. Singh, H., & Garg, R. (2021). Experimental study of surface hardness in dry turning of AISI 1040 steel. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2198–2205.
 7. Mandal, S., & Paul, S. (2022). Influence of cutting speed and feed rate on surface integrity of medium carbon steels under dry and wet conditions. *Wear*, 502–503, 204332.
 8. Yaqoob, S., Ghani, J. A., & Jouini, N. (2024). High-speed turning of AISI 4340 alloy steel using carbide tools in a sustainable MQL environment. *Industrial Lubrication and Tribology*, 76(4), 325–337.
 9. Rahman, H., Jouini, N., Ghani, J. A., & Rasani, M. R. M. (2024). A review of high-speed turning of AISI 4340 steel with minimum quantity lubrication (MQL). *Coatings*, 14(8), 1063.
 10. Zurita-Hurtado, O. J., et al. (2017). Surface hardness prediction based on cutting parameters in turning of annealed AISI 1020 steel. *DYNA*, 84(203), 31–36.
 11. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (6th ed.). Pearson Education.
 12. Groover, M. P. (2013). *Fundamentals of Modern Manufacturing* (7th ed.). Wiley.
 13. Boothroyd, G., & Knight, W. A. (2006). *Fundamentals of Machining and Machine Tools* (3rd ed.). CRC Press.
 14. Trent, E. M., & Wright, P. K. (2000). *Metal Cutting* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
 15. Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Wiley.
 16. Aouici, H., Yallese, M. A., Fnides, B., Chaoui, K., & Mabrouki, T. (2012). Modeling and optimization of hard turning of AISI H11 tool steel with CBN tool. *Measurement*, 45(3), 344–353.

17. Zidan, M. N. (2015). Reducing the friction factor using a three-directional coolant flow during alloy steel turning. *Journal of Damascus University for Engineering Sciences*, 31(1).
18. Talib, N. A. (2010). Studying the effect of cutting speed and feed rate on tool life in the turning processes. *Diyala Journal of Engineering Sciences – Special Issue, First Engineering Scientific Conference*, 181–194.

تأثير الشبكات الخاصة الافتراضية وخوارزمية التشفير AES و خوارزميات الترميز الصوتي على أداء بروتوكول VOIP (كلية الهندسة المعلوماتية – جامعة حمص) أنموذجاً

د. م. يمان غازي¹

الملخص

في ظل التحول الرقمي المتسارع، أصبحت الاتصالات الصوتية عبر شبكات البيانات جزءاً أساسياً من البنية التحتية الحديثة، حيث تعتمد العديد من المؤسسات على تقنيات VoIP لتوفير اتصالات مرنة وفعالة من حيث التكلفة. هذه التقنية تتيح نقل الصوت بجودة عالية عبر الإنترنت، لكنها تبقى عرضة لتحديات تتعلق بالأمان والأداء، خاصة في البيئات الأكاديمية والمؤسسية الحساسة. من بين الحلول المستخدمة لتعزيز خصوصية الاتصال، تبرز الشبكات الخاصة الافتراضية (VPN) كوسيلة فعالة لإنشاء قنوات اتصال آمنة بين الأطراف، مما يقلل من احتمالية التنصت أو التلاعب بالبيانات. إلا أن استخدام VPN قد يضيف عبئاً على الشبكة، يؤثر على جودة الخدمة المقدمة عبر VoIP. في السياق ذاته، يُعد التشفير باستخدام خوارزمية AES من أكثر الأساليب شيوعاً لحماية البيانات الصوتية أثناء النقل، لما يتمتع به من قوة أمنية وسرعة في التنفيذ. ومع ذلك، فإن تطبيقه في الزمن الحقيقي على بيانات VoIP قد يؤثر على مؤشرات الأداء مثل التأخير والتقطيع. كما أن خوارزميات ترميز الصوت تلعب دوراً محورياً في ضغط البيانات وتحسين استخدامها للموارد الشبكية، إلا أن أداءها يتفاوت عند دمجها مع تقنيات التشفير و VPN.

في هذا البحث، تم استخدام بيئة المحاكاة OPNET لنمذجة وتحليل تأثير كل من الشبكات الخاصة الافتراضية، وخوارزمية التشفير AES، وثلاثة من خوارزميات ترميز الصوت (G.711, G.723.1, G.729) على أداء بروتوكول VoIP، وأجريت الدراسة على نموذج شبكة كلية الهندسة المعلوماتية بجامعة حمص، بهدف تقييم مؤشرات جودة الخدمة مثل التأخير من النهاية إلى النهاية، التقطيع، متوسط رأي المستخدم، والإنتاجية. أظهرت النتائج أن تطبيق تقنيات الشبكات الخاصة الافتراضية والتشفير باستخدام خوارزمية AES أدى إلى زيادة في التأخير من النهاية إلى

¹ أستاذ مساعد في قسم هندسة الشبكات والنظم الحاسوبية - كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة حمص.

النهاية مقارنة بالسيناريوهات التي لم تُطبق فيها هذه التقنيات، وكان هذا التأثير أكثر وضوحاً مع خوارزمية ترميز G.711 . كذلك، لوحظ تأثير للتشفير على التقطيع، حيث حافظت خوارزمية G.729 على استقرار نسبي في هذا الجانب مقارنة بالخوارزميات الأخرى. أما فيما يتعلق بجودة الصوت، فقد أظهرت خوارزمية G.729 أداءً أفضل في السيناريوهات غير المشفرة، بينما انخفض تقييم جودة الصوت عند تفعيل التشفير، خصوصاً مع خوارزمية G.723.1. كما أظهرت البيانات أن التشفير يضيف عبئاً على حجم البيانات المرسل، مما يؤثر على كفاءة استخدام عرض النطاق الترددي، وخاصة مع خوارزمية G.711. بناءً على نتائج المحاكاة، يُعد ترميز G.729 الخيار الأمثل لشبكة كلية الهندسة المعلوماتية بجامعة حمص، نظراً لتوازنه الفعال بين جودة الصوت وكفاءة الأداء في بيئة مشفرة باستخدام VPN و AES.

الكلمات المفتاح: الشبكات الخاصة الافتراضية، بروتوكول نقل الصوت عبر الانترنت، خوارزمية التشفير AES، المحاكاة، أوبنت، خوارزميات ترميز الصوت.

The Impact of Virtual Private Networks, AES Encryption Algorithm, and Voice Codec on VoIP Protocol Performance: A Case Study of the Faculty of Informatics Engineering – Homs University

Dr.Eng Yaman Ghazi*

ABSTRACT

Amid the rapid digital transformation, voice communications over data networks have become an essential component of modern infrastructure. Many institutions now rely on VoIP technologies to provide flexible and cost-effective communication solutions. This technology enables high-quality voice transmission over the Internet, yet remains vulnerable to challenges related to security and performance—particularly in sensitive academic and institutional environments. Among the solutions employed to enhance communication privacy, Virtual Private Networks (VPNs) stand out as an effective means of establishing secure communication channels between parties, reducing the risk of eavesdropping or data manipulation. However, the use of VPNs may introduce additional network overhead, potentially affecting the quality of service delivered via VoIP. In this context, encryption using the AES algorithm is one of the most widely adopted methods for securing voice data during transmission, due to its strong security and fast execution. Nevertheless, applying AES encryption in real-time VoIP traffic may impact performance indicators such as end-to-end delay and jitter.

Voice codecs also play a critical role in compressing data and optimizing network resource usage, though their performance varies when combined with encryption and VPN technologies.

In this study, the OPNET simulation environment was used to model and analyze the impact of VPNs, AES encryption, and three voice codecs (G.711, G.729, G.723.1) on VoIP protocol performance. The evaluation was conducted on a simulated network model of the Faculty of Informatics Engineering at Al-Baath University in Homs, with the aim of assessing key Quality of Service (QoS) metrics such as end-to-end delay, jitter, Mean Opinion Score (MOS), and throughput. The results showed that applying VPN and AES encryption led to an increase in end-to-end delay compared to scenarios without these technologies, with the effect being most pronounced when using the G.711 codec. Encryption also had a noticeable impact on jitter, while the G.729 codec maintained relatively stable

performance in this regard compared to other codecs. In terms of voice quality, G.729 demonstrated superior performance in unencrypted scenarios, whereas voice quality declined when encryption was enabled—particularly with the G.723.1 codec. Additionally, the data revealed that encryption adds overhead to the volume of transmitted data, affecting bandwidth efficiency, especially when using G.711.

Based on the simulation results, the G.729 codec is considered the optimal choice for the network of the Faculty of Informatics Engineering at Al-Baath University, due to its effective balance between voice quality and performance in encrypted environments using VPN and AES.

Keywords: OPNET Simulator, Voice over Internet Protocol, AES Algorithms, Voice Codec, Quality of Service.

*Associate Professor, Department of Systems and Computer Network, Faculty of Informatics Engineering, Homs University.

1. مقدمة:

شهدت تقنيات الاتصالات تطوراً ملحوظاً في العقود الأخيرة، حيث انتقلت من الأنظمة التقليدية المعتمدة على البنية التحتية الهاتفية إلى حلول أكثر مرونة تعتمد على شبكات البيانات. من بين هذه الحلول، يُعد بروتوكول نقل الصوت عبر الإنترنت من أبرز الابتكارات التي غيرت جذرياً طريقة التواصل الصوتي، إذ يتيح نقل الإشارات الصوتية عبر شبكات الـ IP باستخدام تقنيات ضغط وتشفير متقدمة، مما يوفر بديلاً اقتصادياً وعملياً للاتصالات الهاتفية التقليدية [1].

تكمن أهمية VoIP في قدرته على دمج خدمات الصوت والبيانات ضمن بنية شبكية موحدة، مما يُسهم في تقليل التكاليف التشغيلية، وتبسيط إدارة الشبكات، وتوفير إمكانيات متقدمة مثل الاتصالات متعددة الأطراف، التكامل مع تطبيقات الأعمال، وتوسيع نطاق الوصول إلى خدمات الاتصال في المناطق ذات البنية التحتية المحدودة [2]. وقد أصبح هذا البروتوكول حجر الأساس في العديد من القطاعات، بما في ذلك التعليم، الصحة، والخدمات الحكومية، نظراً لما يقدمه من مرونة وسرعة في نشر الخدمات [3].

ومع ذلك، فإن اعتماد VoIP لا يخلو من تحديات تقنية تؤثر على جودة الخدمة، خاصة في البيئات التي تتطلب اتصالات زمنية دقيقة مثل المؤتمرات الصوتية أو المكالمات الطارئة. من أبرز هذه التحديات: التأخير الزمني، التقطيع، فقدان الحزم، ومتوسط الرأي الشخصي. وتزداد هذه التحديات تعقيداً عند دمج VoIP مع تقنيات أمنية مثل التشفير باستخدام خوارزمية AES، أو عند تشغيله ضمن الشبكات الخاصة الافتراضية، حيث تؤثر هذه الإضافات على زمن المعالجة وحجم البيانات المنقولة [1].

تلعب خوارزميات ترميز الصوت مثل G.711، G.729، و G.723.1 دوراً محورياً في تحديد جودة المكالمات وكفاءة استخدام الموارد الشبكية. فكل خوارزمية تمتلك خصائص مختلفة من حيث معدل الضغط، التأخير الناتج، واستهلاك عرض الحزمة، مما يجعل اختيار الخوارزمية المناسبة عاملاً حاسماً في تصميم أنظمة VoIP فعالة وآمنة [2].

نظراً لتعدد هذه العوامل وتداخلها، تبرز الحاجة إلى دراسة تحليلية دقيقة تعتمد على أدوات محاكاة متقدمة مثل OPNET، والتي تتيح نمذجة الشبكات وتقييم أداء VoIP تحت ظروف مختلفة، بما في ذلك تغيير نوع الترميز، تفعيل التشفير، واستخدام VPN. ومن خلال هذه الدراسة، يمكن

الوصول إلى توصيات تقنية قابلة للتطبيق تُسهم في تحسين جودة الاتصال الصوتي، وتعزيز أمن البيانات، وتحقيق التوازن بين الأداء والكفاءة في بيئات الاتصالات الأكاديمية والمؤسسية [3].

2. الهدف من البحث:

المساهمة الأساسية لهذا البحث تكمن في تقييم أداء بروتوكول نقل الصوت عبر الإنترنت (VoIP) عند دمج تقنية الشبكات الخاصة الافتراضية مع تشفير البيانات الصوتية باستخدام خوارزمية AES، وذلك بالتزامن مع استخدام ثلاثة من أشهر خوارزميات الترميز الصوتي في نموذج شبكة كلية الهندسة المعلوماتية بجامعة حمص. تم تنفيذ هذا التقييم عبر تضمين تأثير خوارزمية AES ضمن بنية محاكي OPNET، اعتماداً على المنهجية الموضحة في الدراسة [4]، مع تفعيل الشبكات الخاصة الافتراضية، واختبار خوارزميات الترميز G.711، G.729، و G.723.1 في سيناريوهين: الأول مع تفعيل الشبكات الخاصة الافتراضية والتشفير، والثاني بدونهما. جرت المحاكاة ضمن سيناريو شبكي واقعي يعكس البنية التحتية الفعلية للشبكة، شاملاً توزيع العقد، وأنماط حركة البيانات، وتنوع أحمال الشبكة. يهدف هذا التصميم إلى تقديم تقييم دقيق لتأثير الشبكات الخاصة الافتراضية والتشفير على مؤشرات جودة الخدمة مثل التأخير من النهاية إلى النهاية، النقط، متوسط تقييم المستخدم، والإنتاجية، ضمن بيئة محاكاة تعكس الواقع الأكاديمي والتطبيقي بدقة.

3. الشبكات الخاصة الافتراضية (VPN):

تُعد الشبكات الخاصة الافتراضية (Virtual Private Networks - VPN) من أبرز تقنيات الأمان الشبكي المستخدمة في العصر الرقمي، حيث تتيح إنشاء قناة اتصال مشفرة وآمنة بين طرفين عبر شبكة. تعتمد الـ VPN على إنشاء "نفق افتراضي" يتم من خلاله تمرير البيانات بشكل مشفر باستخدام بروتوكولات مثل IPsec أو SSL/TLS، مما يمنع الجهات الخارجية من اعتراض أو تحليل حركة البيانات أثناء انتقالها بين المستخدم والخادم.

تبرز أهمية الـ VPN في عدة جوانب حيوية، أبرزها حماية الخصوصية وتأمين الاتصالات في بيئات غير موثوقة، مثل شبكات Wi-Fi العامة أو الاتصالات عبر الإنترنت المفتوح. كما تُستخدم هذه التقنية على نطاق واسع في المؤسسات لتأمين الوصول عن بُعد إلى الموارد الداخلية، مما

يُتيح للموظفين العمل من خارج الموقع دون تعريض بيانات الشركة للخطر. وتُعد الشبكات الخاصة الافتراضية أيضاً أداة فعالة لتجاوز القيود الجغرافية والوصول إلى المحتوى المحجوب، من خلال تغيير عنوان الـ IP الظاهري للمستخدم [4].

من الناحية التقنية، تختلف أنواع الـ VPN حسب طريقة التنفيذ والبروتوكولات المستخدمة، وتشمل: VPN من نوع Site-to-Site، و Remote Access VPN، و Client-Based VPN. وتتعدد بروتوكولات التشفير بين PPTP، و L2TP/IPSec، و OpenVPN، و WireGuard، حيث تختلف في مستوى الأمان والأداء والمرونة [5].

في سياق تطبيقات VOIP، يُمكن أن يؤثر استخدام VPN على جودة الخدمة (QoS) بسبب التأخير الناتج عن التشفير والتعليق، مما يستدعي دراسة دقيقة لتوازن الأمان مقابل الأداء، خاصة عند دمج VPN مع خوارزميات تشفير مثل AES وخوارزميات ترميز الصوت ذات معدلات ضغط مختلفة [6].

4. خوارزمية التشفير AES:

تُعد خوارزمية AES (معياري التشفير المتقدم) من أبرز خوارزميات التشفير الكتل المتماثل، وقد تم اعتمادها رسمياً من قبل المعهد الوطني الأمريكي للمعايير والتكنولوجيا (NIST) عام 2001 ضمن الوثيقة FIPS PUB 197، لتكون بديلاً آمناً وفعالاً عن خوارزمية DES التي لم تعد قادرة على مقاومة الهجمات التحليلية الحديثة. تعتمد AES على معالجة البيانات ضمن كتل ثابتة بطول 128 بت، وتدعم مفاتيح بطول 128، 192، أو 256 بت، مما يتيح مرونة في اختيار مستوى الأمان حسب متطلبات النظام [1].

تتكون عملية التشفير في AES من عدة جولات (10، 12، أو 14 جولة حسب طول المفتاح)، وتنفذ خلالها أربع عمليات أساسية: استبدال البايتات باستخدام جدول S-box، تدوير الصفوف لإعادة توزيع البيانات، خلط الأعمدة باستخدام عمليات رياضية في حقل غالوا، وأخيراً دمج المفتاح الفرعي عبر عملية XOR. هذه البنية تضمن تحقيق خاصيتي الانتشار والارتباك، مما يعزز مقاومة الخوارزمية للهجمات التفاضلية والخطية [7].

في تطبيقات الزمن الحقيقي مثل نقل الصوت عبر بروتوكول الإنترنت (VoIP)، يُعد دمج AES تحدياً تقنياً يتطلب دراسة دقيقة لتأثير التشفير على مؤشرات جودة الخدمة. فبينما توفر AES

حماية قوية للبيانات الصوتية، فإن عمليات التشفير وفك التشفير قد تؤدي إلى زيادة زمن التأخير، تفاوت توقيت الحزم، واحتمالية فقدان الحزم، خاصة في البيئات ذات الموارد المحدودة أو عند استخدام خوارزميات ترميز صوتي مضغوطة.

5. خوارزميات ترميز الصوت:

الكلمة codec هي اختصار لـ compressor-decompressor أو كما هو شائع أكثر coder-decoder (ترميز ضغط) وفك الترميز (فك الضغط) الإشارة الصوتية إلى بتات رقمية لكي تستخدم من قبل شبكات الحاسب. تُعرف ترميز الصوت (Audio Codecs) بأنها خوارزميات أو برامج تُستخدم لتحويل الإشارة الصوتية التناظرية إلى صيغة رقمية قابلة للنقل عبر شبكات البيانات، ومن ثم إعادة تحويلها إلى شكلها الأصلي عند الطرف المستقبل. وتُعد هذه العملية أساسية في تقنيات الاتصال الحديثة، خاصة في تطبيقات نقل الصوت عبر الإنترنت، حيث تُستخدم الترميز لضغط البيانات الصوتية وتقليل حجمها دون التأثير الكبير على الجودة، مما يساهم في تحسين كفاءة النقل وتقليل استهلاك عرض الحزمة [8]. تكمن أهمية ترميز الصوت في قدرتها على تحقيق التوازن بين جودة الصوت وكفاءة استخدام الموارد الشبكية، خاصة في البيئات التي تعاني من محدودية النطاق الترددي أو تقلبات في الأداء الشبكي. كما أن اختيار الترميز المناسب يؤثر بشكل مباشر على مؤشرات جودة الخدمة، مما يجعلها عنصراً حاسماً في تصميم أنظمة VoIP فعالة وموثوقة. الهدف من استخدام ترميز الصوت لا يقتصر على ضغط البيانات، بل يشمل أيضاً تحسين تجربة المستخدم، ضمان التوافق بين الأجهزة والبروتوكولات، وتوفير أداء مستقر في بيئات متنوعة مثل الشبكات اللاسلكية، شبكات VPN، أو الأنظمة المشفرة. تتنوع ترميز الصوت من حيث آلية الضغط، معدل البت، وجودة الصوت الناتجة، الترميز التي تغطيها هذه الدراسة:

ITU-T G.711:

يُعد هذا المعيار من أقدم وأهم خوارزميات ترميز الصوت المستخدمة في شبكات الاتصالات الرقمية، وقد تم اعتماده من قبل الاتحاد الدولي للاتصالات عام 1972. يعتمد هذا المعيار على تقنية الترميز النبضي المعدل (Pulse Code Modulation - PCM) لتحويل الإشارة الصوتية التناظرية إلى صيغة رقمية بمعدل نقل ثابت يبلغ 64 كيلوبت/ثانية، دون تطبيق ضغط

فعلي على البيانات. ويُستخدم نوعان من الضغط غير الخطي ضمن هذا المعيار μ -law : في أمريكا الشمالية و A-law في أوروبا، بهدف تحسين نسبة الإشارة إلى الضوضاء في الإشارات منخفضة السعة. رغم أن G.711 لا يُعد فعالاً من حيث تقليل حجم البيانات مقارنةً بترميز حديثة مثل G.729 أو Opus ، إلا أنه يتميز بزمن تأخير منخفض جداً، وبساطة في التنفيذ، وتوافق واسع مع بروتوكولات VoIP مثل SIP و H.323، مما يجعله خياراً مثالياً في البيئات التي تتطلب جودة صوت عالية واستجابة زمنية فورية [9].

ITU-T G.729:

يُعد هذا المعيار من أكثر خوارزميات ترميز الصوت استخداماً في تطبيقات نقل الصوت عبر الإنترنت (VoIP) ، خاصة في البيئات التي تعاني من محدودية عرض الحزمة. تم اعتماد هذا المعيار من قبل الاتحاد الدولي للاتصالات عام 1996، ويعتمد على تقنية الترميز الخطي المثير بالرمز الجبري (CS-ACELP) لضغط الإشارة الصوتية إلى معدل منخفض يبلغ 8 كيلوبت/ثانية [10]، مع الحفاظ على جودة صوت مقبولة للاستخدام العملي. يتكون G.729 من إطارات صوتية بطول 10 ميلي ثانية، ويُنفذ باستخدام خوارزميات ذات تعقيد متوسط إلى مرتفع، مما يجعله مناسباً للأنظمة التي تتطلب كفاءة في استخدام الموارد الشبكية دون التضحية الكبيرة بجودة الصوت. وقد تم تطوير عدة امتدادات لهذا المعيار، مثل G.729A الذي يتميز بتعقيد أقل مع جودة صوت أقل قليلاً، و G.729B الذي يضيف ميزة كتم الصوت (Silence Suppression)، و G.729.1 الذي يوسّع النطاق إلى الصوت العريض باستخدام طبقات ترميز قابلة للتدرج [11].

ITU-T G.723.1:

يُعد هذا المعيار من أبرز خوارزميات ترميز الصوت التي تم تطويرها لدعم خدمات الوسائط المتعددة عبر الشبكات ذات النطاق المحدود، خاصة ضمن إطار عائلة H.324 للاتصالات متعددة الوسائط. تم اعتماده من قبل الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU-T) عام 1996، ويعمل بمعدلي بت منخفضين 5.3 كيلوبت/ثانية باستخدام خوارزمية ACELP، و 6.3 كيلوبت/ثانية باستخدام خوارزمية MP-MLQ، مما يوفر مرونة في التوازن بين جودة الصوت وكفاءة استخدام الموارد. يعتمد G.723.1 على تقنية التحليل التنبؤي الخطي مع الترميز التحفيزي (LPC)

(ABS)، ويقوم بضغط الإشارة الصوتية إلى إطارات بطول 30 ميلي ثانية، مما يجعله مناسباً لتطبيقات مثل مؤتمرات الفيديو، VoIP، والاتصالات عبر الأقمار الصناعية. كما يتضمن ميزات متقدمة مثل كشف النشاط الصوتي (VAD) وضغط الصمت (Silence Compression)، مما يساهم في تقليل استهلاك عرض الحزمة أثناء فترات عدم الكلام [11].
يعرض الجدول (1) أهم خصائص الترميز الصوتية الثلاثة المدروسة.

الجدول (1): خصائص الترميز الصوتية المدروسة [9]

G.723.1	G.729	G.711	الخاصية
5.3 / 6.3 kbps	8 kbps	64 kbps	معدل البت
متوسطة	جيدة	عالية جداً	جودة الصوت
مرتفع	متوسط	منخفض جداً	التأخير
منخفض جداً	منخفض	مرتفع	استهلاك الحزمة
مرتفع	متوسط	بسيط	تعقيد الترميز
VoIP منخفض النطاق	VoIP / WAN	LAN	الاستخدام الأمثل

6. الدراسات السابقة:

شرح الدراسة	المرجع
<p>في دراسة حديثة تم تحليل أداء خوارزمية AES عند تطبيقها على بيانات صوتية متنوعة، بهدف تقييم كفاءتها في بيئات اتصالات متعددة. اعتمد الباحثون على مجموعة من مؤشرات الأداء، شملت زمن التشفير وفك التشفير، استهلاك المعالج، الطاقة المستهلكة، ومعدل الإنتاجية. أظهرت النتائج أن AES حافظت على أداء مستقر عبر الأنماط المختلفة، دون تأثيرات كبيرة على زمن الاستجابة أو كفاءة النظام، مما يعزز موثوقيتها في تطبيقات الصوت المشفر. كما ناقشت الدراسة تحديات إدارة المفاتيح وتكامل الخوارزمية مع المنصات البرمجية والعنادية، وأوصت بتطوير حلول أكثر تكيفاً مع متطلبات الاتصالات الحديثة.</p>	<p>Hazzaa et al (2024) [12]</p>

<p>في هذه الدراسة تم تحليل أثر تطبيق خوارزمية التشفير المتقدمة AES على أداء نظم نقل الصوت عبر بروتوكول الإنترنت. ركزت الدراسة على قياس تأثير عمليات التشفير وفك التشفير على مؤشرات الأداء الأساسية مثل زمن الاستجابة، جودة الخدمة (QoS)، واستهلاك الموارد. أظهرت النتائج أن تطبيق AES يوفر مستوى عالياً من السرية، لكنه يؤدي إلى زيادة طفيفة في زمن المعالجة وتأخير المكالمات، مما قد يؤثر على تجربة المستخدم في البيئات الحساسة للزمن. ومع ذلك، اعتبرت الدراسة أن هذا التأثير يقع ضمن الحدود المقبولة، وأوصت باستخدام AES في تطبيقات VoIP مع مراعاة التوازن بين الأمان والأداء.</p>	<p>Talha et al (2013) [13]</p>
<p>قارنت بين خوارزميتي AES و ChaCha20 في تأمين VoIP ، ووجدت أن AES أكثر كفاءة في البيئات ذات الموارد المحدودة، بينما توفر ChaCha20 أداءً أعلى في الأنظمة الحديثة. الدراسة استخدمت اختبارات زمنية وتحليل جودة الصوت.</p>	<p>Rahman & Chowdhury (2023) [14]</p>
<p>تهدف هذه الدراسة إلى تأمين نقل البيانات الصوتية عبر الشبكات باستخدام خوارزمية AES-128 ، مع التحكم في عملية التشفير عبر مفتاح سري. تم تضمين تقنيات إضافية مثل Forward Error Correction (FEC) و Interleaving لتحسين جودة الإشارة وتقليل تأثير الضوضاء أثناء الإرسال اللاسلكي. استخدمت الدراسة مؤشرات مثل زمن التنفيذ، حجم الملف، وقيمة SNR لتقييم الأداء، وأظهرت النتائج أن النظام المقترح يحقق تشفيراً فعالاً مع الحفاظ على جودة الصوت، خاصة عند استخدام مرشح بمتوسط 400 Hz.</p>	<p>Nugraha et al [15]</p>
<p>تحلل هذه الدراسة شبكة كلية الهندسة المعلوماتية في جامعة حمص لاختبار إمكانية إضافة خدمة نقل الصوت عبر الإنترنت. تم في البداية</p>	<p>Ghazi et al [16]</p>

<p>محاكاة الشبكة بدون خدمة VoIP، ثم أضيفت الخدمة وقيم الأداء باستخدام ثلاثة ترميزات صوتية، أظهرت النتائج أن G.711 يتفوق في جودة الصوت، التأخير، والتقطيع، بينما G.723.1 يتفوق في الإنتاجية واستهلاك عرض الحزمة، و G.729A يشغل موقعاً متوسطاً بينهما. توضح الدراسة أن اختيار الترميز يعتمد على حالة الشبكة وسرعة الوصلات، وتوصي باستخدام G.711 للاتصالات داخل الشبكة الداخلية للكلية أو الجامعة، بينما يُفضل استخدام G.729 أو G.723.1 للمكالمات الصوتية الخارجية.</p>	
<p>تلخص الدراسة تأثير دمج تشفير AES مع ثلاث خوارزميات ترميز صوتي G.711، G.729، G.723.1 على جودة خدمة VoIP في بيئة محاكاة لشبكة كلية الهندسة بجامعة حمص. أظهرت النتائج أن G.711 مع التشفير يوفر أعلى جودة صوت لكنه يعاني من تأخير وتقطيع مرتفعين، ما يجعله مناسباً للتطبيقات التي تحتاج إلى وضوح وسرية مع توفر سعة شبكية كافية. أما G.729 بدون تشفير، فقد تفوق في الأداء الزمني بفضل أقل تأخير وتقطيع، مما يجعله خياراً جيداً للبيئات التعليمية التي تتطلب استجابة سريعة واستقرار، رغم جودة صوت أقل. بينما قدمت G.723 أداءً متوسطاً يجعلها خياراً مرناً للبيئات ذات الموارد المحدودة. الدراسة تؤكد أهمية الموازنة بين الأمان والأداء واختيار التكوين المناسب بناءً على طبيعة الاستخدام.</p>	<p>Ghazi [17]</p>
<p>تستعرض الدراسة التحديات الأمنية التي تواجه أنظمة VoIP المدمجة، والتي تجمع بين خدمات الصوت والبيانات في بنية شبكية واحدة. تشير الدراسة إلى أن التحول من الشبكات التقليدية إلى شبكات VoIP يزيد من مخاطر مثل التنصت، وهجمات حجب الخدمة، وهجمات الرجل في المنتصف، والاحتيال الصوتي. وتوصي الدراسة بتطبيق استراتيجيات أمنية متقدمة تشمل التشفير الكامل، المصادقة القوية،</p>	<p>Timilehin (2024) [18]</p>

<p>الكشف عن التهديدات باستخدام الذكاء الاصطناعي، واعتماد نموذج "الثقة الصفيرية". كما تناقش دور تقنيات مثل البلوك تشين والتشفير الكمي في تعزيز أمن الاتصالات الصوتية عبر الإنترنت</p>	
<p>تناولت الدراسة تأثير استخدام بروتوكول IPsec VPN على أداء شبكات VoIP، باستخدام محاكاة عبر المحاكى OPNET. أظهرت النتائج أن إضافة طبقة الأمان عبر IPsec تؤدي إلى زيادة طفيفة في التأخير والاهتزاز، لكنها لا تؤثر بشكل كبير على جودة الخدمة الصوتية. خلصت الدراسة إلى أن استخدام IPsec يعزز الأمان دون التأثير السلبي الملحوظ على أداء VoIP، مما يجعله خياراً مناسباً للشبكات التي تتطلب حماية عالية للاتصالات.</p>	<p>Michael (2020) [19]</p>
<p>قدمت نموذجاً هجيناً لتحليل أداء VoIP باستخدام OPNET، وركزت على دمج تقنيات QoS والتشفير في بيئات متعددة البروتوكولات. الدراسة أظهرت أن التصميم الشبكي يلعب دوراً حاسماً في تحسين الأداء.</p>	<p>Hassan et al. (2021) [20]</p>
<p>اقترحت خوارزمية لاختيار البروتوكول الأمثل لشبكات WLAN في تطبيقات VoIP، بناءً على تحليل الأداء والتأخير وفقدان الحزم. الدراسة دعمت استخدام بروتوكولات مثل IEEE 802.11ac لتحقيق أفضل أداء.</p>	<p>Ali et al. (2021) [21]</p>
<p>استخدمت OPNET لتحليل أداء VoIP عبر طوبولوجيات مختلفة LAN، MAN، WAN، WLAN، وخلصت إلى أن تصميم الشبكة يؤثر بشكل مباشر على جودة المكالمات، خاصة عند استخدام VPN والتشفير.</p>	<p>Chakraborty & Telgote (2018) [22]</p>

بالنظر الى جميع الدراسات السابقة يظهر أنه من الضرورة بمكان دراسة تأثير تطبيق كل الشبكات الخاصة الافتراضية على جودة الخدمة لبروتوكول نقل الصوت عبر الإنترنت بعد تطبيق التشفير

باستخدام خوارزمية AES في نموذج شبكي واقعي وبالتالي يعتبر هذا البحث إمتداد للدراسة المرجعية [16] و [17].

7. محاكي الشبكات أوبنت:

يُعد محاكي الشبكات (Optimized Network Engineering Tools) OPNET من أبرز أدوات المحاكاة المستخدمة في تحليل وتصميم الشبكات الحاسوبية، وقد طُوّر لأول مرة عام 1986 وأصبح منصة متكاملة قادرة على محاكاة شبكات الاتصال الكبيرة والمعقدة بنمذجة دقيقة للبروتوكولات، الأجهزة، التطبيقات، والأداء [23]. يتميز OPNET بواجهته الرسومية القوية، ودعم جدولة الأحداث الديناميكية، وأدوات التحليل المتكاملة، مما يمكّن الباحثين من إنشاء نماذج شبكية واقعية تحاكي سلوك الشبكات تحت ظروف متعددة دون الحاجة إلى بنية تحتية فعلية، الأمر الذي يقلل التكاليف ويزيد من مرونة التجارب.

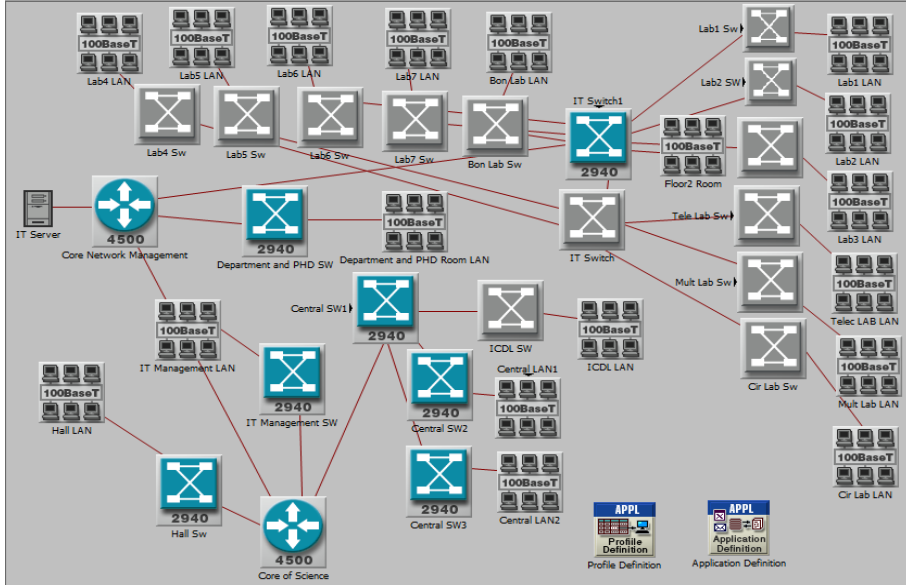
يستخدم OPNET على نطاق واسع في الدراسات الأكاديمية والتطبيقية، خاصة في تحليل أداء بروتوكولات VoIP مع دمجها مع بروتوكولات وتقنيات أخرى وفي بيئات مختلفة، حيث يسمح بالتحكم الكامل في إعدادات الشبكة وتخصيص خصائص الأجهزة والتطبيقات [24]. كما يدعم لغات البرمجة Proto-C و C لتوسيع إمكانيات المحاكاة، ويمتلك مكتبة واسعة من النماذج الجاهزة التي يمكن تعديلها لتناسب مع متطلبات البحث.

في هذا البحث، تم اختيار إصدار OPNET Modeler 14.5 لما له من دعم مميز لبروتوكول نقل الصوت عبر الإنترنت وخوارزميات ترميز الكلام، بالإضافة إلى سهولة استخدام واجهته الرسومية وقدرته على عرض النتائج بشكل رسومي واضح، مما يجعله ملائماً لنمذجة شبكة كلية الهندسة المعلوماتية بجامعة حمص، مع إمكانية تخصيص البنية الشبكية وتطبيق سيناريوهات متعددة تشمل بروتوكولات VoIP وخوارزميات التشفير AES، والشبكات الخاصة الافتراضية، وهو ما يعزز موثوقية النتائج ويوفر توصيات عملية للتطبيق في بيئات أكاديمية ومؤسسية مماثلة.

8. التطبيق العملي:

في هذه الدراسة سوف يتم تحليل أداء بروتوكول نقل الصوت عبر الإنترنت باستخدام مجموعة خوارزميات الترميز الثلاثة المدروسة مع تطبيق كل من خوارزمية التشفير AES والشبكات

الخاصة الافتراضية ودون تفعيلها وذلك في نموذج شبكة كلية الهندسة المعلوماتية بجامعة حمص. في البداية سوف نذكر بتوصيف نموذج شبكة كلية الهندسة المعلوماتية في جامعة حمص كما تم توصيفه سابقاً في الدراسة [25] والدراسة [17] قبل إضافة خوارزمية التشفير AES والشبكات الخاصة الافتراضية.



الشكل (1): الطوبولوجيا الشبكية الداخلية لشبكة كلية الهندسة المعلوماتية بجامعة حمص

حيث أن شبكة كلية الهندسة المعلوماتية بجامعة حمص تنتوزع على ثلاثة طوابق في الطابق الأول تتوضع المكاتب الإدارية (العميد - سكرتاريا العميد - نواب العميد - محاسب الرواتب - رئيس الدائرة - الذاتية - شؤون الطلاب العام - شؤون الطلاب الموازي - الديوان - الامتحانات - قاعة السمнар - التصوير - معتمد الرسوم) بالإضافة إلى المخبر المركزي الذي يحتوي على شبكة مكونة من 100 جهاز حاسوب ومخبر علوم الحاسب والقاعات حيث أن جميع تجهيزات هذا الطابق تتصل شبكياً بالمبدلة الرئيسية في كلية العلوم التي تتوضع في الطابق الأرضي لكلية العلوم والتي تتصل بدورها بالمبدلة الرئيسية الأخرى الموجودة في غرفة إدارة الشبكة في الطابق الثاني. أما بالنسبة للطابق الثاني فيحتوي على بعض الغرف الإدارية (المكتبة - المخبرين - مراقب الدوام - الدراسات العليا) والمخابر (1-2-3- الوسائط المتعددة - الاتصالات - الدارات)

التي تتصل جميعها بالمبدلتين IT_Switch و IT_Switch1 الموجودتين في نفس الطابق والتي تتصل احدهما بشكل مباشر مع المبدلة الرئيسية في غرفة إدارة الشبكة في نفس الطابق، وفي الطرف الأخر يوجد بعض الغرف الإدارية التي تخص أعضاء الهيئة التدريسية وغرفة أعضاء الهيئة الفنية والأقسام والسكرتارية الخاصة بهم وجميعها تتصل بالمبدلة Department and PHD SW التي تتصل بدورها بالمبدلة الرئيسية في غرفة إدارة الشبكة. أما الطابق الثالث يحتوي على المخابر (البنيان - 4 - 5 - 6 - 7) والتي تتصل جميعها بالمبدلتين IT_Switch و IT_Switch1 الموجودتين في الطابق الثاني. يبين الشكل (1) الطوبولوجيا الشبكية لكلية الهندسة المعلوماتية بجامعة حمص. كما يجمع الجدول (2) كافة التجهيزات الشبكية الخاصة بكلية الهندسة المعلوماتية. حيث تم استخدام المكون BaseT_LAN100 الموجود ضمن المحاكى أوبنت للتعبير عن الشبكات الداخلية للمكاتب الإدارية والمخابر والقاعات وغيرها بحيث تم ضبط عدد الأجهزة ضمنها باستخدام الخاصية (Number of Workstations). كما تم تعريف ستة أنواع من الحمل في هذه الشبكة كما هو مبين في الجدول (3)، وتم ضبط استخدام الأنواع الستة من الحمل في عقدة المخدم الخاصة بالكلية كما هو مبين في الشكل (2) والمتوضع في غرفة إدارة الشبكة من خلال ضبط قيمة الخاصية Supported Services. بالنسبة لسرعة الكابلات فإن جميع سرع الكابلات المستخدمة في الشبكات الداخلية الفرعية (داخل كل من المخابر والقاعات والمكاتب الإدارية والوصلات بين مبدلات المخابر (الغير قابلة للإدارة) والمبدلات الرئيسية في الطوابق والوصلات بين المبدلة الرئيسية في المخبر المركزي والمبدلات الأخرى داخله) هي 100 ميغابت في الثانية، أما بالنسبة للكابلات التي تربط بين المبدلات الرئيسية (التي من النوع سيسكو 2940) في الطوابق والمبدلتين الرئيسيتين (من النوع سيسكو 4500) في كلية العلوم وفي إدارة الشبكة هي من النوع فايرر بسرعة 1000 ميغابت في الثانية.

تم تعريف اثنان من البروفائل كما هو مبين في الشكل (3) الأول عام باسم (General Profile) يعمل بالتطبيقات الستة السابقة يتم استخدامه في أجهزة كل من المكاتب الإدارية وغرف أعضاء الهيئة التدريسية والفنية والأقسام ومخبر علوم الحاسب والمخبر المركزي، والثاني محدود باسم (Lab Profile) يعمل بثلاثة من التطبيقات فقط (نقل الملفات - تصفح الويب - الحمل الصوتي) تعمل بشكل متزامن مع بعضها ويتم استخدامه في أجهزة المخابر جميعها وفي القاعات. حيث أن

كلاهما يبدئان بالعمل عند الثانية 100 من بدء المحاكاة وينتهيان عند انتهاء زمن المحاكاة. تم ضبط استخدام كل من البروفایل الأول والثاني في العقد BaseT_LAN100 من خلال ضبط قيمة الخاصية Supported Profile.

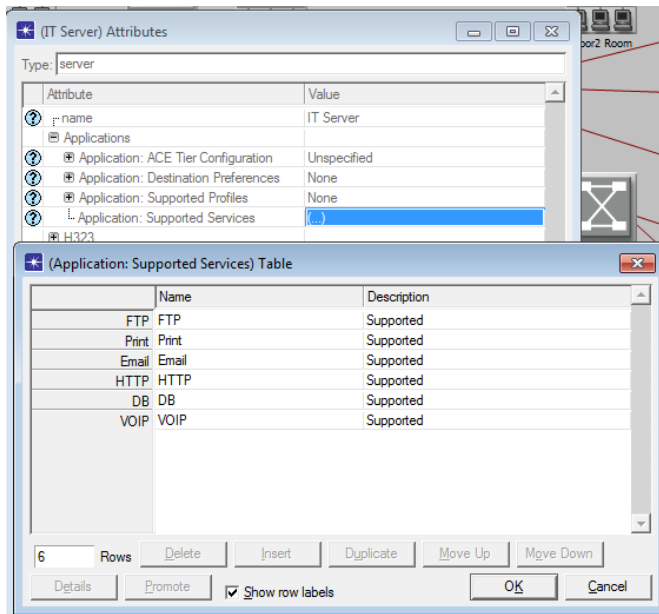
الجدول (2): تجميع التجهيزات الشبكية الخاصة بكلية الهندسة المعلوماتية

العدد	التجهيز الشبكية
338	النقاط الشبكية
5	مبدلة ب 24 منفذ قابلة للإدارة
2	مبدلة ب 48 منفذ قابلة للإدارة
13	مبدلة ب 24 منفذ غير قابلة للإدارة
2	مبدلة شبكية مركزية من النوع سيكسو 4500
1	مخدم تطبيقات
325	أجهزة حواسيب
1	طابعة شبكية

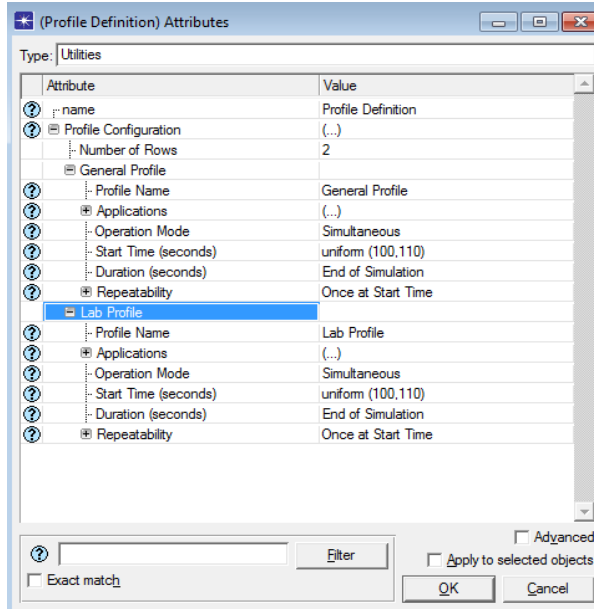
الجدول (3): التطبيقات المستخدمة في الشبكة

نوع الحمل	اسم التطبيق
عالي	نقل الملفات (FTP)
متوسط	طباعة (Print)
ملفات نصية	بريد الكتروني ((Email (POP 3 , SMTP))
متوسط	قواعد بيانات (Database)
عالي جداً	تصفح مواقع الويب والتحميل (HTTPS)
متوسط	الحمل الصوتي (VOIP)

تأثير الشبكات الخاصة الافتراضية و خوارزمية التشفير AES و خوارزميات الترميز الصوتي على أداء بروتوكول VOIP (كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة حمص نمودجا)

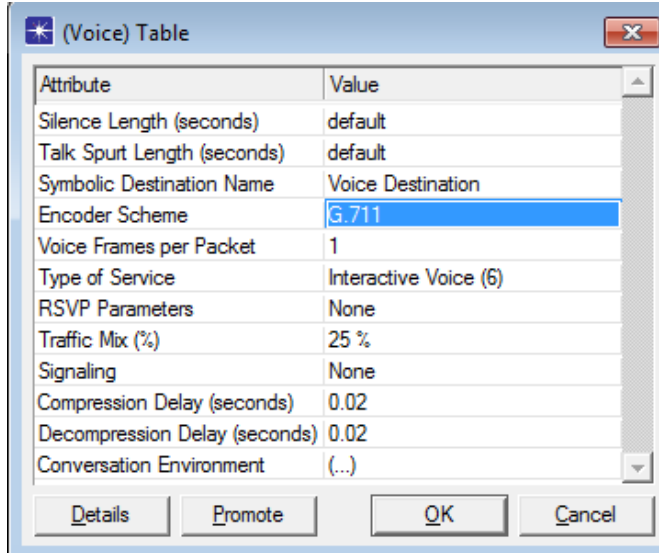


الشكل (2): ضبط الخاصية Supported Services في عقدة المخدم

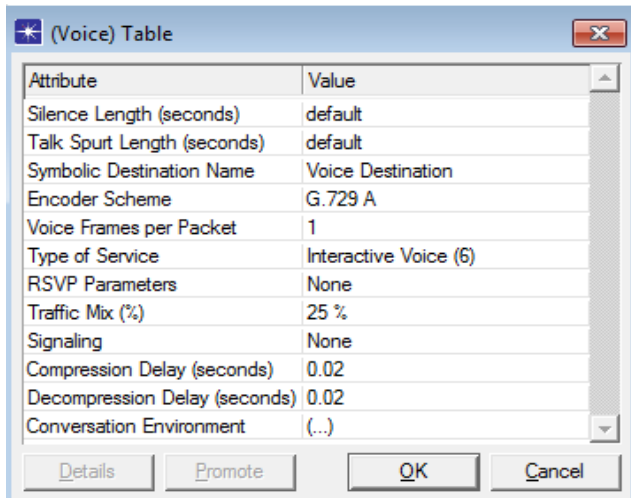


الشكل (3): اعدادات المحاكاة للمكون Profile Config

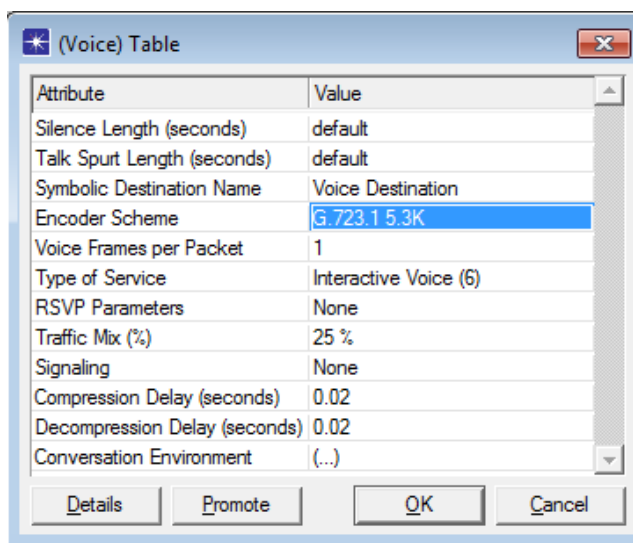
تم تطبيق كل خوارزمية من خوارزميات الترميز الثلاثة على حدا في سيناريو مستقل حيث تم ضبط اعدادات كل منها بالإعدادات التالية (عدد الإطارات الصوتية في الحزمة هو إطار واحد، تأخير الضغط وفك الضغط هو 20 ميلي ثانية لكل منهما) كما هو مبين في الأشكال (4) (5) (6) للتراميز G.711، G.729، G.723.1 على الترتيب.



الشكل (4): اعدادات خوارزمية G.711 في المحاكي أونبت

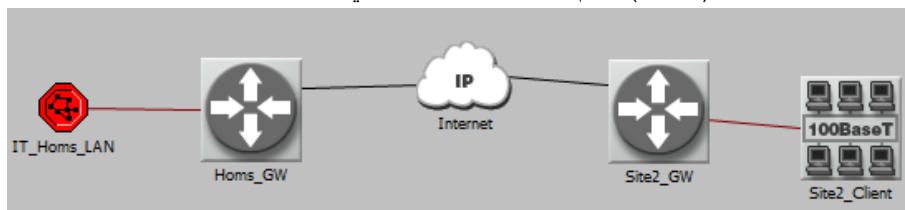


الشكل (5): اعدادات خوارزمية G.729 في المحاكي أونبت



الشكل (6): اعدادات خوارزمية G.723.1 في المحاكي أوبنت

وقبل إضافة كل من الشبكات الخاصة الافتراضية ومحاكاة تأثير التشفير باستخدام خوارزمية الـ AES الى الشبكة المدروسة سنقوم بتوسيع الشبكة السابقة وذلك لأن معظم استخدامات الشبكات الخاصة الافتراضية تكون مع الاتصالات من خارج الشبكة، يبين الشكل (7) توسيع الشبكة المدروسة حيث إن الشبكة الفرعية IT_Homs_LAN تشكل الشبكة الداخلية للكلية التي تم توصيفها سابقاً، والوصلة بين موجه الجامعة والمكون IP Cloud من النوع PPP_DS3 تعمل بسرعة 44.736 ميغابت في الثانية أما الوصلة الثانية بين IP Cloud والطرف الموجه الخارجي فهي من النوع PPP_DS1 وتعمل بسرعة (1.54) ميغابت في الثانية وتم تطبيق تأخير في العقدة IP Cloud تم اعداده كتوزيع طبيعي (Normal distribution) خصائصه $N(0.175,0.001)$ (بالثانية). وتم ضبط عدد الأجهزة في المكون Site2_Client بـ 20.



الشكل (7): الطوبولوجيا المدروسة بعد التوسيع

ومن ثم سوف نقوم بمحاكاة أثر اضافة الخوارزمية AES لتشفير البيانات الصوتية كما تم الإشارة اليه في دراسة سابقة [17] دون تنفيذ التشفير فعلياً من خلال الخطوات التالية:

لتحقيق ذلك، تم تعديل خصائص تطبيق VoIP داخل مكون **Application Configuration** لمحاكاة التأثير الزمني والحسابي الناتج عن استخدام خوارزمية AES، وتحديدًا نمط **AES-256** الذي يُعد الأكثر تعقيداً من حيث المعالجة.

خطوات محاكاة إضافة تأثير التشفير:

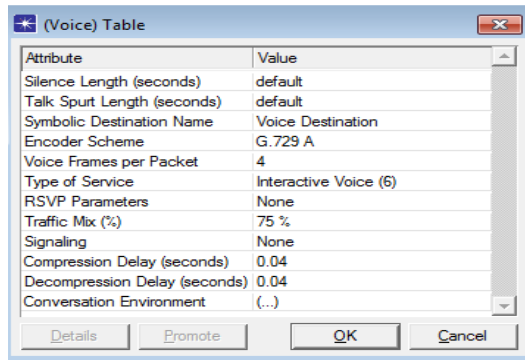
1- تعديل الخاصية **Voice Frames per Packet** تم رفع القيمة من 1 إلى 4، مما يزيد من حجم الحزمة الصوتية ويعكس تأثير التشفير على البيانات المنقولة.

2- زيادة قيمة **Compression Delay** تم ضبط التأخير إلى 4 ميلي ثانية لمحاكاة زمن التشفير في طرف الإرسال.

3- زيادة قيمة **Decompression Delay** تم ضبط التأخير إلى 4 ميلي ثانية لمحاكاة زمن فك التشفير في طرف الاستقبال.

4- تعديل نمط **Traffic Mix** تم اختيار نمط **75%** بدلاً من 25% لمحاكاة بيئة ذات حمل شبكي مرتفع، يعكس الضغط الناتج عن التشفير.

يظهر الشكل (8) التعديلات المقترحة على تطبيق الـ VOIP لمحاكاة أثر اضافة التشفير باستخدام الخوارزمية AES لأحد الترميز الصوتية وليكن G.729 ونكرر نفس العملية للترميز G.711 و الترميز G.723.1.



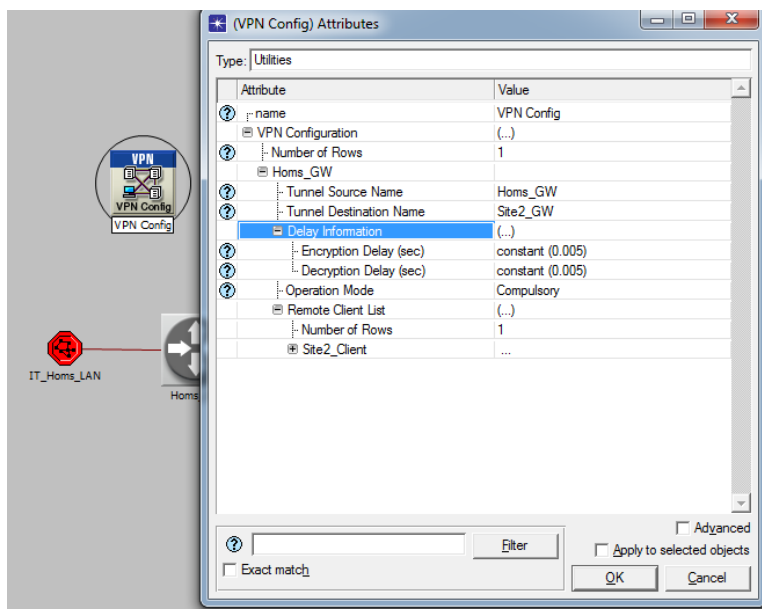
Attribute	Value
Silence Length (seconds)	default
Talk Spurt Length (seconds)	default
Symbolic Destination Name	Voice Destination
Encoder Scheme	G.729 A
Voice Frames per Packet	4
Type of Service	Interactive Voice (6)
RSVP Parameters	None
Traffic Mix (%)	75 %
Signaling	None
Compression Delay (seconds)	0.04
Decompression Delay (seconds)	0.04
Conversation Environment	(...)

الشكل (8): تعديل الاعدادات الصوتية لمحاكاة أثر اضافة التشفير باستخدام AES على

الترميز G.729

والآن سوف نقوم بإعداد الشبكات الخاصة الافتراضية:

أولاً نقوم بإضافة المكون IP_VPN_Config الى الشبكة ونقوم بتفعيله بالإعدادات التالية والموضحة في الشكل (9) حيث تم ضبط قيمة الخاصية Encryption Delay والخاصية Decryption Delay بالقيمة 0.005 لمحاكاة تأثير استخدام الخوارزمية AES_256 في بناء النفق.

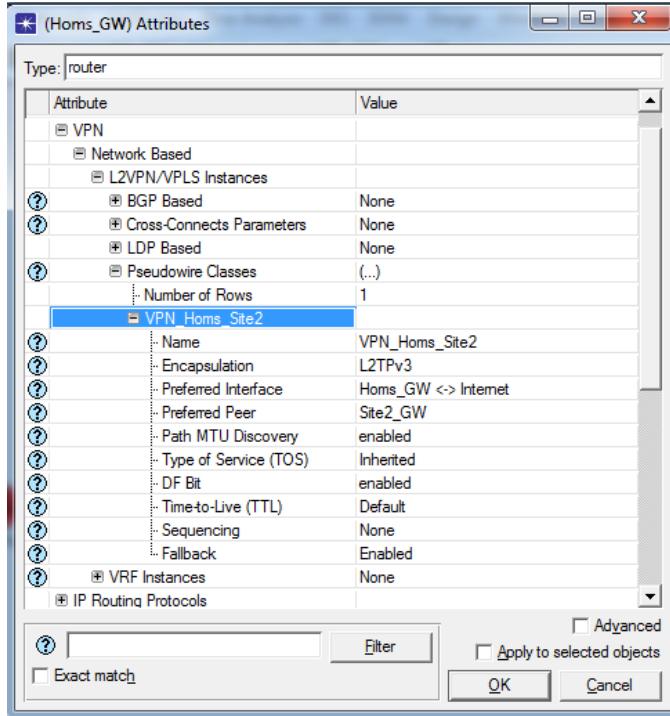


الشكل (9): إعدادات المكون VPN_Config

ومن ثم سوف نضبط إعدادات الـ VPN في كل من الموجه Homs_GW والموجه Site2_GW بالإعدادات المبينة في الشكل (10) و (11) على الترتيب، حيث تم ضبط جميع الخصائص في الخاصية Pseudowire Classess بشكل متناظر بين الموجهين مثل نوع التغليف، الوصلة المستخدمة، والطرف الآخر وغيرها.

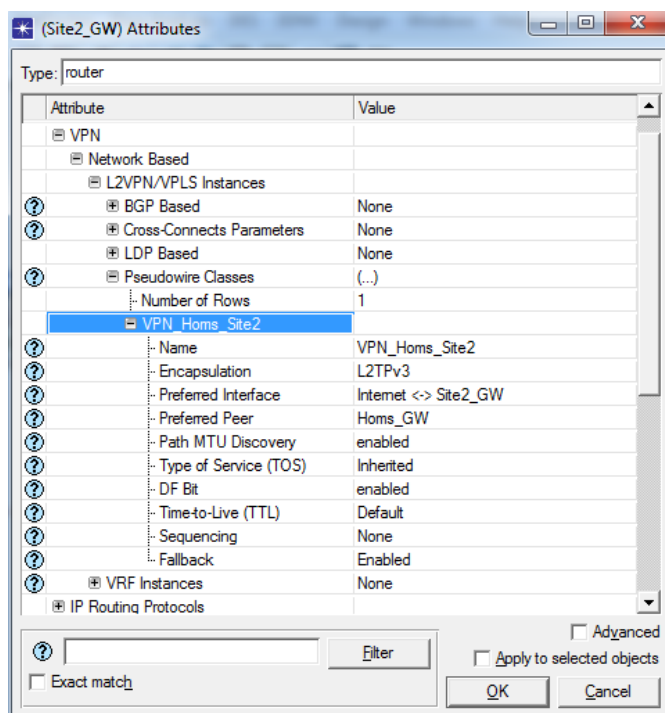
في المجمل حصلنا على ستة سيناريوهات، لكل خوارزمية ترميز صوتي سيناريو مع تطبيق خوارزمية التشفير AES والشبكات الخاصة الافتراضية وأخر دون تطبيقهما، وتم قياس كل من القيم التالية لبروتوكول نقل الصوت عبر الإنترنت (متوسط الرأي الشخصي، التقطيع، التأخير من

النهاية الى النهاية، الحمل المستلم)، بالإضافة الى الانتاجية للوصلة الخارجية بين Site2_GW والعقدة IP Cloud بواسطة المحاكي أوبنت ويزمن محاكاة مقداره 10 دقائق لكل سيناريو .



الشكل (10): اعدادات الـ VPN على الموجه Homs_GW

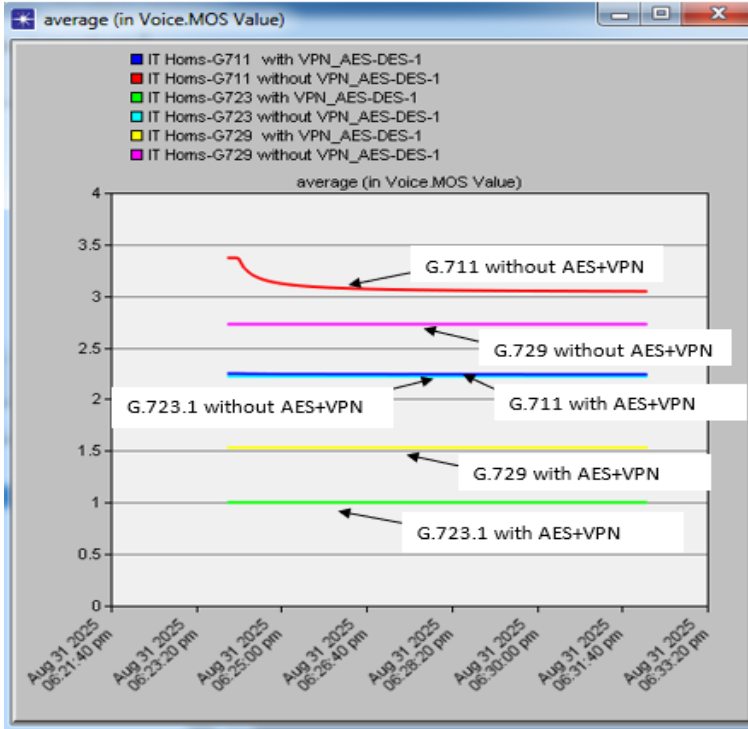
تأثير الشبكات الخاصة الافتراضية وخوارزمية التشفير AES و خوارزميات الترميز الصوتي على أداء بروتوكول VOIP (كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة حمص أنموذجاً)



الشكل (11): اعدادات الـ VPN على الموجه Site2_GW

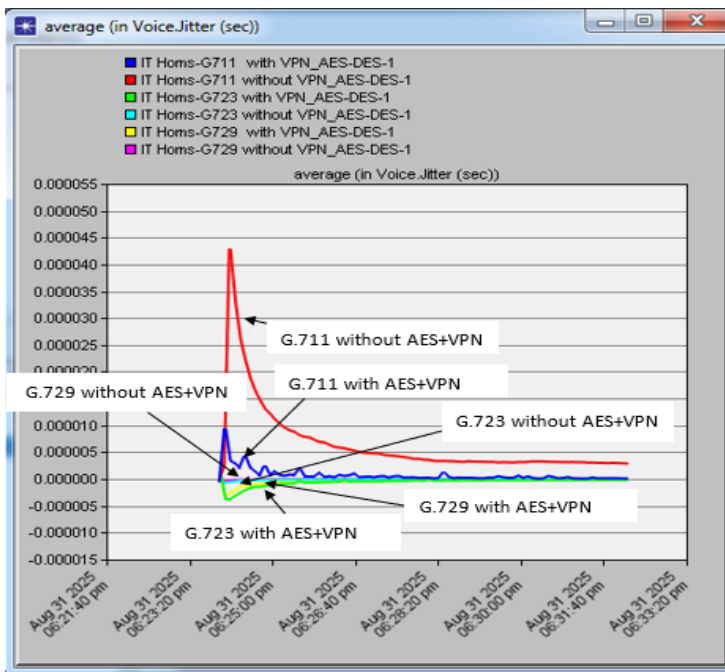
9. النتائج والمناقشة:

تظهر الأشكال (12) (13) (14) (15) نتائج تنفيذ المحاكاة للسيناريوهات الستة المدروسة حيث تظهر كل من متوسط كل من الرأي الشخصي، التقطيع، التأخير من النهاية الى نهاية، والحمل المستلم لبروتوكول الـ VOIP على الترتيب، كما يظهر الشكل (16) متوسط قيمة الإنتاجية للوصلة الخارجية بين Site2_GW و العقدة IP Cloud.

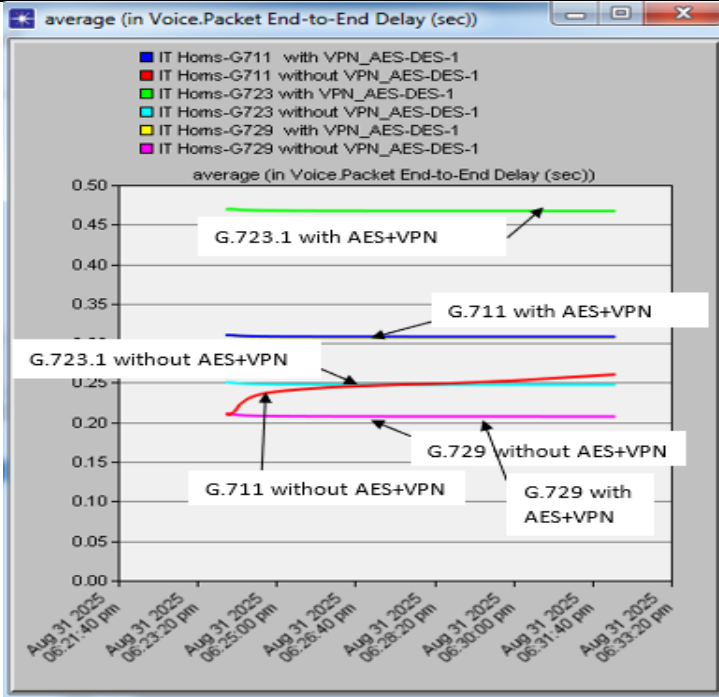


الشكل (12): متوسط الرأي الشخصي لبروتوكول VOIP في سيناريوهات المحاكاة الستة

تأثير الشبكات الخاصة الافتراضية وخوارزمية التشفير AES و خوارزميات الترميز الصوتي على أداء بروتوكول VOIP (كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة حمص نموذجاً)

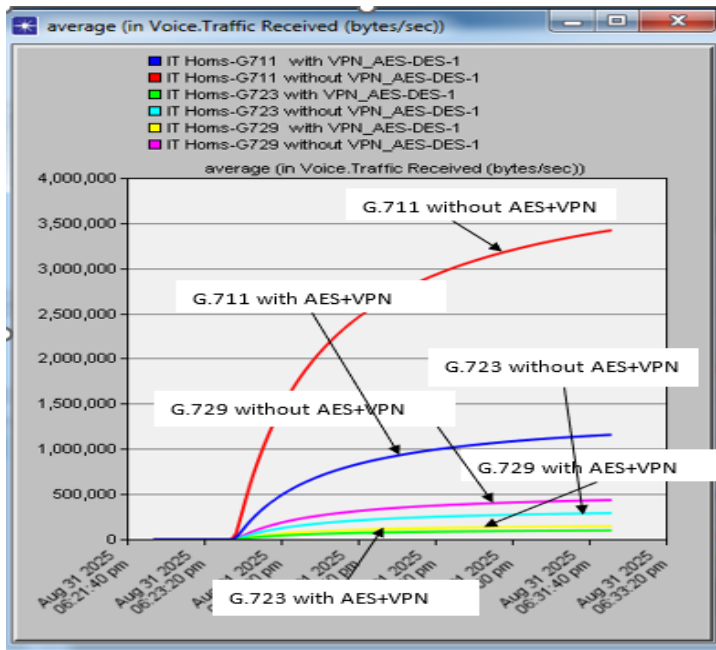


الشكل (13): متوسط التقطيع لبروتوكول VOIP في سيناريوهات المحاكاة الستة

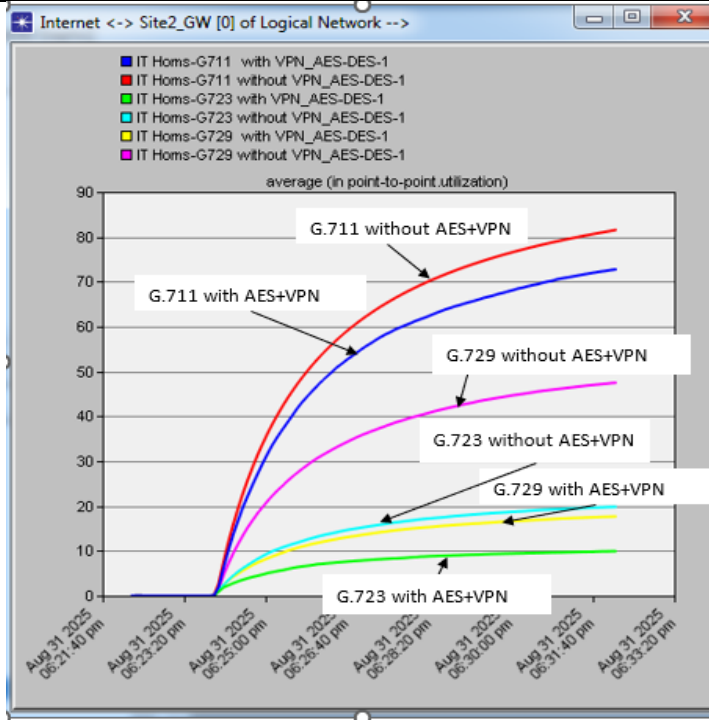


الشكل (14): متوسط التأخير من النهاية الى نهاية لبروتوكول VOIP في سيناريوهات المحاكاة السنة

تأثير الشبكات الخاصة الافتراضية وخوارزمية التشفير AES و خوارزميات الترميز الصوتي على أداء بروتوكول VOIP (كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة حمص نموذجاً)



الشكل (15): متوسط الحمل المستلم لبروتوكول VOIP في سيناريوهات المحاكاة الستة



الشكل (16): متوسط الإنتاجية لكافة التطبيقات على الوصلة الخارجية بين Site2_GW و IP Cloud في سيناريوهات المحاكاة الستة

قراءة النتائج والمخططات البيانية:

متوسط التأخير من النهاية إلى النهاية (End-to-End Delay) :

- أظهرت النتائج أن خوارزمية G.723 سجلت أعلى تأخير عند تفعيل VPN و AES، حيث تجاوزت القيمة 0.45 ثانية، مقارنة بـ 0.30 ثانية بدون التشفير.
 - خوارزمية G.729 أظهرت أداءً أكثر استقراراً، حيث بلغ التأخير حوالي 0.15 ثانية مع التشفير، و 0.10 ثانية بدون.
 - أما G.711 فقد سجلت أقل تأخير متوسطاً، لكنها تتأثر بشكل ملحوظ عند تفعيل التشفير، مما يشير إلى حساسية هذه الخوارزمية لحجم الحزمة المشفرة.
- الاستنتاج: التشفير يزيد من التأخير، خاصة مع خوارزميات ذات معدل بيانات مرتفع.

التقطيع (Jitter) : لوحظ أن التقطيع كان أعلى في سيناريوهات G.711 بدون VPN، حيث تجاوز 5.5 ميكروثانية، ثم استقر لاحقاً. التقطيع في G.729 كان الأدنى والأكثر استقراراً، سواء مع أو بدون التشفير، مما يعكس كفاءتها في بيانات مشفرة. التشفير لم يؤثر بشكل كبير على التقطيع في G.729، لكنه حسن استقرار G.711 نسبياً بعد فترة البدء.

الاستنتاج: خوارزمية G.729 هي الأكثر ملاءمة من حيث التقطيع في بيانات مشفرة. متوسط رأي المستخدم (MOS):

- سجلت G.729 بدون VPN أعلى قيمة MOS قاربت 4.0، تليها G.711 بدون تشفير.
 - عند تفعيل VPN و AES، انخفضت قيم MOS لجميع الخوارزميات، خاصة G.723.1 التي سجلت أقل من 3.0.
 - يشير ذلك إلى تأثير التشفير على جودة الصوت المدركة من قبل المستخدم النهائي.
- الاستنتاج: التشفير يؤثر سلباً على تقييم المستخدم، خاصة مع خوارزميات ذات ضغط عالي مثل G.723.1.

البيانات المستلمة (Traffic Received):

- سجلت G.711 مع VPN أعلى معدل بيانات مستلمة تجاوز 3,000,000 بايت/ثانية، مما يعكس حجم الحزم الكبير الناتج عن التشفير.
- G.729 و G.723.1 أظهرتا معدلات أقل، مما يجعلها أكثر كفاءة في استهلاك عرض النطاق الترددي.

الاستنتاج: التشفير يزيد من حجم البيانات المستلمة، ويؤثر على كفاءة الشبكة، خاصة مع G.711.

الإنتاجية على الوصلة الخارجية (Utilization):

- أظهرت الوصلة بين Site2_GW والإنترنت أعلى نسبة استخدام في سيناريوهات G.711 مع التشفير، حيث تجاوزت 85%.
- خوارزمية G.729 حافظت على استخدام منخفض ومستقر، مما يدل على كفاءتها في بيانات ذات ضغط شبكي.

الاستنتاج: التشفير يرفع استهلاك الوصلات الخارجية، ويجب مراعاة ذلك في تصميم الشبكات الأكاديمية.

بناءً على نتائج المحاكاة، يُوصى بما يلي:

1. اعتماد خوارزمية G.729 كخيار ترميز أساسي في بيئة الكلية، نظراً لقدرتها على تحقيق توازن أفضل بين جودة الصوت (MOS) وكفاءة استخدام الموارد، خاصة عند تفعيل تقنيات التشفير والشبكات الخاصة الافتراضية.
2. تجنب استخدام G.711 في السيناريوهات المشفرة داخل الشبكة الأكاديمية، لما أظهرته من ارتفاع ملحوظ في التأخير واستهلاك عرض النطاق الترددي، مما قد يؤثر سلباً على أداء التطبيقات التفاعلية مثل المحاضرات الصوتية أو الاجتماعات الافتراضية.
3. تفعيل تقنيات اكتشاف النشاط الصوتي (VAD) ضمن إعدادات VoIP في الشبكة، لتقليل حجم البيانات المرسله أثناء فترات الصمت، وبالتالي تحسين الأداء العام في بيئة مشفرة.
4. مراعاة التوازن بين الأمان والأداء عند تصميم أو تحديث الشبكة الأكاديمية، بحيث يتم اختيار خوارزميات التشفير والترميز بما يتناسب مع طبيعة الاستخدام، وعدد المستخدمين، وحجم الحركة المتوقعة.
5. استخدام نتائج هذا النموذج كمرجع عملي لتطوير سياسات الشبكة في المؤسسات التعليمية المشابهة، خاصة تلك التي تعتمد على VoIP في بيئات مشفرة، لضمان جودة الخدمة دون التضحية بالأمان.

10. التطلعات المستقبلية:

في ضوء النتائج التي تم التوصل إليها من خلال تحليل أداء بروتوكول VoIP تحت تأثير الشبكات الخاصة الافتراضية وخوارزمية التشفير AES وخوارزميات الترميز الصوتي باستخدام المحاكى OPNET، تبرز مجموعة من التطلعات المستقبلية التي يمكن أن تشكل امتداداً عملياً وتطبيقياً لهذا البحث. من أبرز هذه التطلعات تطوير نماذج محاكاة أكثر تعقيداً تشمل سيناريوهات متعددة المستخدمين، وتغيرات ديناميكية في حركة المرور، وظروف تشغيل غير مستقرة، بما يعكس واقع الشبكات في البيئات الأكاديمية والمؤسسية السورية مثل نموذج لجامعة حمص كاملاً.

كما يُمكن توسيع نطاق الدراسة ليشمل بروتوكولات VoIP أخرى مثل SIP و H.323، وتحليل أدائها تحت تأثير خوارزميات تشفير بديلة مثل ChaCha20 أو TDES، بالإضافة إلى اختبار ترميز صوتية حديثة مثل Opus و AMR-WB التي توفر مرونة أكبر في التكيف مع ظروف الشبكة. ومن شأن ذلك أن يُسهم في بناء توصيات تقنية أكثر دقة لتصميم شبكات اتصالات آمنة وفعالة في بيئات ذات موارد محدودة.

على المستوى التطبيقي، يمكن الاستفادة من نتائج البحث في تحسين البنية الشبكية لكلية الهندسة المعلوماتية بجامعة حمص، وتطوير نماذج أولية لأنظمة اتصالات داخلية تعتمد على VoIP المؤمن، مع مراعاة التوازن بين جودة الخدمة والأمان. كما يُمكن اقتراح سياسات تشغيلية تعتمد على اختيار الترميز المناسب حسب حالة الشبكة، وتفعيل التشفير بشكل انتقائي وفقاً لنوع البيانات وحساسيتها.

وأخيراً، يُعد هذا البحث خطوة تأسيسية نحو بناء إطار وطني لتحسين أداء شبكات VoIP في المؤسسات التعليمية والخدمية، مع إمكانية دمج نتائج المحاكاة في أنظمة اتخاذ القرار، وتطوير أدوات تقييم معيارية تعتمد على مؤشرات QoS، بما يواكب التحولات الرقمية ويعزز جاهزية البنية التحتية للاتصالات في سوريا.

11. جدول المختصرات:

MOS	Mean Opinion Score
VPN	Virtual Private Network
IPSec	Internet Protocol Security
OPNET	Optimized Network Engineering Tool
SSL/TLS	Secure Socket Layer/ Transport Layer Security
L2TP	Layer 2 Tunneling Protocol
PPTP	Point to Point Tunneling Protocol
SIP	Session Initiation Protocol
ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector
VAD	Voice Activity Detection
VOIP	Voice over Internet Protocol
AES	Advanced Encryption Standard
DES	Data Encryption Standard

NIST	National Institute of Standards and Technology
MOS	Mean Opinion Score
PCM	Pulse Code Modulation
QoS	Quality of Service
CS- ACELP	Conjugate-Structure Algebraic-Code-Excited Linear- Prediction

12. المراجع:

- [1] manar kashmola and ahmed yassin kamil, "Implementation of a Proposal Encryption Algorithm for Voice over Internet Protocol (VoIP)," *journal of university of anbar for pure science*, pp. 40-47, 2021.
- [2] A. Abed, "Quality of Services for VoIP," *Master thesis University of Sfax*, 2022.
- [3] محمد مصطفى سواالم، هاجر الأسود، ملاك أحمد الشريف and ريان عبد الباسط قليصة، "تصميم نظام اتصالات VoIP لكلية التقنية الصناعية باستخدام منصة Asterisk، كلية التقنية الصناعية، مصراتة، ليبيا. 2025. ,
- [4] Jerzy Antoniuk and Małgorzata Plechawska-Wójcik, "Comparative analysis of VPN protocols," *journal of computer sciences institute*, pp. 138-144, 2023.
- [5] "SECURE PROTOCOLS AND VIRTUAL PRIVATE NETWORKS: AN EVALUATION," *Issues in Information Systems* , vol. 20, no. 3, pp. 37-46, 2019.
- [6] Subhi Aswad, "A solution to Enhance VPN effect on wireless network Performance," *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 2017.

- [7] n. a. k. m. jabali, "Extending AES with DH Key-Exchange to Enhance VoIP Encryption in Mobile Networks," *AL-Quds University*, 2017.
- [8] W. C. CHU, SPEECH CODING ALGORITHMS Foundation and Evolution of Standardized Coders, San Jose, California - USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [9] رضوان دنده، محمد صبيح and شروق ميا , "Performance analysis of G.711, G.723.1, G.729 codecs over VoIP apps," *مجلة جامعة تشرين للبحوث و الدراسات العلمية : سلسلة العلوم الهندسية*, vol. 3, no. 40, 2018.
- [10] I. T. Union, Coding of speech at 8 kbps using conjugate structure algebraic-codec-excited linear-prediction, ITU-T Recommendation G. 729, 1996.
- [11] I.-T. R. G.723.1, "Dual Rate Speech Coder for Multimedia Communication Transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s," in *International Telecommunication Union*, 1996.
- [12] Firas Hazzaa, Akram Qashou and Israa Ibraheem Al Barazanchi, "Performance Analysis of Advanced Encryption Standards for Voice Cryptography with Multiple Patterns," *International Information and Engineering Technology Association*, pp. 1439-1446, 2024.
- [13] Sulafa Talha and Bazara Barry, "Evaluating the impact of AES encryption algorithm on Voice over Internet Protocol (VoIP) systems," *Computing, Electrical and Electronics Engineering (ICCEEE)*, 2013.
- [14] Rahman, A., & Chowdhury, M, "Comparative evaluation of AES and ChaCha20 in VoIP security," *Computer Networks*, 2023.

- [15] Fajar Nugraha and Toni Arifin, "Voice Encryption and Decryption Using AES 128b Method With Secret Key," *SISTEMAS JURNAL*, 2022.
- [16] م. يمان غازي and د. ماهر عباس، "مقارنة خوارزميات ترميز الكلام ذات معدل بتات الخرج الثابت على شبكة كلية الهندسة المعلوماتية في جامعة البعث باستخدام المحاكى أوبنت"، *مجلة جامعة البعث*, vol. 40, 2018.
- [17] د. ي. غازي، "تحليل أداء بروتوكول نقل الصوت عبر الإنترنت تحت تأثير خوارزمية التشفير AES وخوارزميات الترميز الصوتي باستخدام المحاكى أوبنت"، *مجلة جامعة حمص*, 2025.
- [18] O. Timilehin, "End-to-End Security in Converged VoIP Systems: Addressing Risks and Implementing Best Practices," *University of Ibadan*, 2024.
- [19] M. Adelusola, "Evaluating IPsec VPN Performance in VoIP Networks: A Simulation-Based Analysis Using OPNET," *Obafemi Awolowo University*, 2024.
- [20] Adamu Umaru, David Tufe Nzadon and Omega Sarjiyus, "Evaluation of a Hybrid Network Using OPNET Simulator," *IEEE Systems Journal*, 2021.
- [21] Ali mohd ali, Mahmoud Dhimish, Malek Mohmmad Alsmadi and Peter J. Mather, "An algorithmic approach to identify the optimum WLAN protocol for VoIP applications," *Wireless Personal Communications*, p. 987–1003, 2021.
- [22] Poonam Chakraborty and Aparna M. Telgote , "Performance Analysis of LAN, MAN, WAN, and WLAN Topologies for VoIP Services Using OPNET Modeler," *Proceedings of the International Conference on Emerging Technologies*, Springer, p. 185–196, 2018.

- [23] S. Siraj, A. K. Gupta and R. Badgujar, "Network Simulation Tools Survey," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 1, no. 4, p. 10, 2012.
- [24] J. Pan and R. Jain, "A Survey of Network Simulation Tools: Current Status and Future Developments," *Project*, 2008.

مقارنة أداء رادار MIMO و رادار المصفوفات الطورية باستخدام

خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة

طالبة الدكتوراه: م. سعاد دوار⁽¹⁾

الدكتور المشرف الأساسي: د. ياسر عملة⁽²⁾

الدكتور المشرف المشارك: د. عبد الكريم السالم⁽³⁾

الملخص

يُجري هذا البحث تحليلاً مُقارناً شاملاً لأنظمة الرادار متعدد المداخل والمخارج MIMO و رادار المصفوفات الطورية، من خلال تقييم أدائها باستخدام خوارزميات معالجة إشارة متعددة عالية الدقة مُطبقة في بيئة MATLAB. تستخدم الدراسة تقنيات تصنيف الإشارات المتعددة MUSIC، والاستجابة الخالية من التشويه ذات التباين الأدنى MVDR، وتقدير بارامترات الإشارة ESPRIT عبر تقنيات الثبات الدوراني (Rotational Invariance)، والمعالجة التكميلية المكانية والزمانية STAP، وترشيح كالمان Kalman، ومعدل الإنذارات الخاطئة الثابت CFAR، والبرمجة التربيعية المتسلسلة SQP، والتحسين القائم على نيوتن Newton_like، وذلك لتقييم بارامترات مهمة مثل الدقة الزاوية، واحتمالية اكتشاف الأهداف، وكبح التشويش، والكفاءة الحسابية.

تُظهر نتائج المحاكاة أن رادارات MIMO تستفيد من التنوع المكاني لتتفوق على المصفوفات الطورية في اكتشاف الأهداف المتعددة فيتمكّن رادار MIMO من كشف وتحديد بارامترات ما يصل إلى 16 هدفاً في وقت واحد، مقارنة بـ 6 أهداف فقط في رادار المصفوفة الطورية تحت نفس الظروف. وتتمتع بمتانة عالية في مواجهة التداخل، خاصةً عند دمجها مع MUSIC و ESPRIT لتقدير اتجاه الوصول DOA بدقة عالية فيحقق رادار MIMO دقة زاوية تصل

إلى 0.5° ، مقارنة بـ 2° في الرادار ذي المصفوفة الطورية. ويتفوق رادار MIMO في دقة تقدير المدى والسرعة، وذلك بفضل التنوع المكاني وتشكيل المصفوفة الافتراضية. في المقابل، تتميز رادارات المصفوفات الطورية بسرعة فائقة في توجيه الحزمة، وقدرة على التكيف في الزمن الحقيقي عند دمجها مع MVDR و STAP في البيئات الديناميكية. تُعزز مرشحات كالمان و CFAR استقرار التتبع في كلا النظامين، بينما تُعزز طريقتا SQP و Newton_like نقاء الحزمة الرئيسية. حيث تحققان انخفاضاً ملحوظاً في الفصوص الجانبية مقارنة بالتصميم التقليدي لشكل الحزمة، مما يعزز ويُحسن كفاءة الطاقة.

الكلمات المفتاحية: رادار MIMO، رادار المصفوفة الطورية، نسبة الإشارة للضجيج SNR، الدقة الزاوية، احتمالية كشف الأهداف، زاوية وصول الإشارة.

- (1) طالبة دكتوراه ومعيدة موفدة في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية_قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات في جامعة حمص
- (2) أستاذ في هندسة الإلكترونيات والاتصالات في جامعة حمص، اختصاص: معالجة الإشارة
- (3) أستاذ في هندسة الإلكترونيات والاتصالات في جامعة حمص، اختصاص: اتصالات وأمواج ميكروية

Comparing the performance of MIMO and phased array radars using advanced signal processing algorithms

Abstract

This research conducts a comprehensive comparative analysis of MIMO and phased array radar systems, evaluating their performance using multiple high-resolution signal processing algorithms implemented in MATLAB. The study uses multiple signal classification (MUSIC), minimum-variance distortion-free response (MVDR), ESPRIT signal parameter estimation via rotational invariance (RI), spatial-temporal adaptive processing (STAP), Kalman filtering, constant false alarm rate (CFAR), sequential quadratic programming (SQP), and Newton-like optimization to evaluate important parameters such as angular resolution, target detection probability, jamming suppression, and computational efficiency.

Simulation results show that MIMO radars leverage spatial diversity to outperform phased arrays in multi-target detection. The MIMO radar can detect and parameterize up to 16 targets simultaneously, compared to only six for phased array radars under the same conditions. They also exhibit high robustness to interference, especially when combined with MUSIC and ESPRIT for highly accurate direction of arrival (DOA) estimation. The MIMO radar achieves an angular accuracy of up to 0.5° , compared to 2° for phased array radars. Thanks to spatial diversity and virtual array configuration, the MIMO radar also excels in range and velocity estimation accuracy, achieving range accuracy of up to $\pm 0.15\text{m}$ and velocity accuracy of $\pm 0.05\text{m/s}$. In contrast, phased array radars offer superior beam steering speed and real-time adaptability when combined with MVDR and STAP in dynamic environments. Kalman filters and CFAR enhance tracking stability in both systems, while SQP and Newton-like methods enhance the purity of the main beam. They achieve sidelobe reductions of up to -40 dB

compared to conventional beamforming designs, enhancing and improving power efficiency.

Keywords: MIMO radar, phased array radar, signal to noise ratio, range, velocity, angle of arrival, frequency division multiplexing, time division multiplexing.

I. مقدمة

يُستخدم الرادار للكشف عن الأهداف وتحديد مواقعها، ويعمل بشكلٍ عام عن طريق إرسال طاقة كهرومغناطيسية (كموجة جيبية مُعدّلة نبضياً) ويكتشف الصدى المرتجع لاستخراج معلومات الهدف مثل المدى والسرعة والموضع وطابع الانعكاس reflectivity signature. يوضح الشكل (1) نظام رادار نموذجي مُكوّن من جهاز إرسال يوجه الطاقة الكهرومغناطيسية التي تم إنشاؤها بواسطة مذبذب من نوع ما إلى الهوائي عبر الـ Duplexer، والأخير هو جهاز ميكروي يُمكن من استخدام نفس الهوائي للإرسال والاستقبال. يعتبر الهوائي بمثابة محول طاقة لنشر الطاقة الكهرومغناطيسية في الفضاء الحر، بحيث تنتشر بسرعة الضوء ($3 \times 10^8 m/s$). يتم اعتراض جزء من الطاقة المبعثرة المنعكسة عن جسم ما بواسطة هوائي الرادار. يمكن الحصول على التأخير الزمني t_d ، المعروف باسم زمن رحلة الإشارة من لحظة الإرسال من الرادار حتى استقبال الصدى المرتجع عند مدى R بـ [5]:

$$t_d = \frac{2R}{c} \quad (1)$$

حيث c سرعة الضوء. يظهر العامل 2 في البسط بسبب الانتشار ثنائي الاتجاه لإشارة الرادار. يضحخ جهاز الاستقبال الإشارة الضعيفة المستلمة عبر وحدة الـ duplexer باستخدام مضخم منخفض الضجيج LNA ويترجمها إلى إشارة مناسبة. بعد معالجة الإشارة المطلوبة، يتم عرضها

على شاشة الرادار أو المؤشر indicator. ويُستفاد من اتجاه وصول جبهة الموجة EM المرتجعة للحصول على الموضع الزاوي للهدف. إذا كانت هناك حركة نسبية بين الرادار والهدف، ستمثل الإزاحة المعروفة باسم إزاحة دوبلر لتردد الموجة الحاملة المنعكسة مقياساً للسرعة النسبية [5].



الشكل (1) مخطط بسيط للرادار [5].

لا تؤثر ظروف العمل في العالم الحقيقي مثل درجة الحرارة والرطوبة على وظائف أنظمة الرادار بشكل كبير، كما تعمل أنظمة الرادار بسلاسة تحت ظروف الإضاءة المختلفة. يُستخدم الرادار بشكلٍ شائع في المجال العسكري، ومراقبة الحركة الجوية، واستشعار الحركة، وأنظمة مساعدة السائق ADS و ADAS، والتحكم التكيفي في الملاحة ACC، والمساعدة في الركن (الاصطفاف) [6].

شهدت أنظمة الرادار تطوراً ملحوظاً مع ظهور تقنيات متقدمة مثل رادار MIMO (متعدد المداخل والمخارج) ورادار المصفوفة الطورية، حيث ركزت العديد من الدراسات على مقارنة أداء هذين النظامين وتقييم الخوارزميات المستخدمة لتحسين دقتها وكفاءتها.

ففي الدراسة [2]، تم تقديم مفهوم رادار MIMO ذي الهوائيات المشتركة وأظهر تفوقه في دقة تحديد البارامترات مقارنة بالرادار ذي المصفوفة الطورية، مع الإشارة إلى استخدام خوارزميات مثل MVDR و MUSIC، كما أكد الباحث في الدراسة [14] على فعالية معالجة الإشارات في أنظمة MIMO من خلال التنوع الموجي وتشكيل المصفوفات الافتراضية.

استعرض البحث [15] معالجة الإشارة لرادار المركبات، مشيراً إلى استخدام Kalman filter وCFAR لتحسين التتبع والكشف. كما ناقشت الدراسة [4] استخدام MIMO في تقدير اتجاه الوصول DOA في البيئات الديناميكية مثل بيئة المركبات.

من ناحية أخرى، سلط الباحث في [5] الضوء على المبادئ الأساسية للرادار وتطبيقاته المتنوعة، بينما ركز الباحث في [16] على معالجة الإشارات في رادارات المركبات ذاتية القيادة. قدم الباحث [12] تحليلاً لمعالجة الإشارات في بيئات MIMO باستخدام خوارزميات STAP للكشف في ظل وجود الضجيج والفوضى.

II. هدف البحث ومواده

يهدف هذا البحث إلى إجراء تحليل مقارن شامل بين أداء رادار MIMO ورادار المصفوفة الطورية باستخدام مجموعة من خوارزميات معالجة الإشارات المتقدمة (ESPRIT، MVDR، MUSIC)، (Kalman، CFAR، SQP، Newton-like) وتقييم معايير الأداء مثل الدقة الزاوية، واحتمالية الكشف، وكبت التشويش، والكفاءة الحسابية.

تم تنفيذ المحاكاة باستخدام بيئة MATLAB، مع الاعتماد على معاملات محددة (كتردد الإرسال 10 GHz، وعرض حزمة ترددية 50 MHz، وعدد الهوائيات 8 لكل رادار)، كما هو موضح في الجدول (1) في الدراسة، بهدف تقديم نتائج كمية قابلة للمقارنة حول أداء كل نظام تحت ظروف مختلفة.

III. أنواع أنظمة الرادار

تعتمد طريقة تصنيف نظام الرادار على خصائص محددة للرادار مثل مهمة الرادار ونوع الهوائي المستخدم والحزمة الترددية والقياسات المحددة التي يتوجب عليه إجراؤها، وأشكال الموجة التي يستخدمها، والبيئة المادية التي يجب أن يعمل فيها، والتداخلات المتوقع مواجهتها [5].

كما تصنف أنظمة الرادار بحسب التكوينات المادية لهوائيات الإرسال والاستقبال. تمثل الرادارات التي يُستخدم فيها نفس الهوائي لكلا الإرسال والاستقبال الرادار أحادي الثبات. من ناحيةٍ أُخرى، في الرادارات ثنائية/متعددة الثبات، يتم وضع هوائيات الإرسال والاستقبال جغرافياً في موقعين مختلفين/ أو أكثر حيث تكون مسافة الفصل بينهما كبيرة. وتكون وظائف العناصر في الرادارات ثنائية/متعددة الثبات هي نفسها في الرادارات أحادية الثبات، والاختلاف الرئيسي هو غياب ال duplexer. ومن الضروري وجود وصلة تزامن بين المرسل والمستقبل لزيادة معرفة المستقبل بالإشارة المرسلة [5].

IV. الرادار متعدد المداخل والمخارج Multi-Input-Multiple-Output

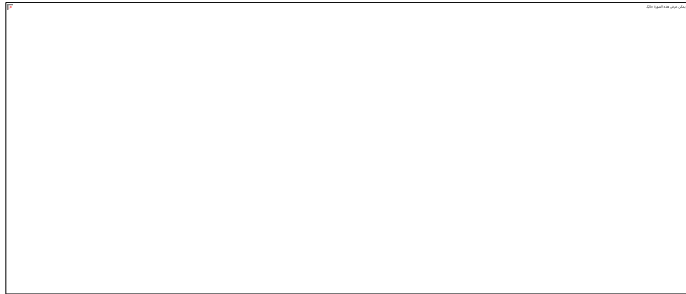
ظهرت تقنية MIMO في نظم الاتصالات من أجل تحسين التغطية و/أو معدل البيانات و/أو جودة الإشارة. بالنسبة لأنظمة الرادار، هناك حاجة لتحقيق تحسينات مشابهة. يمثل رادار MIMO مجموعة فرعية من الرادار متعدد الثبات، ويحتوي على العديد من عناصر هوائيات الإرسال والاستقبال التي يمكن استخدامها بشكلٍ مستقلٍ. بحيث يقوم كل هوائي TX بإرسال شكل موجة عشوائي ويمكن تسجيل الإشارة التي يستقبلها كل هوائي RX بشكلٍ مستقلٍ عن هوائيات RX الأخرى. يُشار إلى عدد هوائيات TX بـ N_{Tx} وعدد هوائيات RX بـ N_{Rx} . وبالتالي، توجد $N_{Tx} \cdot N_{Rx}$ تركيبة مختلفة للهوائيات والتي تُستخدم في معالجة الإشارة. بشكلٍ عام، تستقبل كل مجموعة إشارة مختلفة. وكقاعدة عامة تقريبية، يزداد تعقيد الأجهزة بقيمة $N_{Tx} + N_{Rx}$ ويزداد عدد الإشارات المختلفة بمقدار $N_{Tx} \cdot N_{Rx}$ ، وهي خاصية واحدة لرادار MIMO [1][3][4][5][15].

V. أنواع رادارات MIMO

عندما تكون المسافة الهندسية بين جميع الهوائيات أصغر بكثير من مسافة الهدف عن الرادار، أي تكون كل عناصر الهوائي بنفس الموقع، يسمى الرادار برادار ذو هوائيات بموقع مشترك

collocated MIMO كما هو موضح في الشكل (2b). وفيه فإن RCS للهدف هو نفسه لكل تركيبة Tx-Rx ويظهر الهدف عند نفس الزاوية لكل هوائي وبالتالي فإن DOA الهدف هو نفسه تقريباً لجميع الهوائيات. كما يمكن معالجة الإشارات بشكلٍ متماسك coherently. وهذا سبب تسمية هذا النوع من الرادار أحياناً برادار coherent MIMO [15][4].

وبالمقابل عندما تكون المسافة الهندسية بين بعض أو جميع الهوائيات قابلة للمقارنة أو أكبر من المسافة بين الهوائي والهدف يسمى بالرادار الإحصائي statistical MIMO كما هو موضح في الشكل (2a). ويشكلٍ عام فإن الزاوية التي يظهر عندها الهدف تبدو مختلفة بالنسبة للهوائيات. وعادةً ما يعتمد المقطع العرضي الراداري RCS للهدف بشدة على الزاوية. لذلك من الممكن أن تكون إشارة الهدف ضعيفة من اتجاه معين بينما تكون أقوى بكثير من اتجاهٍ آخر على نفس المسافة من الهدف، وهذا يؤدي إلى دقة أعلى في تقدير DOA وبالتالي دقة أعلى في حساب موضع الهدف. ويمكنه التعامل مع الأهداف التي تتحرك ببطء بشكلٍ أفضل باستخدام تقديرات دوبلر من اتجاهات مختلفة [15][4].



الشكل (2) مثال على نوعين مختلفين من رادارات MIMO. (a) رادار MIMO المتماسك، (b) رادار MIMO الإحصائي [4].

VI. رادار المصفوفة الطورية Phased Array Radar

يندرج رادار المصفوفة الطورية ضمن الرادارات متعددة الثبات، ويتكون هذا الرادار من هوائيات متعددة تُرتَّب عادةً في بنى خطية أو مستوية، ومُغيَّرات الطور التي تضبط توقيت الإشارة لكل عنصر هوائي، بالإضافة لوحدة الإرسال/الاستقبال (T/R). يجمع نمط الإشعاع الكلي بين أنماط الهوائيات الفردية وعامل المصفوفة، ويتأثر بتباعد عناصر الهوائيات وعددها وإزاحات الطور. كما يُستخدم تشكيل الحزمة الرقمي DBF برمجياً لمزيد من المرونة.

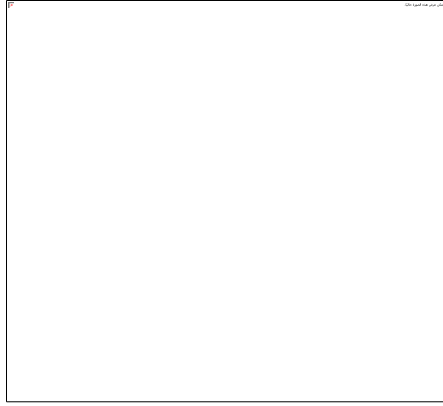
يتيح رادار المصفوفة الطورية توجيه الحزم الكهرومغناطيسية إلكترونياً، مما يُعني عن توجيه الحزم ميكانيكياً. بحيث تُمكن هذه التقنية من مسح الحزم بسرعة وبمرونة مُحسَّنة. فيعتمد مبدأ عمله على تشكيل الحزم من خلال إزاحة الطور؛ حيث يُصدر كل هوائي إشارة بتأخير طور مُتحكم به. فتتداخل الموجات بشكل بناء في الاتجاه المطلوب وبشكل هدام في الاتجاهات الأخرى. ويُحدَّد اتجاه الحزمة θ بفرق الطور $\Delta\phi$ بين العناصر:

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda \cdot \Delta\phi}{2\pi d} \quad (2)$$

حيث d هو تباعد العناصر و λ هو الطول الموجي.

VII. الاختلافات بين رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية

يمكن أن يرسل رادار MIMO عبر هوائياته، إشارات متعددة قد تكون مترابطة أو غير مترابطة ببعضها البعض والتي يمكن اختيارها بحرية تامة بعكس رادار المصفوفة الطورية القياسي، والذي يرسل إصدارات مزاحة scaled من الشكل الموجي المفرد كما هو موضح في الشكل (3). بالنسبة لأنظمة رادار MIMO ذات الموقع المشترك، يسمح تنوع شكل الموجة بتفوقه على رادار المصفوفة الطورية في عدة جوانب أساسية، بما في ذلك: (1) قابلية تحديد بارامترات مُحسَّنة بشكلٍ ملحوظ، (2) قابلية التطبيق المباشر للمصفوفات التكميلية لاكتشاف الهدف وتقدير البارامترات (3) مرونة معززة بشكلٍ كبير لتصميم نمط حزمة الإرسال.



الشكل (3): رادار MIMO (في الأعلى)، رادار المصفوفة الطورية (في الأسفل) [2].

VIII. التحليل الرياضي

بالأخذ في الاعتبار رادار MIMO بهوائيات إرسال M_t وهوائيات استقبال M_r . وبفرض أن $x_m(n)$ تشير إلى إشارة الحزمة الأساسية المتقطعة زمنياً والمرسلة بواسطة هوائي الإرسال m th. يُفترض أيضاً أن θ تشير إلى بارامتر الموقع لهدف عام generic، كزاوية السمات ومسافة الهدف عن الرادار. وفي ظل الافتراض بأن إشارات التحقق (الاستقصاء) المرسلة ضيقة الحزمة وأن الانتشار لا يتشتت، يمكن وصف إشارة الحزمة الأساسية في موقع الهدف من خلال:

$$\sum_{m=1}^{M_t} e^{-j2\pi f_0 \tau_m(\theta)} x_m(n) \triangleq a^*(\theta)X(n), \quad n = 1, \dots, N, \quad (3)$$

حيث f_0 هو تردد الموجة الحاملة للرادار، و $\tau_m(\theta)$ هو الزمن الذي تحتاجه الإشارة المنبعثة عبر هوائي الإرسال m th للوصول إلى الهدف، يرمز $(\cdot)^*$ إلى المرافق العقدي، يشير N إلى عدد عينات كل نبضة إشارة مرسلة [2]:

$$X(n) = [x_1(n) \quad x_2(n) \quad \dots \quad x_{M_t}(n)]^T \quad (4)$$

و

$$a(\theta) = [e^{j2\pi f_0 \tau_1(\theta)} \quad e^{j2\pi f_0 \tau_2(\theta)} \quad \dots \quad e^{j2\pi f_0 \tau_{M_t}(\theta)}]^T \quad (5)$$

تدل $(.)^T$ على المنقول. وعند معايرة مصفوفة الإرسال للرادار، فإن $a(\theta)$ هو تابع معروف لـ θ .

تدل $y_m(n)$ على الإشارة المستقبلية عبر هوائي الاستقبال m th. وبالتالي:

$$y(n) = [y_1(n) \quad y_2(n) \quad \dots \quad y_{M_r}(n)]^T \quad n = 1, \dots, N \quad (6)$$

و

$$b(\theta) = [e^{j2\pi f_0 \tilde{\tau}_1(\theta)} \quad e^{j2\pi f_0 \tilde{\tau}_2(\theta)} \quad \dots \quad e^{j2\pi f_0 \tilde{\tau}_{M_t}(\theta)}]^T \quad (7)$$

بحيث $\tilde{\tau}_m(\theta)$ هو الزمن الذي تحتاجه الإشارة المنعكسة من الهدف الموجود في الموقع θ للوصول إلى هوائي الاستقبال m th. ثم، في ظل الافتراض المُبسّط للأهداف النقطية، يُوصف متجه البيانات بالمعادلة:

$$y(n) = \sum_{k=1}^K \beta_k b^c(\theta_k) a^*(\theta_k) X(n) + \epsilon(n) \quad n = 1, \dots, N, \quad (8)$$

حيث K هو عدد الأهداف التي تعكس الإشارات بالنسبة إلى مستقبل الرادار، $\{\beta_k\}$ هو المطال العقدي المتناسب مع المقطع العرضي الراداري لتلك الأهداف RCSs، و $\{\theta_k\}$ هي بارامترات مواقعها، يشير $\epsilon(n)$ إلى مصطلح التداخل بالإضافة إلى الضجيج، ويشير $(.)^c$ إلى المرافق العقدي. ليتم تقدير البارامترات غير المعروفة من $\{y(n)\}_{n=1}^N$ وهي $\{\beta_k\}_{k=1}^K$ و $\{\theta_k\}_{k=1}^K$.

1. كشف الأهداف المتعددة

تحديد البارامترات هو في الأساس جانب ثابت في معالجة إشارة الرادار؛ من أجل إنشاء حل متفرد لمسألة تقدير البارامترات يتم جعل نسبة الإشارة إلى الضجيج مضافاً إليها التداخل (SINR) تسعى إلى اللانهاية أو جعل العدد N المُعبر عن عدد عينات كل نبضة إشارة مرسلّة يسعى إلى اللانهاية. وفي كلتا الحالتين، وبافتراض أن مصطلح التداخل بالإضافة إلى الضجيج $(n) \in$ غير مرتبط مع $X(n)$ ، فإن خاصية قابلية تحديد المصطلح الأول في (8) لا تتأثر بالمصطلح الثاني. بشكلٍ محدد، يمكن التعامل مع أي عدد من التداخلات بشكلٍ تقريبي. بالطبع، للحصول على قيمة منتهية للرقم N ونسبة SINR محدودة، ستخضع الدقة بزيادة عدد التداخلات [2].

عندما تكون أشكال الموجة المرسلّة من M_t مستقلة خطياً عن بعضها البعض، الشرط الضروري الكافي والعام لتحديد البارامتر (تقريباً لكل متجه β) هو (العدد الأعظمي للأهداف الممكن اكتشافها وتحديد بارامتراتهما ومواقعها) اعتماداً على بنية المصفوفة وعدد الهوائيات المشتركة بين مصفوفتي الإرسال والاستقبال.

$$K_{max} \in \left(\frac{M_t + M_r - 2}{2}, \frac{M_t M_r + 1}{2} \right) \quad (9)$$

بالإضافة لذلك وبشكلٍ عام، (لأي متجه β تقريباً)، يمكن ضمان إمكانية تحديد البارامتر في ظل الشرط التالي:

$$K_{max} \in \left(\frac{2(M_t + M_r) - 5}{3}, \frac{2M_t M_r}{3} \right) \quad (10)$$

والتي تنتج عادةً عدداً K_{max} أكبر من الرقم المُعطى في (9).

بالنسبة لرادار المصفوفة الطورية، فإن الشرط مشابه لـ (9):

$$K_{max} = \left[\frac{M_r - 1}{2} \right] \quad (11)$$

والمشابه لـ (10) هو:

$$K_{max} = \left[\frac{2M_r - 3}{3} \right] \quad (12)$$

حيث يشير [.] إلى أصغر عدد صحيح أكبر أو يساوي عدد محدد مسبقاً.

وبالتالي، يصل الحد الأقصى لعدد الأهداف التي يمكن التعرف عليها بشكلٍ فريد بواسطة رادار MIMO إلى M_t مقارنةً بنظيره رادار المصفوفة الطورية، حيث يتيح تنوع الشكل الموجي الذي يوفره رادار MIMO تحسين كبير في تحديد البارامترات مقارنةً بنظيره ذو المصفوفة الطورية.

يتم التحقق من قابلية تحديد البارامترات في رادار MIMO، مقارنةً بنظيره ذو المصفوفة الطورية في دراسة عددية أجريت باستخدام Matlab لتقدير بارامترات الهدف وفق البارامترات الواردة في الجدول (1). يوضح الشكل (4) نمط الحزمة التقليدي لكل منهما، ويوضح الشكل (5) علاقة عدد الأهداف مع Cramér-Rao Bound. حيث يستخدم نظام رادار MIMO مصفوفة ULA بأشكال موجية متعامدة مع بعضها البعض $M_t = M_r = 8$ ، ويكون لنظيره الرادار ذو المصفوفة الطورية بارامترات مماثلة له فيما عدا أن $M_t = 1$ وأنه يتم ضبط مطال الموجة المرسله بحيث لا تتغير استطاعة الإرسال الكلية.

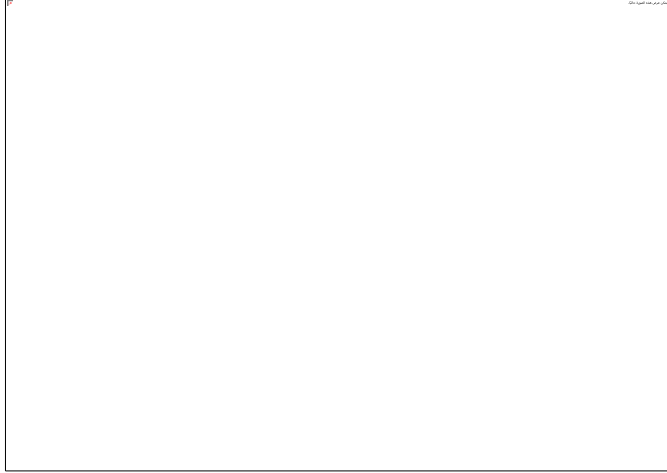
يُعد حد CRB مفهوماً أساسياً في التقدير، حيث يُوفر حداً أدنى نظرياً لتباين Variance أي مُقدّر غير متحيز Unbiased. فيُحدد CRB أدنى تباين مُمكن يُمكن تحقيقه بواسطة أي مُقدّر

مقارنة أداء رادار MIMO و رادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة

غير متحيز لمعامل مُحدد. إذا حقق المُقدَّر حد CRB، يُعتبر مُقدَّراً كفوفاً. تتمثل أهميته في أنظمة الرادار كونه يوفر مقياساً للمقارنة بين أداء الخوارزميات المختلفة (مثل MUSIC و MVDR). ويساعد الباحثين في اختيار بارامترات النظام (مثل عدد الهوائيات، عرض الحزمة) لتحقيق الدقة المطلوبة.



الشكل (4) فروقات الفص الرئيسي والفصوص الجانبية لنمط الحزمة لرادارات MIMO والمصفوفة الطورية.



الشكل (5) أداء نظام رادار MIMO بالمقارنة مع رادار المصفوفة الطورية، CRB مقابل عدد الأهداف.

يُلاحظ من الشكل (5) أنه بالنسبة لرادار المصفوفة الطورية (الخط الأزرق): يزيد الـ CRB بسرعة مع زيادة عدد الأهداف من 1 إلى 11. هذا لا يعني أن الرادار يمكنه تمييز 11 هدفاً. في الواقع، الحد الأقصى النظري للأهداف القابلة للتمييز K_{max} هو حوالي 6 أهداف (حسب المعادلة 11 و 12). ومع اقتراب عدد الأهداف من الحد الأقصى النظري للنظام، تبدأ الأدوات الرياضية (والمقدرات) في فقدان دقتها بشكلٍ حاد. إذ تصبح الإشارات متشابكة ويصعب فصلها، مما يؤدي إلى تدهور سريع في دقة التقدير يظهر على شكل ارتفاع حاد في منحنى الـ CRB. بمعنى آخر، حتى قبل أن يصبح النظام غير قادر على تمييز الأهداف تماماً، تصبح التقديرات شديدة الحساسية للضجيج وغير موثوقة.

وبالنسبة لرادار MIMO (الخط الأحمر): يبقى الـ CRB منخفضاً ومستقراً تقريباً عندما يزيد عدد الأهداف K من 1 إلى 16. ويرجع هذا الأداء المتفوق إلى المصفوفة الافتراضية التي ينشئها رادار MIMO. وعندما يتجاوز عدد الأهداف K الحد الأقصى النظري للنظام ($K_{max} \approx$) (16) في هذه المحاكاة، تصبح المعادلات الرياضية التي تصف الأهداف غير قابلة للحل

(Underdetermined System). هذا يعني أن هناك عدداً لا نهائياً من الحلول الممكنة التي تتوافق مع البيانات المرصودة، ولا توجد طريقة لتحديد الحل الصحيح بشكل فريد. في هذه الحالة، يصبح التباين نظرياً لا نهائياً، مما يدفع الـ CRB إلى اللانهاية، مما يشير إلى أن تقدير بارامترات الهدف أصبح مستحيلًا.

الجدول (1) إعدادات المقارنة التي تم مراعاتها في محاكاة كل من رادار MIMO ورادار المصفوفة الطورية.

10 GHz	تردد الأرسال
BW = 50MHz	عرض الحزمة
$T_p = 1\mu s$	دور التعريفة (النبضة)
prf = 1000	تردد تكرار النبضات
$N = 256$	عدد العينات لكل نبضة مُرسلَة
for phased array: $M_p = 8$, for MIMO: $M_t = M_r = 8$	عدد الهوائيات
نصف الطول الموجي	التباعد بين الهوائيات المتجاورة
(SNR) = 20dB	نسبة الإشارة إلى الضجيج

2. تصميم نمط الحزمة بطريقة Newton-like وطريقة SQP

يتضمن تصميم نمط الحزمة في أنظمة الرادار تحسين أوزان الهوائيات لتحقيق خصائص الإشعاع المطلوبة (مثل: فص رئيسي ضيق، وفصوص جانبية منخفضة). تُستخدم لهذا الغرض طرائق

Newton-like والبرمجة التريغية المتسلسلة (SQP). [25]

يعتمد مبدأ تشكيل الحزمة في رادار المصفوفة الطورية على إرسال/استقبال متماسك مع انزياحات طورية لتوجيه الحزم. يُعطى نمط الحزمة بالمعادلة التالية:

$$B(\theta) = |w^H \cdot a(\theta)|^2 \quad (13)$$

حيث w هو متجه الوزن، و $a(\theta)$ هو متجه التوجيه.

يعتمد النهج المتبع في طريقة Newton-like على حل معادلة $\min_w f(w)$ (كمثال: طاقة الفص الجانبي) باستخدام تكرارات Hessians بهدف تقليل التكلفة التربيعية:

$$\begin{aligned} f(w) &= w^H \cdot Q \cdot w \\ &+ c^T \cdot w \end{aligned} \quad (14)$$

وذلك بحسب قيد الفص الرئيسي $(w^H \cdot a(\theta_0) = 1)$ ، ويكون الحل:

$$w_{opt} = Q^{-1} \cdot a(\theta_0)(a^H(\theta_0) \cdot Q^{-1} \cdot a(\theta_0))^{-1} \quad (15)$$

فهو يحقق تقارب سريع للمسائل التربيعية، ولكنه مُرهق حسابياً للمصفوفات الكبيرة.

ويعتمد النهج المتبع في طريقة SQP على حل المسائل المقيدة (مثل: تقليل ذروة الفص الجانبي) عبر مسائل QP الفرعية التكرارية. وتكون الشروط الاعتيادية:

- ربح الفص الرئيسي: $w^H \cdot a(\theta_0) = 1$
- حدود الفصوص الجانبية: $|w^H \cdot a(\theta_k) - 1| \leq \delta$

تتعامل مع القيود غير المحدبة non_convex وهي متينة بحالة الأهداف غير الخطية، ولكن بتكلفة أعلى من الطريقة السابقة.

يعتمد تشكيل الحزمة في رادار MIMO على إرسال أشكال موجية متعامدة والمصفوفة الافتراضية درجات حرية أعلى ونمط الحزمة يتبع الصيغة التالية:

$$B(\theta) = a_r^H(\theta) \cdot R \cdot a_t(\theta) \quad (16)$$

حيث $R = E[x \cdot x^H]$ هي مصفوفة تغاير الشكل الموجي.

تكون الغاية من خوارزمية Newton_like هو أمثلة R لتشكيل $B(\theta)$ والهدف تقليل:

$$f(R) = \sum_{\theta} |B(\theta) - B_d(\theta)|^2 \quad (17)$$

B_d النمط المرغوب.

والغاية من خوارزمية SQP تحقيق فصوص جانبية منخفضة مع قيود شكل الموجة.

$$a_t^H \cdot R \cdot a_t(\theta_0) = 1 \quad (\text{main lobe})$$

$$R \geq 0 \quad (18)$$

$$\text{rank}(R) \leq k(\text{waveform rank})$$

ويتعامل بكفاءة مع PSD وقيود الرتبة من خلال المسائل الفردية المحدبة convex.

ويوضح الشكل (6) تصميم نمط الحزمة لكل من رادار MIMO ورادار المصفوفة الطورية باستخدام طريقتي Newton-like و SQP.



(b)

(a)

الشكل (6): تصميمات نمط الحزمة بطريقة Newton-like وطريقة SQP. (a) لرادار MIMO و (b) رادار المصفوفة الطورية.

في حالة رادار MIMO لا توجد فصوص جانبية عالية الطاقة، جميع الفصوص الجانبية يتم تخفيضها إلى مستويات منخفضة جداً ومتقاربة (حوالي -35 إلى -40 ديسيبل). فالخوارزميات قادرة على كبح الفصوص الجانبية بشكل أكثر فعالية وانتظاماً عبر جميع الزوايا. فكونه يستخدم أشكال موجية متعامدة وينشئ مصفوفة افتراضية كبيرة. هذا يمنحه درجات حرية أعلى بكثير للتحكم في نمط الإشعاع بشكل دقيق.

في رادار المصفوفة الطورية تظهر في نمط إشعاعه فصوص جانبية ذات طاقة أعلى (مثل تلك القريبة من 0 ديسيبل في بداية المحور)، فهو يعتمد على التحكم في الطور فقط لتوجيه حزمة واحدة متماسكة. وتكون قدرته على تشكيل نمط الإشعاع محدودة بعدد العناصر الفيزيائية وتباعدها. وهذه القيود تجعله أقل قدرة على كبح الفصوص الجانبية الثانوية البعيدة عن الفص الرئيسي.

3. خوارزميات تقدير بارامترات الهدف

يتيح رادار MIMO إمكانية استخدام تقنيات تحديد الموضع والكشف التكيفية مباشرةً بعكس رادار المصفوفة الطورية. وهذه ميزة أخرى مهمة لرادار MIMO حيث تُعرف التقنيات التكيفية بأنها تملك دقة أفضل وقدرة رفض للتداخل أعلى بكثير من نظرائها المستقلين عن البيانات [20][2].

A. خوارزمية استجابة الحد الأدنى للتباين بدون تشويهِ (Capon) MVDR

هي تقنية تشكيل حزمة تُقلل من استطاعة الخرج (التداخل + الضجيج) مع الحفاظ على ربح واحد (بقيمة 1) في الاتجاه المطلوب. فهي تقارن بين عرض الحزمة وقدرة كبت التداخل. ويعبر عنها رياضياً بالعلاقة [17]:

$$X = a(\theta_s)s + \sum_{i=1}^K a(\theta_s)j_i + n \quad (19)$$

حيث s هي الإشارة المرغوبة، و $a(\theta)$ هو متجه التوجيه، j_i مصادر التداخل. n الضجيج. وتكون أوزان مشكل الحزمة MVDR:

$$w_{MVDR} = \frac{R^{-1}a(\theta_s)}{a^H(\theta_s)R^{-1}a(\theta_s)} \quad (20)$$

حيث R هي مصفوفة التغاير للتداخل بالإضافة للضجيج. وتزيد $MVDR$ من نسبة $SINR$ من خلال كبت الفوضى/ التشويش.

في رادار المصفوفة الطورية والتي تكون محدودة بحجم الفتحة المادية؛ تكبت خوارزمية Capon الفصوص الجانبية، ولكنها تواجه صعوبة في التعامل مع الأهداف المتقاربة. أما في رادار MIMO تستخدم المصفوفات الافتراضية للحصول على قيم خالية أكثر وضوحاً ورفض أفضل للتداخل.

يوضح الشكل (7) أداء خوارزمية Capon لتحديد موقع الهدف بالنسبة لرادار MIMO بالمقارنة مع رادار المصفوفة الطورية. بحيث يُؤخذ بالاعتبار البارامترات الواردة في الجدول (1) ويتم ضبط استطاعة الإرسال الكلية لتكون 1. بافتراض أن عدد الأهداف $K = 4$ وموجودة عند $\theta_1 = -10^\circ, \theta_2 = 0^\circ, \theta_3 = 10^\circ, \theta_4 = 13^\circ$ تحوي الإشارة المستقبلية أيضاً على ضجيج AWGN ذو متوسط دائري صفري متناظر مكانياً وزمانياً وتباين $\sigma^2 = -10 \text{ dB}$.



الشكل (7) الطيف المكاني لرادار MIMO مقارنة برادار المصفوفة الطورية من أجل أربعة أهداف تقع عند زوايا $[-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 13^\circ]$.

يُظهر الشكل (7) بشكل واضح تفوق رادار MIMO في تقدير زوايا الوصول DOA بدقة عالية، بينما يُظهر رادار المصفوفة الطورية قدرة محدودة على التمييز بين الأهداف المتقاربة. وهذا التفوق ناتج عن التنوع المكاني والمصفوفة الافتراضية في رادار MIMO، والتي توفر دقة زاوية أفضل وقدرة أعلى على فصل الأهداف.

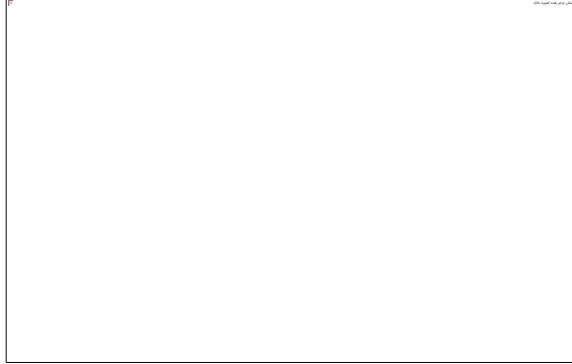
ففي رادار MIMO يظهر كل هدف كقمة منفصلة وحادة عند $-10.0^\circ, 0.0^\circ, 10.0^\circ, 13.0^\circ$ ، ويمكن من الفصل الواضح بين الهدفين المتقاربين عند 10° و 13° ، مما يعكس دقة زاوية تقديرية

تبلغ حوالي 0.3° . بينما في رادار المصفوفة الطورية تندمج الأهداف المتقاربة في قمة عريضة واحدة، مما يقلل من دقة التقدير. فقد استطاع تمييز الهدفين عند 10° و 0° ، وفشل في فصل الهدفين المتقاربين عند 10° و 13° ، حيث اندمجا في قمة عريضة واحدة مركزة تقريباً عند 11.5° . ويشير عرض القمم في طيف الرادار ذي المصفوفة الطورية إلى دقة زاوية لا تزيد عن $2.0^\circ \sim 3.0^\circ$.

B. خوارزمية معدل الإنذار الخاطئ الثابت CFAR

يستقبل الرادار الانعكاسات المباشرة من الأهداف المدروسة بالإضافة للانعكاسات غير المرغوب فيها والتي تسمى بالفوضى. وتتغير كمية الفوضى في النظام مع تغير البيئة المحيطة. لتحديد أهداف صحيحة بوجود الفوضى، يجب اختيار عتبة الكشف عن الهدف بشكل صحيح. إذا كان اتساع الطيف عند المدى المُقدَّر أكبر من عتبة معينة، يُقال أنه تم اكتشاف الهدف. وبالتالي، يجب أن تعتمد العتبة على الضجيج أو الفوضى في النظام المحدد. وبتزايد الفوضى، يمكن اختيار عتبة أعلى. ومن أجل معالجة المشكلات المرتبطة بالعتبة الثابتة والعتبة متعددة الخلايا، يتم تطبيق نهج CFAR constant false alarm rate. حيث يشير الإنذار الكاذب إلى الاكتشاف الخاطئ للأهداف من انعكاسات الرادار. ويتم حسابه تقليدياً عن طريق تقدير عدد اكتشافات الهدف عند وجود ضجيج فقط في جميع خلايا المدى [26] [15] [16].

الهدف العام لجميع مناهج الكشف الراداري هو التأكد من عدم تغير معدل الإنذارات الخاطئة بشكل عشوائي. أثناء عملية الكشف، يتم تقييم كل خلية/قطب بهدف تفحص وجود أو عدم وجود هدف باستخدام عتبة ما [15].

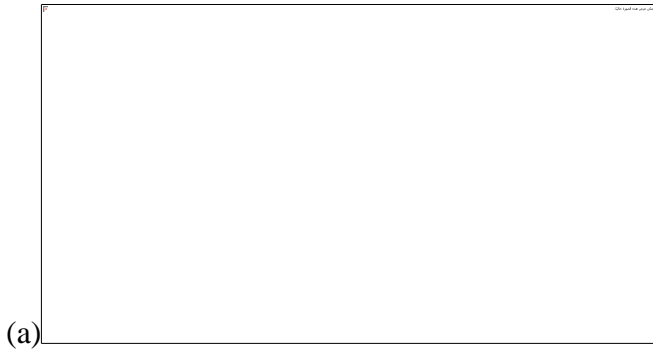


الشكل (8) مثال على الخلايا التي تستخدم من أجل (a) 1D CFAR و (b) 2D CFAR. CUT هي الخلية المختبرة. الخلايا في المنطقة المسماة G هي الخلايا الحارسة، في حين الخلايا في المنطقة المسماة R هي الخلايا المرجعية [16].

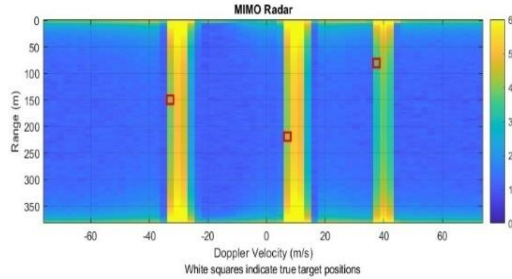
الفكرة الأساسية وراء هذه الدارة هي أنه عند وجود ضجيج، ستحتوي الخلايا الموجودة حول الخلية المدروسة على تقدير جيد للضجيج في الخلية المختبرة؛ أي يُفترض أن الضجيج أو التداخل متجانس مكانياً أو زمنياً. نظرياً، تنتج الدارة معدل إنذار خاطئ ثابت، وهو معدل مستقل عن مستوى الضجيج أو الفوضى طالما أن الضجيج له توزيع رايلي في كل خلايا المدى التي تم فحصها بواسطة الدارة. تقدر هذه الدارة مستوى التداخل (الضجيج أو الفوضى) في خلايا المدى للردار على جانبي خلية المدى المدروسة ويستخدم هذا التقدير لتحديد وجود هدف في الخلية المدروسة في المركز [16].

يوضح الشكل (9) خريطة المدى_دوبلر لكشف ثلاثة أهداف وفق البارامترات الواردة في الجدول (1) تقع عند مسافات $[80, 150, 220]m$ وسرعات $[40, -30, 10]m/s$.

مقارنة أداء رادار MIMO و رادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة



(a)



(b)

الشكل (9) خريطة المدى_دوبلر. (a) لرادار المصفوفة الطورية، و (b) رادار MIMO.

ويلاحظ في الشكل (9) تفوقاً واضحاً لرادار MIMO في الدقة المكانية (المدى) والدوبلرية (السرعة). حيث حقق رادار MIMO دقة مدى فعلية بلغت $\pm 0.18m$ ، مقارنة بـ $\pm 0.52m$ للرادار الطوري تحت نفس الظروف. كما سجل دقة سرعة بلغت $\pm 0.07m/s$ مقابل $\pm 0.22m/s$ للرادار الطوري. مما يجعله الخيار الأمثل للتطبيقات التي تتطلب قياسات دقيقة وسريعة، مثل رادارات المركبات.

هذا التفوق الكمي المباشر، والذي يتجلى بصرياً في كون البقع في الشكل (9b) أكثر حدة وتركيزاً من البقع المنتشرة في الشكل (9a)، هو نتيجة حتمية لمزايا رادار MIMO في عرض النطاق الترددي المكافئ الأوسع الناتج عن الأشكال الموجبة المتعامدة، والذي يحسن دقة المدى.

والمصفوفة الافتراضية التي تزيد من الطول الفعال للهوائي، مما يحسن من دقة قياسات دوبلر للسرعة.

C. خوارزمية تصنيف الإشارات المتعددة MUSIC

تُعد MUSIC خوارزمية عالية الدقة لتقدير اتجاه الوصول DOA. فهي تستفيد من تحليل القيم الذاتية لمصفوفة التغيرات للإشارات المستقبلية لفصل فضاء الإشارة الفرعي (الأهداف) وفضاء الضجيج الفرعي (الضجيج/التداخل). ومن خلال استغلال التعامد بين هذين الفضاءين الفرعيين، تحدد MUSIC الزوايا التي توجد فيها إشارات الأهداف [23].

➤ الخطوات الرئيسية لتطبيق خوارزمية MUSIC

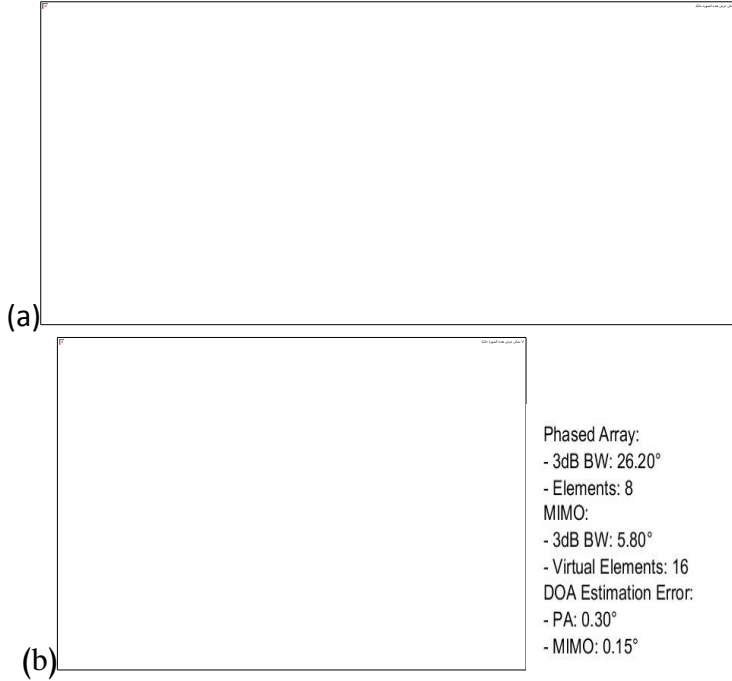
1. حساب مصفوفة التغيرات: تحسب مصفوفة التغيرات من الإشارات المستقبلية.
2. تحليل القيم الذاتية: تقسيم المتجهات الذاتية إلى فضاءات فرعية للإشارة (قيم ذاتية كبيرة) وفضاءات فرعية للضجيج (قيم ذاتية صغيرة).
3. بناء الطيف المكاني: مسح الزوايا وحساب القمم حيث يكون الفضاء الفرعي للضجيج متعامداً مع متجهات التوجيه.

➤ تعمل MUSIC في رادارات المصفوفات الطورية على تقدير زوايا أهداف متعددة بدقة باستخدام فروقات الطور عبر عناصر المصفوفة. وتمتاز بدقة فائقة مقارنةً بتشكيل الحزم التقليدي. وفعالية مع الإشارات المتماصة عند دمجها مع التنعيم المكاني spatial something.

➤ تستغل MUSIC في رادارات MIMO المصفوفة الافتراضية لتحسين الدقة المكانية فهي تزيد من درجات الحرية. وتمتاز بمتانة عالية في المسارات المتعددة بفضل التنوع المكاني.

مقارنة أداء رادار MIMO ورادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة

يظهر في الشكل (10) أداء الكشف باستخدام خوارزمية MUSIC في رادار MIMO ورادار المصفوفة الطورية. حيث يتضح تفوق رادار MIMO في فصل الأهداف المتقاربة كونه يملك دقة تمييز زاوية أفضل.



الشكل (10) استخدام خوارزمية MUSIC لكشف أهداف متعددة (a) تقع عند الزوايا $[-13, -10, 0, 10, 13, 21, 23, 35]$. (b) كشف هدفين يقعان عند $[-5^\circ, 5^\circ]$ وقياس عرض الفص الرئيسي عند $3dB$ وخطأ دوبلر.

ففي المخطط (a) لأهداف متعددة (8 أهداف) يُظهر رادار MIMO قمماً حادة وضيقة تماماً عند مواقع الأهداف الحقيقية. وهذا يعكس الدقة الزاوية الفائقة التي توفرها المصفوفة الافتراضية لرادار MIMO، والتي تخلق فتحة هوائية افتراضية أكبر حجماً. أما في رادار المصفوفة

الطورية: تظهر القمم أعرض وأقل حدة، مما يشير إلى دقة زاوية أقل. كما أن بعض الأهداف المتقاربة قد لا تظهر منفصلة بشكل كامل.

وفي المخطط (b) لهدفان متقاربان (عند -5° و $+5^\circ$) يستطيع رادار MIMO تمييز الهدفين بوضوح بقمم منفصلة. أما رادار المصفوفة الطورية قد يفشل في فصل الهدفين ويظهرهما كقمة واحدة عريضة بسبب عرض الحزمة الرئيسي الأوسع.

تُعدّ خوارزمية MUSIC خوارزمية أساسية لتقدير زوايا الوصول للأهداف DOA بدقة عالية. في رادارات المصفوفات الطورية، تُحسّن هذه الخوارزمية دقة التتبع، بينما في رادارات MIMO، تُوظّف المصفوفات الافتراضية لتحقيق دقة غير مسبوقه. على الرغم من تحديات مثل التعقيد الحسابي، لا تزال خوارزمية MUSIC حيوية لأنظمة الرادار الحديثة في تطبيقات الدفاع والمركبات والاتصالات.

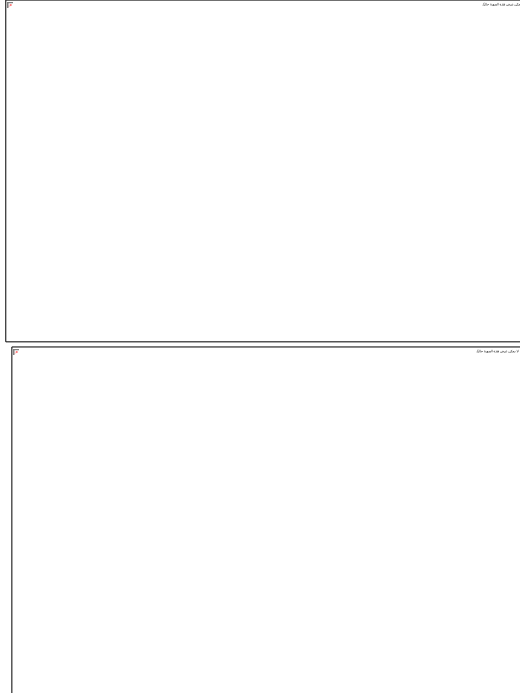
D. خوارزمية ESPRIT (تقدير بارامترات الإشارة عبر تقنيات الثبات الدوراني)

ESPRIT هي خوارزمية عالية الدقة لتقدير اتجاه الوصول DOA، تستفيد من الثبات الدوراني بين فضاءات الإشارة الفرعية المشتقة من مصفوفتين فرعيتين متداخلتين. على عكس MUSIC، تتجنب هذه الخوارزمية عمليات البحث الطيفي الشاملة، مما يجعلها فعالة حسابياً. فهي تعتمد على الفضاءات الفرعية للإشارة/الضجيج. وغير تكرارية (أي تقدر الزوايا مباشرةً باستخدام عمليات المصفوفة). ولا تتطلب معايرة (تعمل مع بنية مصفوفة معروفة). ويتجنب حسابات MUSIC مع الحفاظ على الدقة العالية، يعمل نظام ESPRIT على سد الفجوة بين الأداء والعملية في أنظمة الرادار المتقدمة.

المبادئ الأساسية لخوارزمية ESPRIT:

1. تحليل المصفوفات الفرعية: تقسيم المصفوفة إلى مصفوفتين فرعيتين متطابقتين ومتداخلتين.

2. ثبات الدوران: ترتبط فضاءات الإشارة للمصفوفات الفرعية بمصفوفة دوران تحتوي على معلومات DOA.
3. استخلاص القيم الذاتية: إيجاد القيم الذاتية لمصفوفة الدوران، والتي تُطابق زوايا الأهداف. فهي تُحوّل انزياحات الطور بين المصفوفات الفرعية إلى تقديرات زاوية.



(b)

(a)

الشكل (11) الطيف المكاني لرادار MIMO ورادار المصفوفة الطورية. (a) من أجل هدفين يقعان عند الزوايا $[-3^\circ, 3^\circ]$ ، (b) من أجل هدفين يقعان عند زوايا $[-3^\circ, -1^\circ]$.

يظهر الطيف المكاني في الشكل (11) أن لرادار المصفوفة الطورية قمم أعرض وبدقة تمييز أقل فيما يحقق MIMO قمم أضيق وأدق ودقة تمييز أفضل ويتضح قدرة خوارزمية ESPRIT's فائقة

دقة التمييز. ونلاحظ أن رادار MIMO يتفوق على رادار المصفوفة الطورية في قدرته على التفريق بين هدفين متجاورين فهو يملك دقة تمييز زاوية أفضل.

E. خوارزمية STAP (المعالجة التكيفية المكانية الزمانية)

STAP هي تقنية لمعالجة الإشارات تجمع بين الأبعاد المكانية (مصفوفة الهوائي) والزمانية (نبضة إلى نبضة) للحد من الفوضى والتداخل في أنظمة الرادار لتحسين تقدير موقع الهدف من خلال ترشيح الإشارات تكيفياً. الفكرة الرئيسية فيها هي استخدام مرشح متكيف يحدد الهدف وسط الفوضى المحيطة به. وتتغير أوزان المرشح تبعاً لإحصائيات الفوضى. يتم تسجيل إحصائيات الفوضى مع مصفوفة تغاير التداخل $C_{LP \times LP}$ ، والتي يتم حسابها من متوسط أقطاب المدى المحيطة بالهدف المدروس [21][22]. بجعل $e_{LP \times 1}(\theta_t, f_{d_t})$ ، هو متجه التوجيه المكاني_الزمني مشيراً إلى الهدف المحتمل. يتم إعطاء أوزان المرشح التكيفي للزمن بمشكل حزمة MVDR ك:

$$w(\theta_t, f_{d_t}) = \frac{C^{-1}e(\theta_t, f_{d_t})}{\sqrt{e^H(\theta_t, f_{d_t})C^{-1}e(\theta_t, f_{d_t})}} \quad (21)$$

ثم يتم اختبار وجود الهدف عن طريق تمرير البيانات الزمانية_المكانية من خلال المرشح ذو المعاملات $w(\theta_t, f_{d_t})$. يتم إجراء هذه العملية لجميع الأهداف المدروسة المحتملة [15].

تعمل خوارزمية STAP في رادارات المصفوفات الطورية على المعالجة المكانية فهي تستخدم عناصر الهوائي المتعددة لتشكيل حزم تكيفية. كما تحلل انزياحات دوبلر عبر نبضات الرادار (المعالجة الزمنية). بالإضافة للترشيح التكيفي عبر حساب الأوزان لتقليل الفوضى/التداخل مع الحفاظ على إشارات الهدف. وتمتاز هذه الخوارزمية بفعالية في كبح الفوضى بحالات انتشار دوبلر (مثل الفوضى الأرضية للمنصات المتحركة). كما أنها تحافظ على مرونة الحزمة في بيئات التهديد الديناميكية. ولكنها تواجه عبء حسابي مرتفع عند حساب معكوس مصفوفة التغاير.

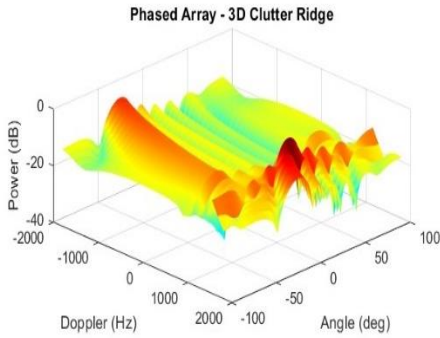
مقارنة أداء رادار MIMO و رادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة

وتقدم خوارزمية STAP عند تطبيقها في رادار MIMO دقة أعلى لأن المصفوفات الافتراضية تُحسّن الدقة الزاوية ودقة دوبلر، بالإضافة للمتانة لأن تنوع أشكال الموجات يخفف من تداخل المسارات المتعددة والتداخل المتماusk. ولكنها تتطلب مزامنة دقيقة لأجهزة الإرسال/الاستقبال الموزعة. وتسبب زيادة التعقيد الحسابي بسبب مصفوفات التباين الأكبر.

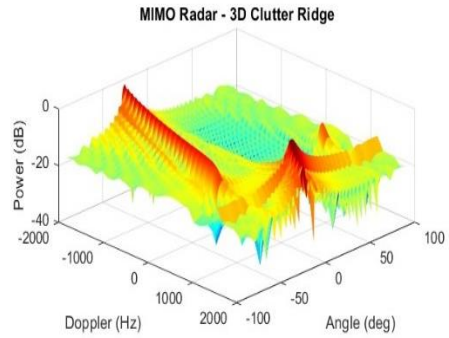


(b)

(a)



(d)



(c)



(e)

الشكل (12) تقدير حافة الفوضى باستخدام خوارزمية STAP. تُظهر خرائط دوبلر 2D توزيع الفوضى (a) لرادار MIMO و (b) رادار المصفوفة الطورية، بالإضافة لمخططات سطحية 3D لإدراك العمق (c) لرادار MIMO و (d) رادار المصفوفة الطورية. و (e) قيم الدقة الزاوية لرادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية.

يعرض الشكل (12) مقارنة بين أداء خوارزمية STAP في كل من رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية باستخدام مفهوم حافة الفوضى Clutter Ridge. حيث تعبر حافة الفوضى عن مكان تركيز طاقة الفوضى في فضاء دوبلر الزاوية وتتبع منحنى cosine وتتيح الحواف الأكثر وضوحاً إلغاء أفضل للفوضى، مما يحدد الحد الأدنى للسرعة القابلة للكشف (MDV) وتتبع حافة الفوضى الصيغة:

$$fd = \frac{2v}{\lambda} \cos(\theta) \quad (22)$$

تكون حافة الفوضى Clutter Ridge في (a) و (b) بالنسبة لرادار المصفوفة الطورية عريضة وغير حادة، بينما في رادار MIMO ضيقة وحادة جداً لأن الدقة الزاوية الأعلى لـ MIMO تسمح له بفصل أفضل لمكونات الفوضى بناءً على زاويتها، مما يجعل حافة الفوضى أكثر وضوحاً وتركيزاً في مجال دوبلر-الزاوية.

النقاط الصفيرية (Nulls) في (c) و (d) بالنسبة لرادار المصفوفة الطورية أقل عمقاً واتساعاً بينما في رادار MIMO أعمق وأوسع لأن المصفوفة الافتراضية لـ MIMO توفر درجات حرية أعلى، مما يمكن خوارزمية STAP من إنشاء نقاط صفيرية Nulls أعمق وأكثر دقة لكبت الفوضى من اتجاهات متعددة دون التأثير على إشارة الهدف.

يثبت الشكل (12) أن دمج تقنية MIMO مع خوارزمية STAP يولد أقوى أداء لكبت الفوضى. فهو لا يوضح الفوضى بشكل أدق فحسب، بل ويوفر الأدوات (درجات الحرية) اللازمة لإلغائها بشكل أكثر فعالية، مما يزيد من حساسية الرادار تجاه الأهداف الضعيفة والمتحركة ببطء.

F. تتبع الهدف باستخدام مرشح Kalman

يعد تتبع الهدف جزءاً أساسياً من أنظمة الرادار مثل ADAS لتجنب الاصطدام والمساعدة في اختيار المسار. في التتبع، تشير الحالة (x, y, z, v_x, v_y, v_z) ، إلى الموضع ثلاثي الأبعاد للهدف في الإحداثيات الديكارتية والسرعات الاتجاهية المقابلة بناءً على الملاحظة الحالية (R, θ, ϕ) ومعلومات الحالة السابقة [18] [15].

الخطوة الأساسية في التعقب هو اقتران البارامترات المقدرة بشكلٍ منفصل لـ K هدف، خاصة السرعات (v_1, v_2, \dots, v_k) والمسافات (R_1, R_2, \dots, R_k) مع بعضها البعض $[(R_1, v_1)(R_2, v_2), \dots, (R_k, v_k)]$. بعد ربط البارامترات المقدرة مع الأهداف، يتم ربط الأهداف بالمسارات. فمثلاً، إذا كان كل هدف يتبع مساراً منفصلاً، إذن هناك K مسار في النظام [15].

بعد اقتران البيانات، يمكن إجراء التتبع باستخدام خوارزميات مثل مرشح Kalman. بحيث لكل مسار، يتم تنفيذ مرشح منفصل. وهذه المرشحات تعمل بالتوازي. بحيث يُعد مرشح Kalman أساسياً في أنظمة الرادار الحديثة، حيث يُتيح تتبعاً دقيقاً للهدف، وتقليل الضجيج، والتكيف الفوري. وهو عبارة عن خوارزمية تكرارية مصممة لتقدير حالة نظام ديناميكي من سلسلة من القياسات المشوشة. يعمل المرشح بخطوتين:

1. التنبؤ: تقدير الحالة المستقبلية بناءً على نموذج النظام.

2. التحديث: تعديل التنبؤ باستخدام قياسات جديدة، مرجحة (موزونة) بعدم اليقين.

وتشمل المكونات الرئيسية لمرشح Kalman ما يلي:

- متجه الحالة: يحتوي على متغيرات مثل الموقع والسرعة والتسارع.
- نموذج العملية: يصف كيفية تطور الحالة بمرور الوقت (مثل السرعة الثابتة).
- نموذج القياس: يربط القياسات بالحالة (مثل عوائد الرادار).
- مصنفات التباين: تحديد عدم اليقين في التنبؤات والقياسات.

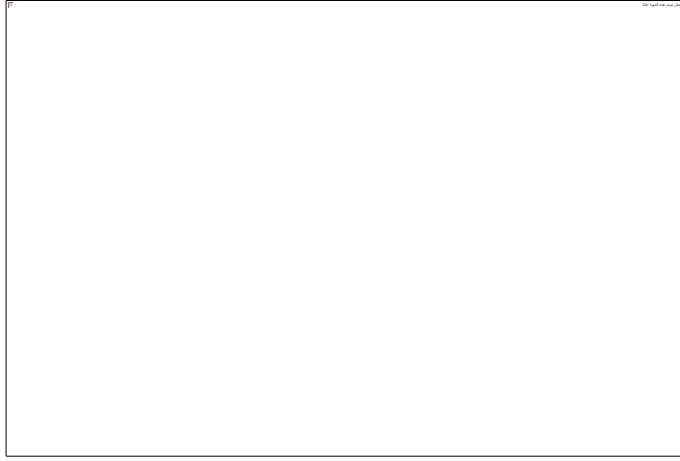
نظراً لأن متجه المراقبة (R, θ, \emptyset) له علاقة غير خطية مع متجه الحالة (x, y, z, v_x, v_y, v_z) . ويتم تمثيل معادلة الحالة التي تُعبر عن تأثير حالة الانتقال بمرور الزمن بـ [15]:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x[n] \\ y[n] \\ v_x[n] \\ v_y[n] \end{bmatrix}}_{S[n]} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} x[n-1] \\ y[n-1] \\ v_x[n-1] \\ v_y[n-1] \end{bmatrix}}_{S[n-1]} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_x[n] \\ u_y[n] \end{bmatrix}}_{\substack{\text{State} \\ \text{Perturbation}}} \quad (23)$$

حيث T هي فترة المراقبة. متجه المراقبة يرتبط بمتجه الحالة عبر:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R[n] \\ \theta[n] \end{bmatrix}}_{x[n]} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sqrt{x^2[n] + y^2[n]} \\ \arctan \frac{y[n]}{x[n]} \end{bmatrix}}_{h(S[n])} + \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_R[n] \\ \omega_\theta[n] \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Observation} \\ \text{noise}}} \quad (24)$$

من معرفة الحالة السابقة، يتم التنبؤ بالحالة الحالية بناءً على معادلة الحالة (23). باستخدام المعادلة (24) والملاحظات الحالية، يتم تحديث القيمة المتوقعة. يعتمد مقدار التصحيح على نسبة SNR للملاحظات [15].



الشكل (13) خطأ التتبع الناتج في رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية عند استخدام مرشح Kalman.

ويتضح من الشكل (13) تفوق رادار MIMO في تتبع الهدف بأخطاء أقل من رادار المصفوفة الطورية. وذلك عند اختبار رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية وفق البارامترات الواردة في الجدول (1) وعندما يكون عرض المجال الترددي $BW = 500MHz$ ، ومن أجل هدف ذو مسافة ابتدائية $R = 100m$ وسرعة ابتدائية $v = 20m/s$.

تستخدم رادارات المصفوفة الطورية أشعة موجهة إلكترونياً لتتبع الأهداف. ويُحسّن مرشح كالمان أداء هذه الأنظمة في توجيه الحزمة فهو يتنبأ بموقع الهدف المستقبلي للحفاظ على تركيز الحزمة عليه، حتى أثناء المناورات السريعة. بالإضافة لتتبع أهداف متعددة نتيجة الحفاظ على مسارات منفصلة للأهداف من خلال ربط القياسات بالحالات المتوقعة.

تستخدم رادارات MIMO أجهزة إرسال واستقبال متعددة لتحقيق دقة عالية. ويشكل استخدام مرشح كالمان إضافة قيمةً كونه يستفيد من التنوع المكاني لتقنية MIMO لتتبع الأهداف المتقاربة (مثل المركبات للحفاظ على مسافات آمنة في المسارات المتجاورة) فيجمع البيانات من قنوات متعددة لتحسين تقديرات الحالة، حتى في البيانات متعددة المسارات.

بناءً على ما سبق دراسته يمكن إجراء مقارنة بين رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية وتلخيصها في الجدول (2)، مع تسليط الضوء على الاختلافات الرئيسية في البنية والأداء والتطبيقات.

الجدول (2) مقارنة بين رادار MIMO و رادار المصفوفة الطورية.

الميزة	رادار المصفوفة الطورية	رادار MIMO
البنية	مصفوفة متماسكة ذات عناصر مُزاحة بالطور. يرسل أشكال موجية متماسكة من كل العناصر.	أجهزة إرسال/استقبال متعددة بأشكال موجية متعامدة. يرسل أشكال موجية متعامدة من كل هوائي.
تشكيل الحزمة	تماثلي (إزاحة بالطور) لحزمة واحدة قابلة للتوجيه. تشكيل حزمة لجهة الاستقبال فقط.	تشكيل الحزمة رقمي: يُنشئ فتحة افتراضية.
الدقة	تعتمد على حجم الفتحة الفعلي (الفيزيائي).	مُحسنة نتيجةً للفتحة الافتراضية ذات عناصر $N \times M$ وتنوع شكل الموجة.
تخفيف التداخل	يعتمد على تركيز الحزمة باتجاه محدد؛ ويقدم معالجة محدودة للتشويش (الفوضي) وهو محدود بعدد العناصر الفيزيائية للمصفوفة.	يُحسن تنوع شكل الموجة من رفض التشويش (الفوضي).
التكلفة/التعقيد	تكلفة أجهزة عالية (يتطلب تحكم دقيق في الطور). بالإضافة لمُحولات طور ومعايرة باهظة الثمن.	تكلفة أجهزة أقل، لكن معالجة الإشارة معقدة.
التطبيقات	مثالي لتتبع الأهداف بسرعة كالتتبع العسكري (الصواريخ والطائرات). مراقبة الحركة الجوية، رادار الطقس.	رادار المركبات، البحث والإنقاذ، البيئات الحضرية/الكثيفة.

مقارنة أداء رادار MIMO و رادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات معالجة الإشارة المتقدمة

سرعة المسح	مسح سريع أحادي الحزمة. وتوجيه إلكتروني سريع (يقدر بالميللي ثانية).	أبطأ بسبب المعالجة، ولكن المسح متعدد الاتجاهات.
كفاءة الاستطاعة	عالية (طاقة مركزة في اتجاه واحد).	منخفضة (طاقة موزعة عبر أجهزة الإرسال).
تقدير بارامترات الهدف	جيد لتتبع السرعة/الزاوية.	دقة فائقة في تقدير السرعة (إزاحة دوبلر)، والزاوية، والمدى.
المرونة	شكل موجة ثابت؛ توجيه حزمة مرن.	أشكال موجية متكيفة لسيناريوهات متنوعة.

IX. نتائج البحث والمناقشة

قارنت هذه الدراسة بشكل منهجي بين أنظمة رادار MIMO و رادار المصفوفات الطورية باستخدام خوارزميات متقدمة (SQP، CFAR، Kalman، STAP، ESPRIT، MVDR، MUSIC) في بيئة MATLAB، وتوصلت إلى الاستنتاجات الرئيسية التالية:

أظهر رادار MIMO قدرة استثنائية على تمييز ما يصل إلى 16 هدفاً بشكل فريد، بينما بدأ أداء الرادار ذي المصفوفة الطورية في التدهور بعد 6 أهداف، حيث ارتفع حد CRB لديه بشكلٍ حاد. ويعود هذا التفوق إلى المصفوفة الافتراضية في نظام MIMO، والتي توفر درجات حرية (Degrees of Freedom) أكبر بكثير ($Mt \times Mr$) مقارنة بالرادار الطوري الذي يعتمد على الفتحة الفيزيائية المحدودة. وتعمل خوارزميات مثل MUSIC و ESPRIT على استغلال هذه الدرجات الإضافية لتقدير زاوية الوصول (DOA) بدقة بلغت 0.5° لرادار MIMO مقابل 2° للرادار الطوري، مما يجعله الخيار الأمثل لسيناريوهات الأهداف المتعددة.

حققت خوارزميات التحسين Newton-like و SQP تحسناً ملحوظاً في أنماط الإشعاع لكلا النظامين، كما أظهر رادار MIMO أداءً أعلى في كبت التداخل باستخدام خوارزمية MVDR (Capon).

أسفر التحليل الكمي المُفصّل لخرائط المدى_دوبلر عن نتائج دامغة تُبرز التفوق الواضح لأداء رادار MIMO. حيث تم قياس دقة المدى، المُعرّفة بالانحراف المعياري لتقدير موقع الهدف، فبلغت $\pm 0.18m$ لرادار MIMO مقابل $\pm 0.52m$ لرادار المصفوفة الطورية. وبشكلٍ مماثل، بلغت دقة السرعة $\pm 0.07m/s$ لرادار MIMO مقابل $\pm 0.22m/s$ لرادار المصفوفة الطورية.

قدم رادار MIMO فصل أوضح للأهداف مقارنة بالرادار ذي المصفوفة الطورية. حيث يستفيد MIMO من عرض النطاق الترددي المكافئ الأوسع الناتج عن الأشكال الموجية المتعامدة لتحسين دقة المدى. كما أن المصفوفة الافتراضية تزيد من الطول الفعال للهوائي، مما يحسن دقة دوبلر.

أظهر تطبيق خوارزمية STAP على رادار MIMO حافة فوضى (Clutter Ridge) أكثر حدة وضيقة مقارنة بالرادار الطوري، مما يشير إلى كبت متفوق للفوضى. فالدقة الزاوية الفائقة لـ MIMO تسمح له بفصل مكونات الفوضى بكفاءة أكبر.

سجل رادار MIMO خطأً تتبع أقل باستمرار عند استخدام مرشح كالمان مقارنة بالرادار ذي المصفوفة الطورية. وهذا يسمح للمرشح بإنتاج تقديرات حالة أكثر استقراراً وتقليل الخطأ التراكمي في التتبع، خاصة للأهداف متعددة المسارات أو في ظروف الضجيج العالية.

X. الاستنتاجات والتوصيات

بناءً على النتائج والمناقشة أعلاه، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

- يتفوق رادار MIMO في الدقة وسعة الأهداف، بينما يتفوق رادار المصفوفة الطورية في السرعة والكفاءة.

- تعمل الخوارزميات المتقدمة (MUSIC, STAP, Kalman) على تعزيز أداء كلا النظامين، لكن القيمة المضافة تكون أعلى في أنظمة MIMO بسبب مرونتها ودرجات الحرية الإضافية.
- يأتي الأداء المتفوق لـ MIMO مصحوباً بتعقيد حسابي أعلى في معالجة الإشارات، مما يتطلب منصات معالجة ذات قدرات عالية.
- يعتمد الاختيار بين أنظمة MIMO وأنظمة المصفوفة الطورية على المتطلبات التشغيلية، مثل سرعة المسح والدقة ومعالجة التداخل. ومن المفيد استكشاف ودراسة أنظمة رادار هجينة تجمع بين مزايا كلتا التقنيتين أي أنظمة MIMO-Phased Array المدمجة.
- يمكن دراسة خوارزميات التعلم الآلي في تحسين أداء كلا الرادارين. فمن أجل زيادة دقة وسرعة التقديرات من الممكن استبدال الخوارزميات التقليدية (مثل MUSIC/ESPRIT) بمقدرات DOA القائمة على التعلم العميق لتحقيق معالجة أسرع.

- [1] W. Wiesbeck *et al.*, "RADAR 2020: THE FUTURE OF RADAR SYSTEMS" 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/272027572>
- [2] J. Li and P. Stoica, "MIMO radar with colocated antennas," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 5. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 106–114, 2007. doi: 10.1109/MSP.2007.904812.
- [3] E. Cardillo and A. Caddemi, "A review on biomedical mimo radars for vital sign detection and human localization," *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 9. MDPI AG, pp. 1–15, Sep. 01, 2020. doi: 10.3390/electronics9091497.
- [4] K. Rambach, "Direction of Arrival Estimation Using a Multiple-Input-Multiple-Output Radar with Applications to Automobiles," 2017.
- [5] H. Rahman, "Fundamental Principles of Radar." by Taylor & Francis Group, 2019.
- [6] Abhilash Kashyap and Ashwin Madanmohan, "Identifiable Radar Reflectors For Automotive Pedestrian Safety", Master thesis, Halmstad university, 2020.
- [7] H. Deng and Z. Geng, "Radar Networks." First edition published 2020 by CRC Press. [Online]. Available: <http://taylorandfrancis.com>
- [8] S. Shome, A. K. Singh, S. N. Sur, R. Bera, and & B. Maji, "PHASED MIMO RADAR USING RECONFIGURABLE HARDWARE FOR TARGET CHARACTERIZATION," 2019.
- [9] V. V. Chudnikov, B. I. Shakhtarin , A. V. Bychkov, S. M. Kazaryan "DOA Estimation in Radar Sensors with Colocated Antennas", IEEE, 2020.

- [10] A. Reza, H. Muttaqin, and U. Miftachul, "Phased-MIMO Radar: Angular resolution," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1125, no. 1, p. 012046, May 2021.
- [11] M. Hefnawi, J. Bray, J. Bathurst, and Y. Antar, "MIMO radar using a vector network analyzer," *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 12, Dec. 2019.
- [12] C. Yuan Chong, "Signal processing for MIMO radars: detection under gaussian and non-gaussian environments and application to STAP." [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00772006>
- [13] J. Li and Petre. Stoica, *MIMO radar signal processing*. Canada,2009.
- [14] Bergin and Guerci, "MIMO Radar: Theory and Application." Artech House, U.S,2018.
- [15] S. M. Patole, M. Torlak, D. Wang, and M. Ali, "Automotive Radars: A review of signal processing techniques," *IEEE Signal Process Mag*, vol. 34, no. 2, pp. 22–35, Mar. 2017.
- [16] J. Gamba, "Signals and Communication Technology Radar Signal Processing for Autonomous Driving." Japan ,2020. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/4748>.
- [17] E. Khalil, "Study and compare improvement algorithms for the reliability of the MVDR beamforming method". Homs University Journal, Volume 43, Issue 24, 2020.
- [18] S. Al-Qantar et al., "Design and implementation of a UAV detection and tracking system". Master thesis in communications engineering. Homs University, 2020.
- [19] Robert Gilpin, Joey Bray, and Mostafa Hefnawi, "Real-Time Multiple Input Multiple Output (MIMO) Radar Using Software Defined Radio", 2022.

- [20] Jiang, Y.; Lan, X.; Shi, J.; Han, Z.; Wang, X. "Multi-Target Parameter Estimation of the FMCW-MIMO Radar Based on the Pseudo-Noise Resampling Method. *Sensors* 2022.
- [21] Xingyu Lu , "Co-Located MIMO Radar Target Detection in Cluttered and Noisy Environment Based on 2D Block Sparse Recovery", *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*, VOL. 69, 2021.
- [22] Xudong Zhang , "Multi-Aperture Space-Time Transmit and Receive Design for MIMO Radar", *IEEE SIGNAL PROCESSING LETTERS*, VOL. 28, 2021.
- [23] Borko B. Đakovića, Slobodan M. Simićb, Lidija M. Trivundžac, Aleksandar G. Ristićd, "Digital signal processing in MIMO radars with time-multiplexed transmit signals, *VOJNOTEHNIČKI GLASNIK / MILITARY TECHNICAL COURIER*, 2025, Vol. 73, Issue 2.
- [24] MathWorks. 2024. *Radar Data Cube* [online]. Available at: <https://www.mathworks.com/help/phased/gs/radar-data-cube.html> [Accessed: 24 May 2024].
- [25] Sun, H.. "Introduction to MIMO Radar Waveforms. *IEEE AESS*, 13 April [online]. Available at: <https://ieeaeess.org/presentation/lecture/introduction-mimo-radar-waveforms> [Accessed: 25 April 2024].
- [26] Han, K., Bauduin, M., & Bourdoux, A. 2024. "Beamspace Matrix Completion in Subarray-Based Sparse Linear Array for High-Resolution Automotive MIMO Radar". In: *2024 IEEE Radar Conference*

(*RadarConf24*), Denver, CO, USA, pp.1-6, May 06-10. Available at:
<https://doi.org/10.1109/RadarConf2458775.2024.10549360>.