

مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية
والكهربائية والمعلوماتية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 47 . العدد 8

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
54-11	م. هشام رزق شقوف	دراسة انشائية وحركية وديناميكية لبعض ميكانيزمات سيارة سياحية (آلية التوقيت)
80-55	م. وسام العلي د. حسين طياوي بحبوح	كشف هجمات حجب الخدمة الموزعة على الشبكات المعرفة برمجياً باستخدام التعلم العميق
118-81	م. شمعون سعيد د. عبد الكريم السالم	تخمين قناة الحزمة الفراغية باستخدام طريقة الاتجاه المتناوب للمضاعفات ADMM
134-119	م. محمد رامي الجندي د. عبّاد كاسوحة	دراسة مقارنة خواص متانة التحطم لكرات طاحنة محلية ومستوردة مصنوعة من حديد صب عالي الكروم
177-135	م. سعاد دوار د. ياسر عملة د. عبد الكريم السالم	تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

دراسة انشائية وحركية وديناميكية لبعض ميكانيزمات سيارة سياحية (آلية التوقيت)

إعداد الباحث: م. هشام رزق شقوف

ملخص البحث

تم في هذا البحث وضع القواعد العامة لإجراء الحسابات لمنظومة ميكانيكية لمحرك ثنائية الشوط والاسطوانات من خلال التحليل الحركي والديناميكي لكافة وضعيات هذه المنظومة معتمدين على استنتاج الدارة الترموديناميكية من وضعيات الحركة وطول الشوط وكما تم إجراء تحليل حركي وتحديد كافة المتطلبات لدراسة التوازن الديناميكي وتحديد كافة القوى كما تم إجراء الدراسات على آلية توقيت عمل المحرك

الكلمات المفتاحية: التحليل الحركي، ميكانيزم، المحرك

**A Construction, kinematic and dynamic study of some tourist car
mechanisms
(timing mechanism)**

Abstract

In this research, the general rules for performing calculations for a mechanical system for a two-stroke engine and cylinders were established through the kinetic and dynamic analysis of all positions of this system, relying on the deduction of the thermodynamic circuit from the movement positions and stroke length. A kinetic analysis was also conducted and all requirements were determined for studying the dynamic balance and determining all forces. Studies were also conducted on the mechanism of engine timing

Key Words: kinetic analysis – mechanism – engine

مقدمة

تخطيط وتحليل الرسوم الإنشائية ومعادلات حساب الميكانيزمات في الحالة العامة تعتبر من أهم المشاكل التي تواجه الباحث في دراسته لذلك تم العمل لوضع أسلوب حل هذه المشاكل ففي بحثنا هذا تم اعتماد الأساليب الحديثة لتنفيذ هذا البحث مما سمح لنا بإمكانية اختيار أسلوب الحساب والحل لهذه المسألة التي تنشأ في أثناء الدراسة، والحياة العملية أحياناً يكون من الصعوبة النصح بالعودة إلى المراجع المختصة لمعرفة الهدف .

1- معطيات البحث :

وصف لمخطط عمل السيارة والمعطيات الأولية لأجل التصميم، إذ يتم عمل سيارة الركاب ذات الجر الأمامي بواسطة محرك احتراق داخلي ثنائي الشوط وثنائي الأسطوانات كما هو مبين في الشكل إذ يتم نقل الحركة من خلال الفاصل الواصل ومن ثم إلى جملة مسننات للتحكم بسرعة السيارة كما هو موضح بالشكل (a1) والمتوضعة في علبة السرعة (صندوق المسننات) (r1).

قانون حركة هذا التابع معطى على الشكل (1r) كتابع لزاوية دوران الكرنك كما هو معلوم (زاوية دوران الكامه) ويبين الشكل زاوية الفتح والسكون ومن ثم زاوية الإغلاق والسكون الثابتة وهكذا تتكرر الدورة .

علبة نقل الحركة المبنية على الشكل (1 d) تتضمن مسننات أسطوانة Z_B, Z_A ومن ثم علبة سرعة مؤلفة من مسننات كوكبية مع مسننات شمسية Z_4, Z_1 ومسننات كوكبية Z_2, Z_3 وحامل H، ولأجل إجراء الحسابات نعتمد الفرضيات الآتية :

1- مركز ثقل الحدود 2&4 تحدد بالشكل الآتي $l_{AS_2} = l_{AS_4} = 0,35l_{AB}$ حيث S_2, S_4 مراكز ثقل للحدود 2,4 على الترتيب .

2- كتلة الحد (2) تعطى وفق العلاقات الآتية :

$$m_2 = q \cdot l_{AB}, q = 8kg / m, m_3 = m_5 = 0,7m_2, m_4 = 0, m_1 = 3,6m_2, m_9 = 0,1m_2 - 3$$

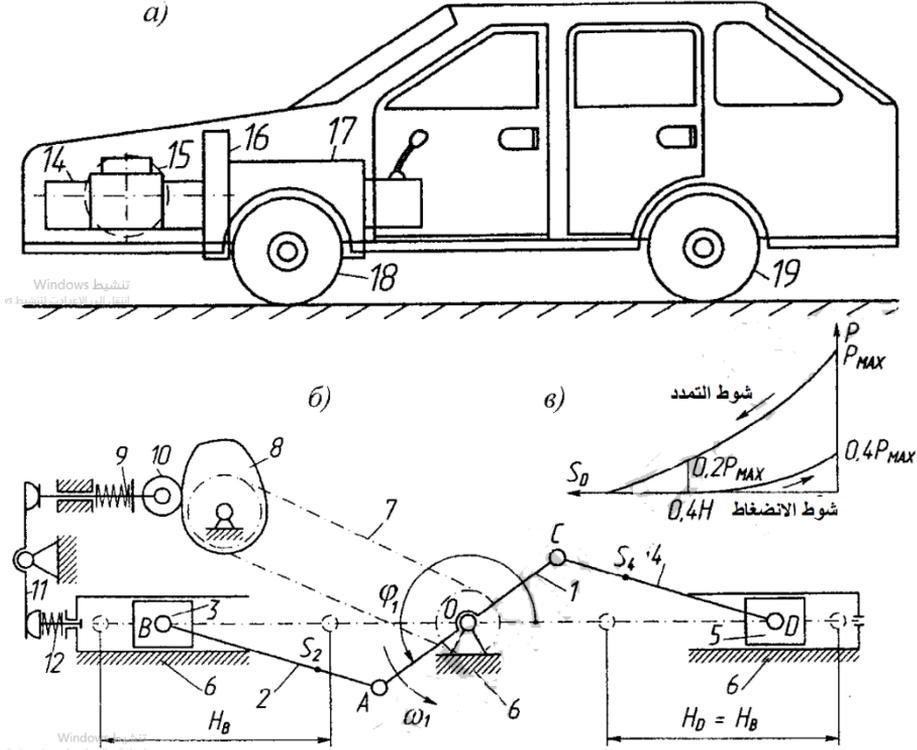
4- عزم العطالة حول محور مار من مركز الثقل للحدود 2&4 يعطى بالشكل الآتي :

$$I_{S_2} = 0,17m_2 l_{AB}^2, I_{S_4} = 0, I_{S_1} = I_{O_1} = 0,4m_1 l_{AC}^2 - 5$$

6- يختصر إلى المحور (1) عزوم العطالة الكتلية للحدود وفق العلاقة الآتية: $I_{c1}^T = 3I_{O_1}$

دراسة انشائية وحركية وديناميكية لبعض ميكانيزمات سيارة سياحية
(آلية التوقيت)

- 7- زاوية الضغط المسموح بها للكامة $\theta_{\max} = [\theta] = 27^\circ$ والجدول الآتي يبين كافة المعلومات
8- الأخرى اللازمة للتصميم .



الشكل (1)

جدوال (1) بمعطيات البحث

رقم	البارمترات	الرمز	واحدة القياس	لقيمة
1	شوط المكبس 3&5	$H_3 = H_4$	m	0,1
2	زاوية الضغط الاعظمية بين ذراع التوصيل ومسار المكبس	$\theta_{\max} = [\theta]$	rad	11
3	عدد دورات الكرنك	n_1	r.p.m	2000
4	الضغط الاعظمي داخل الاسطوانة	P_{\max}	MPa	4,4

5	قطر المكابس 3&5	d	m	0,075
6	درجة عدم انتظام الدوران	δ	-	0,02
7	الاحداثيات الزاوية للحساب	φ_1	rad	240
8	عدد اسنان المسننات	Z_A	-	10
		Z_B	-	30
9	مودول المسننات	m	mm	3
10	عدد دورات وصلة كاردين	n_k	r.p.m	33,3
11	الرفع الاعظمي للتابع	h	m	0,011
12	زاوية الرفع والهبوط	$\varphi_y = \varphi_B$	dgr	65
	زاوية السكون	φ_d	dgr	0

هدف البحث

يهدف البحث الى وضع الأسلوب النظري لأجراء كافة الحسابات المطلوبة لتصميم ميكانيزمات سيارة سياحية وفق تسلسل سلس وواضح لهذه الخطوات.

المناقشة

تعتبر مسألة تحليل بنية الآليات، أو ما يطلق عليه التحليل الانشائي من أهم ما يُدرس ويركز عليه الباحثون في العلوم التكنولوجية، وفي مقدمة من تطرق لهذا الموضوع كما ذكر آشور (Assur)، وفيما بعد تم تطوير أساليب مختلفة لتحليل بنية الآليات، وذلك لاعتبار أن معرفة المكونات اللازمة للبناء هي الخطوة الأولى الذي يجب القيام بها عند تصميم الآليات، وقد تم دراسة ذلك من قبل الكثيرين حيث تم التوصل إلى تحديد عدد الازدواجات الأعظمية الذي يمكن أن يمتلكها أحد الحدود فمثلاً هناك الحدود الثنائية ويرمز لها بالرمز n_2 ، والثلاثية n_3 ... الخ، وبتجميع هذه الحدود مع بعضها البعض نحصل على آلية بحلقات مغلقة، وحروف خارجية، وأخرى داخلية، وتعتمد على التحليل بدون ارتباطات زائدة مما يتطلب لتجميع الحدود مع بعضها البعض ازدواجات تستخدم في الوصل بين الحدود بحيث أصبحت التحريكية $M \geq 1$ ، و عدد من الازدواجات z المعقدة تُبين من خلال حدود أخرى في السلاسل، وأغلب الدراسات ركزت على

اعتماد حدود كثيرة الأزواج n_2, n_3, \dots, n_i ، والتي تعطي أشكال مختلفة لبناء الآليات، ولأجل زيادة الأشكال المختلفة للبناء يقترح استخدام المفصلات المعقدة [1,2,3,4].

تحليل بناء الميكانيزم وفق المعطيات، وكتابة معادلات درجة الحرية أو التحريكية

يهدف إجراء التصميم الديناميكي نفرض أن الميكانيزم مثالي ونعدّ في الحالة الحركية كل العناصر صلبة بشكل تام، ومتصلة بأزواج كينماتيكية، وهذه الأزواج الكينماتيكية تتشكل باتصال سطحي عنصرين.

انطلاقاً مما ذكر أعلاه فإن تحليل بنية الآليات يكمن في وضع قواعد رسوم البناء للآليات وشكلها بحيث تؤمن التحريكية اللازمة للميكانيزم وعدد الحلقات المغلقة غير التابعة K وغياب الارتباطات الزائدة و عدد الحدود الأصغري [1,2,3].

هدف وأسلوب الدراسة الديناميكي للآليات القياسية

يتم إجراء تحليل البنية والتحليل الديناميكي وتحليل الآليات القياسية في أسلوب التصميم أثناء الحركة الثابتة عندما السرعة الرئيسية لمحور الآلة، و تكمن المهمة الأساسية للتحليل البنيوي الديناميكي للآلية في تحديد عزم العطالة المختزل للآلية القياسية I_{II}^I (مع حساب عزم العطالة للحدافة دولاب الموازنة I_M) عندما تتغير السرعة الزاوية للحد المختزل إليه خلال دورة واحدة بحركة ثابتة لا تزيد قيمة تذبذبها عن معامل δ عدم الانتظام للدوران الذي يؤخذ من الجدول (1)[4].

الجدول (1) يبين قيم معامل عدم الانتظام للدوران وفق نوع الآلية [4]

نوع الآلات	قيمة درجة عدم الانتظام δ
المضخات	$\frac{1}{20} \dots \dots \frac{1}{30}$
آلات تشغيل المعادن، آلات الطباعة، آلات النسيج	$\frac{1}{20} \dots \dots \frac{1}{50}$
آلات المغازل	$\frac{1}{60} \dots \dots \frac{1}{1100}$
المحركات الكهربائية ذات التيار المستمر	$\frac{1}{100} \dots \dots \frac{1}{200}$
محركات السيارات	$\frac{1}{180} \dots \dots \frac{1}{300}$
محركات الطائرات	$\frac{1}{1000} \dots \dots$

مسألة التحليل الديناميكي لحركة الآلية القياسية يحددها قانون الحركة للحدود المختزل إليها مما يعني السرعة الزاوية وكذلك التسارع الزاوي للحركة عندها نحصل على قيمة I_{II}^I .
يتم إجراء تحليل البنية الديناميكي للآليات القياسية وكذلك التحليل باستخدام طريقة الرسم للعلاقة $\Delta T_1(\varphi)$ على أساس الاستهلاك الأعظمي للطاقة في ميكانيزمات السيارات والتي تعدّ ميكانيزمات محرك الاحتراق الداخلي كما هو مبين على الشكل (1) (6) .

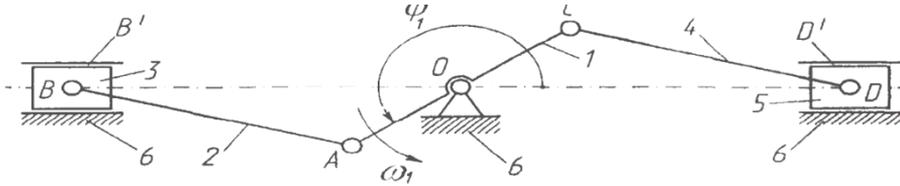
التحليل لميكانيزمات الأذرع

مسألة تحليل البنية تقوم على : تحديد درجة الحرية (التحريرية) للميكانيزم - حساب الارتباطات الزائدة وكيفية إزالتها ودرجة الحرية الخاصة - تحديد صف وبناء الميكانيزم الرسوم البنوية لميكانيزمات الأذرع (باعتبار الحد 1 هو الحد القائد) كما هو مبين في الشكل (2) حدود الميكانيزم هي: العمود المرفقي 1 (الكرنك)، 2، و 4 أذرع التوصيل، 3 و 5 المكابس (المنزقات)، الهيكل 6 (هيكل السيارة بما فيها الأسطوانات)، عدد الحدود المتحركة $n = 5$.
الازدواجات هي كما يأتي :

O - بين الحدين 1 و 6 ازدواج دوراني من الصف 5.

A - بين الحدين 2 و 1 و B بين الحدين (3،2) و C بين الحدين (4،1) و D بين الحدين (5،4) ازدواجات دورانية من الصف 5 والازدواجات B' بين الحدين (6،3) و D' بين (6،5) ازدواجات انسحابية من الصف 5 وبدرجة حرية واحد والصف 5 عددها $j_5 = j_H = 7$ أما

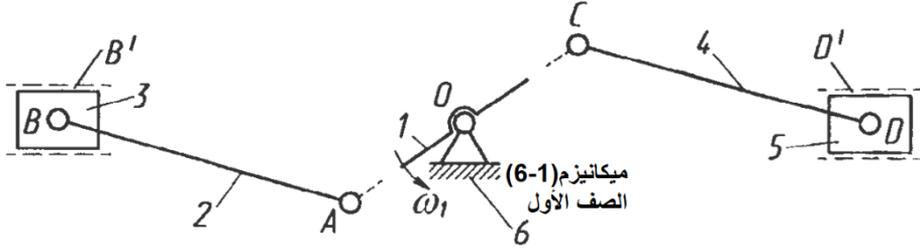
الازدواجات العلوية تملك درجتى حرية ومن الصف 4 تساوي $j_4 = j_y = 0$



الشكل (2)

مجموعة II(2-3)
الصف الثاني
الصف الثاني

مجموعة II(4-5)
الصف الثاني
الصف الثاني



الشكل (3)

وبذلك الآلية مستوية وتحريكيتها M تحدد بالشكل الآتي: $M = 3(n-j-1) + \sum_{i=1}^j f_i = 3(6-7-1) + 7 \cdot 1 = 1$

مما يعني أننا نحتاج إلى إحداثية عامة واحدة لتحديد وضعية الميكانيزم وكذلك منبع حركة واحد وهذا يتمثل بمعرفة الزاوية φ_1 [1,2,3].

تحليل الموضوع من خلال تحديد موضع كل الازدواجات من أجل اثنا عشر وضعية للحد القائد

لتحليل الموضوع يتوجب تحديد الابعاد الأساسية للحدود انطلاقاً من بعض المعطيات التي

تحددها الآليات الموجودة والتي تعتبر الأساس للانطلاق إلى تطوير أو تحديث أي تصميم، وهذا

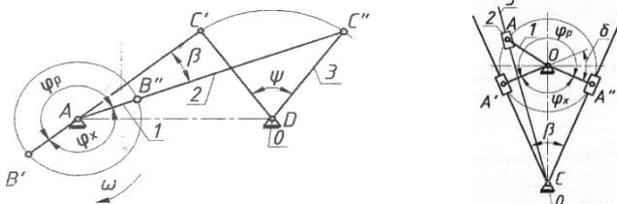
يتم وفق شروط العمل لذلك لأجل تحديد الابعاد الأساسية للميكانيزم نعتبر معلوم لدينا ما يأتي:

معامل تغير السرعة الوسطية للحد القائد في معظم الآليات إذ يمر الحد القائد بمسار مع حمولة

وأخرى على فراغ (بدون حمولة)، حيث يعود الحد القائد إلى موضعه الأصلي، و في مثل هذه

الآليات يتم التباطؤ عادةً في حالة عدم وجود حمولة، و يبين الشكل التالي احد الميكانيزمات في

وضعية مختلفة [2].



يبين الشكل (5) الوضعيات الحدية لميكانيزم مع منزلقه يبين الشكل (4) وضعيات الميكانيزم الحدية

لرباعية القضبان

لذلك لزيادة أداء الآلية يجب أن تكون سرعة حد الخرج في وضع الفراغ (عدم التحميل) أكبر من سرعة حد الخرج في حالة الحمولة (بسرعة ثابتة لحد الدخل). تسمى نسبة متوسط سرعة حد الخرج في حالة عدم التحميل إلى متوسط سرعة الخرج في حالة التحميل بمعامل التغيير في متوسط السرعة [4]:

$$k = \frac{V_{vacave}}{V_{wave}} \quad (2)$$

V_{vacave} - السرعة الوسطية بدون حمولة للحد القائد

V_{wave} - السرعة الوسطية مع وجود الحمولة للحد القائد.

ومثال آخر عن تحديد معامل تغير السرعة الوسطية: يمكن استبدال معامل متوسط سرعات حد الخرج بنسبة الزوايا المقابلة لدوران المرفق، والتي يتم تحديدها من المواضع القصوى للآلية كما هو مبين على الشكلين أعلاه [4] بما يأتي:

$$k = \frac{\varphi_w}{\varphi_{vac}} \quad (6)$$

φ_w - زاوية الحد القائد في شوط العمل.

φ_{vac} - زاوية الحد القائد في شوط عدم وجود حمولة (فراغ).

وكما هو مبين مجموع الزاويتين يساوي $360^\circ = \varphi_w + \varphi_{vac}$ ،

وبالتعويض بالعلاقة السابقة نجد [1,2,3,4]:

$$k = \frac{360 - \varphi_{vac}}{\varphi_{vac}} \quad (7)$$

و من ثم، وفقاً لمعامل التغيير المحدد في متوسط السرعة K ، باستخدام الصيغ (6) و (7) من الممكن تحديد زوايا الحد القائد بدون عمل φ_{vac} و زاوية الحد القائد مع وجود عمل (حمولة) φ_w ومع ذلك في الآليات غالباً ما يرتبط معامل التغيير في متوسط السرعة بزاوية التداخل θ أو تعطى الرمز β ، وهي الزاوية بين المواضع القصوى لقضيب التوصيل أو أقصى وضعية ومن ثم نستطيع كتابة:

$$k = \frac{180 + \theta}{180 - \theta} \quad (8)$$

لكي تكون الآلية منتجة من الضروري أن يكون معامل التغيير في متوسط السرعة أكبر من واحد. عند تجميع العديد من الآليات، وعند تحليل مجموعة من الميكانيزمات يتم إعطاء معامل التغيير في متوسط سرعة للحد القائد، وفقاً لذلك يتم تحديد زاوية التداخل بالشكل الآتي:

$$\theta = 180 \frac{k - 1}{k + 1} \quad (9)$$

بما أنه معلوم معامل تغير السرعة الوسطية للمنزقة 5 لذلك ممكن تحديد زاوية التداخل θ الشكل

$$\theta = 180 \frac{K_V - 1}{K_V + 1} = 180 \cdot \frac{0.62 - 1}{0.62 + 1} = 42.2^\circ \text{ الآتي:}$$

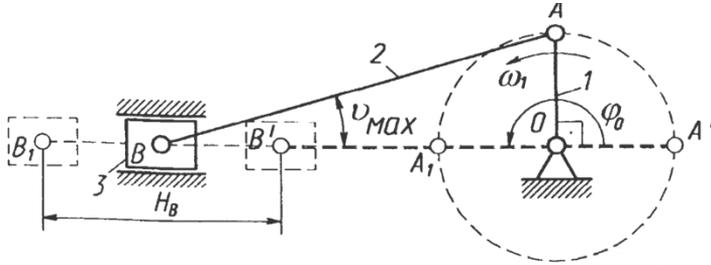
تحديد أبعاد وبارمترات أذرع الميكانيزم

وفق المعطيات الواردة في الجدول (1) بارمترات الدخل لبنية ميكانيزم الأذرع هي:

- شوط المكبس $H_3 = H_5 = 0,1m$ (3&5) - القيمة العظمى لزاوية الضغط لذراع التوصيل

$\theta_{max} = 11^\circ$ - عدد دورات الكرنك $n = 2000 r.p.m$

بارمترات الخرج للبنية التي سيتم تحديدها هي أبعاد الحدود & $l_{OA}, l_{OC}, l_{AB}, l_{CD}$ والسرعة الوسطية لدوران الكرنك ω_{ave} .



الشكل (6)

الشروط الأساسية لبنية الميكانيزم الحالي تعدّ تأمين شوط العمل $H_5 = H_3$ للمكابس وهذا بين حدين (هما النقطتين الميتة العليا والسفلى) لوضعيات الميكانيزم OAB & OA'B' عندما المرفق OA وذراع التوصيل AB يقعان على استقامة واحدة كما هو مبين في الشكل (6) والإحداثيات

العامة الأولية φ_0 التي تحدد الوضعيات الحدية لـ O,A,B للميكانيزم تساوي 180 من الشكل (6) نجد أن:

$$H = l_{OB1} - l_{OB} = (l_{OA} + l_{AB}) - (l_{AB} + l_{OA}) = 2l_{OA}$$

من هنا يكون طول المرفق $l_{OA} = l_{OC} = \frac{H}{2} = \frac{0,1}{2} = 0,05m$ ، ومن ثم تكون القيمة

الأعظمية لزاوية الضغط θ_{max} لذراع التوصيل AB تكون عندما يكون المرفق OA عمودي على المحور OB للمكبس (مسار المكبس) كما هو مبين في الشكل (6) من المثلث القائم

$$\sin \theta_{max} = \frac{l_{OA}}{l_{AB}} \text{ نجد } OAB \text{ من هنا توجد طول ذراع التوصيل } [4,5,6,7,10]:$$

$$l_{AB} = l_{CD} = \frac{l_{OA}}{\sin \theta_{max}} = \frac{0,05}{\sin 11} = 0,262m$$

من الشكل (6) والشكل (7) يتبين أن الميكانيزم مركزي (له مركز دوران ثابت) لذلك فإن الإزاحة e لمحور المكبس (المنزلة) يساوي الصفر، ومن ثم السرعة الزاوية الوسطية للكرنك

$$(1) \text{ تعطى بالشكل الآتي: } \omega_{ave} = \frac{\pi n_1}{30} = \frac{\pi \cdot 2000}{30} = 209,44 \frac{rad}{sec}$$

موضع الكتلة المركزية S يحدد بالتوافق مع ما تم ذكره أعلاه في الشكل (1) كما يأتي :

$$l_{AS2} = l_{CS4} = 0,35l_{AB} = 0,35 \cdot 0,262 \approx 0,092m, l_{OS1} = 0, l_{BS3} = 0, l_{DS4} = 0$$

كتلة الحدود تحدد بالشكل الآتي:

$$m_2 = q \cdot l_{AB} = 8 \cdot 0,262 = 2,096 \approx 2,1kg, m_3 = m_5 = 0,7m_2 = 0,7 \cdot 2,1 = 1,47kg$$

$$m_4 \approx 0, m_1 = 3,6 \cdot m_2 = 3,6 \cdot 2,1 = 7,56kg$$

يتم تحديد عزوم العطالة المركزية للحدود بالشكل الآتي :

$$I_{S2} = 0,17m_2 \cdot l_{AB}^2 = 0,17 \cdot 2,1 \cdot 0,262^2 = 0,0245kg \cdot m^2$$

الجدول (3) يبين نتائج الحسابات

$\omega_{lave}, \frac{rad}{sec}$	الأبعاد m			الكتلة kg			عزوم العطالة الكتلي $kg.m^2$	
	$\ell_{OA} = \ell_{OC}$	$\ell_{AB} = \ell_{CD}$	ℓ_{AS2}	m_1	m_2	$m_3 = m_5$	I_{S2}	I_{O1}
209,4	0,05	0,262	0,092	7,56	2,1	1,47	0,0245	0,0302
4								4

$$I_{S_4} = 0, I_{S_1} = I_{O_1} = 0, 4m_1 \cdot \ell_{OA}^2 = 0, 4 \cdot 7,56 \cdot (2,05)^2 = 0,03024kg.m^2$$

نتائج تحديد الأبعاد وبارامترات الميكانيزم نوردها في الجدول (3)

تحليل بنية آلية الكاماة

تتألف تركيبية آلية الكاماة من وصلة بشكل كاماة وتابع أو عتلة تتصل فيما بينها بواسطة ازدواجات، تقوم بتحقيق الاتصال بين عناصر الآلية، ويمكن أن تكون هذه الآليات مستوية أو فراغية، وبهذا تصنف إلى فئات (أسر) كما هو موضح في العلاقة الآتية لحساب معيار تقييد

$$M = N(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad \text{الحركة:}$$

N - فئة أو اسرة الآلية وقد تأخذ قيم مختلفة.

المواصفات الأساسية لتركيبية آلية الكاماة

أ - تحدد زاوية دوران الكاماة وضعية التابع، ويُحدد وضع التابع من دوران الكاماة بمقدار 360 ، وتقسم حركة التابع إلى أربع مراحل تقابل أربع زوايا لدوران الكاماة على الأكثر وهي كما يلي:

1- زاوية الصعود β_r ؛ 2- زاوية السكون الأولى β_{D1} ؛ 3- زاوية الهبوط β_f ؛ 4- زاوية السكون الثانية β_{D2} .

وبالانطلاق من ذلك تكون زاوية العمل لتركيبية آلية الكاماة هي دورة كاملة 360 :

$$\beta_w = \beta_r + \beta_{D1} + \beta_f + \beta_{D2} = 360^\circ$$

بعد اجراء تحليل آلية الكاماة المستخدمة كجزء من منظومة آلية التوقيت نكون بذلك تعرفنا

بشكل مفصل عليها ولكن التوقيت نستخدم كاماة قرصية مستوية بتابع دحروجي ترددي للتحكم

بعملية فتح واغلاق الصمامات [1,6,7,8,9,10].

تطبيقات الدراسة النظرية والمعادلات على الآلية المدروسة:

1- عدد الحدود $n = 6$ باعتبار الاطار المرجعي رقمه (6)، ومن ثم يكون نوع الحدود الداخلة

في تركيب الآلية كمايلي: ا- حدود ثنائية: $n_2 = 4$. ب- حدود ثلاثية: $n_3 = 2$.

$$cod = \frac{n_2, n_3, n_4, \dots, n_{r_{max}}}{v_2, v_3, v_4, \dots, v_p} = \frac{42}{0}$$

عدد الحلقات المغلقة من الكود يعطى بالشكل الآتي: وفق ما ذكر أعلاه فإن عدد الحلقات المغلقة

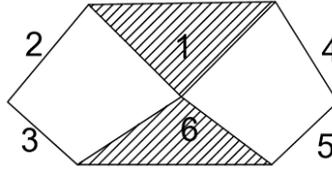
تساوي كمية الأرقام في بسط الكود: $k = 2$ ، ومن معادلة الحساب تعطى بالشكل الآتي:

$$k = j - n + 1 = 7 - 6 + 1 = 2$$

$$C = j + \gamma + \beta - n, j = 7, \gamma = 0, \beta = 0, n = 6 \Rightarrow C = 7 - 6 = 1$$

السلسلة الحركية مغلقة لأن كل حد يتصل بحدين من خلال ازدواجات وهي معقدة لأنه يوجد ضمن

حدودها حدود ثلاثية وتملك المخططات الآتية:



مخطط الدراسة الديناميكي للآلية مبين على الشكل (9) في هذه الدراسة اعتمدنا المراحل الآتية :

- تحديد المواصفات الديناميكية للحدود وهي [4, 6, 7] :

أ- اختزال العزم لقوى الحركة والقوى الفاعلة والمقاومة

$$I_{\Pi} = I_{\Pi}^I + I_{\Pi}^{II}$$

ب- اختزال عزم العطالة :
تحديد قانون حركة الحد المختزل اليه.

التحليل الديناميكي للميكانيزمات المستخدمة

أ- تحليل حركي ويدخل فيه تحديد سرعة وتسارع النقاط والحدود مع الأخذ بعين الاعتبار القانون

الذي تم الحصول عليه لدوران الحد المختزل.

ب- حساب القوى بهدف تحديد ردود الفعل في الازدواجات الحركية وعزم الموازنة وفق المخطط

المبين في الشكل (9).

تحديد الخصائص الحركية لميكانيزم الأزرع

في جوهر الخصائص الحركية من المخطط التمثيلي المذكور أعلاه نحدد إحداثيات ومواقع النقاط و الحدود لمشروعنا والسرعة الموافقة لأجل هذا التحديد ورسم مخططات السرعة والتسارع يتم تنفيذ العمل لأجل دورة عمل واحدة أي دوران المرفق (1) دورة واحدة (360°).

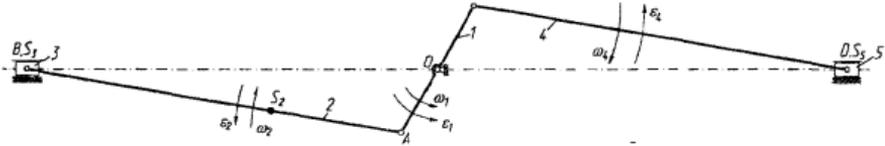
رسم المخطط الحركي

يبين الشكل (10) مخطط الحركي إذ يتم اختيار مقياس رسم معين وليكن $M = 0,001 \frac{m}{mm} = \frac{1}{1000} \frac{m}{mm}$

ومن ثم يتم تمثيل الحدود وفق الأطوال الآتية:

$$OA = OC = \frac{\ell_{OA}}{M} = \frac{0,05}{0,001} = 50mm, \quad AB = CD = \frac{\ell_{AB}}{M} = \frac{0,262}{0,001} = 262mm$$

$$AS_2 = \frac{\ell_{AS_2}}{M} = \frac{0,092}{0,001} = 92mm$$



يبين الشكل (10) المخطط الحركي

يتم إنشاء الوضعية الأولية الحدية وبالتالي موضع الميكانيزم وفق نصف القطر يكون:

$$\ell_1 = OA + AB = 50,262 = 312mm$$

تحديد سرعات النقاط كافة

باعتبار قانون تغير السرعة الزاوية الفعلي ω_1 للدوران الداخلي غير معلوم لذلك بدلاً منها يتم تحديد السرعة المقابلة مما يعني تشتق u من الإحداثيات الخطية نسبة الإحداثيات العامة نسبة إلى الإحداثيات العامة أي نسبة إلى زاوية دوران الكرنك φ كما يأتي:

$$u = i = \frac{\partial S}{\partial \varphi_1} = \frac{\partial X}{\partial \varphi_1} \quad (10)$$

مخطط السرعة الفعلية هو عبارة عن المضلع الشعاعي المشكل من المثلثات. كل قطعة فيه يعبر عنها وفق مقياس الرسم للسرعات الخطية الفعلية للنقاط $\vec{u} = i = \vec{S}'$ بقدر ما يكون إنشاء

دراسة انشائية وحركية وديناميكية لبعض ميكانيزمات سيارة سياحية
(آلية التوقيت)

من الحل التخطيطي للمعادلات الشعاعية (2-3) نحصل على المخطط الفعلي لسرعة النقطة D و تمثلها النقطة d ، و بقياس أطوال القطع في المخطط od, os_2, ab, ob ، وبالقسمة على مقياس رسم مخطط السرعة نحصل على قيم سرعة نقاط الحدود ومن ثم :

- السرعات الخطية الفعلية:

$$u_B = u_{31} = ob.M_V, u_D = u_{51} = od.M_V, u_{s_2} = os_2.M_V, u_{B/A} = ab.M_V$$

$$\omega_{21} = \frac{u_{B/A}}{\ell_{AB}} = \frac{u_{B/A}}{0,262} \quad (2) \text{ : السرعة الزاوية لذراع التوصيل}$$

لأجل وضعية الحساب رقم (3) إذا كان $\varphi_1 = 240^\circ$ نجد :

$$a_{s_2} = 0,35ab = 0,35.27 = 9,5mm, u_{31} = ob.M_V = 48.0,001 = 0,048m$$

$$u_{51} = od.M_V = 48.0,001 = 0,048m, u_{s_2} = os_2.M_V = 48,5.0,001 = 0,0485m$$

$$u_{BA} = ab.M_V = 27.0,001 = 0,027m, u_{21} = \frac{U_{BA}}{\ell_{AB}} = \frac{0,027}{0,262} = 0,103$$

نتائج القياس للقطع والحساب الفعلي للسرع لأجل 12 وضعية نوردتها في الجدول (4)

الجدول (4)

رقم الوضع ية	اطوال القطع على مخطط السرعة					القيم الفعلية للسرع			
	ab	as_2	os_2	od	ob	m u_{31}	$u_{s_2,y}$ m	u_{51} m	u_{21}
1	50	17,5	32, 5	0	0	0	0,0325	0	0,1906
2	44	15,4	39	- 29	29	0,029	0,039	- 0,029	0,168
3	27	9,5	48, 5	- 48	48	0,048	0,0485	0,048 -	0,103
4	0	0	50	- 50	50	0,05	0,05	-0,05	0

5	27	9,5	46	-	39	0,039	0,046	0,039	0,103
				39				-	
6	44	15,4	37	-	22	0,022	0,037	-	0,168
				22				0,022	
7	50	17,5	32,	0	0	0	0,0325	0	0,1906
			5						
8	44	15,4	37	22	-	-	0,037	0,022	0,168
				22	22	0,022			
9	27	9,5	46	39	-	-	0,046	0,039	0,103
				39	39	0,039			
10	0	0	50	50	-	-0,05	0,05	0,05	0
				50	50				
11	27	9,5	48,	48	-	-	0,0485	0,048	0,103
			5	48	48	0,048			
12	44	15,4	39	29	-	-	0,039	0,029	0,168
				29	29	0,029			

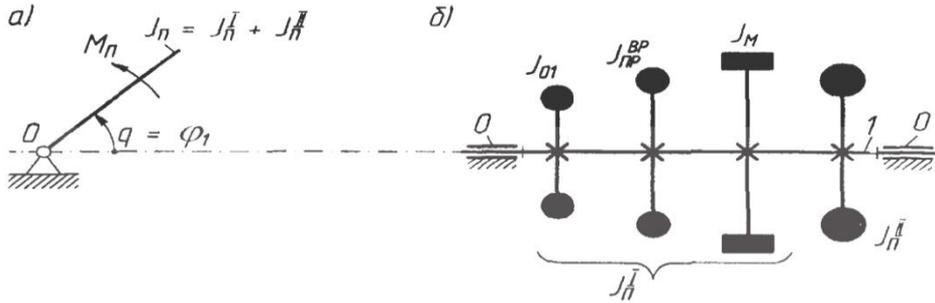
ملاحظات :

1- إشارة (+) أو (-) للسرعات $\vec{u}_B = \vec{u}_{31}$ و $\vec{u}_D = \vec{u}_{51}$ تحدد في منظومة الإحداثيات اليمينية (+) في اتجاه الأعلى أو اليمين و (-) باتجاه الأسفل أو اليسار.

المودول الديناميكي للآليات القياسية

لأجل تبسيط الحلول الديناميكي للرسوم الفعلية للآليات القياسية لمحرك السيارة المبين في الشكل (1) (عندما تكون الشروط مثالية و الحدود الصلبة، وغياب الخلوصات في الازدواجات الحركية ودرجة الحرية $W=1$) تكافئ المنظومة بكتلة واحدة لموديل الديناميكي. المودول الديناميكي للآلية يعني اختزال حدود الآلية المتحركة إلى حد متحرك (أي إلى وصلة الحد القائد) مع

احتساب القوى وبارمترات العطالة وفق الإحداثيات العامة. في هذه الحالة نستخدم المودول الديناميكي لوصلة الدوران والتي بالأساس تعتبر المرفق (1) كرنك الشكل (12)[4,3].



الشكل (12)

قانون حركة الحد المختزل يجب أن يكون كما لو انه الكرنك 1 (المرفق) لاذرع الميكانيزم مما يعني أن الإحداثيات العامة $q = \varphi_1$ والسرعة الزاوية للحد بعد الاختزال $\omega_{\Pi} = \dot{q} = \omega_1$ التسارع الزاوي $\alpha_{\Pi} = \dot{q} = \alpha_1$ لأجل ذلك كل بارمترات العطالة لحدود الميكانيزم (كتلتها m_i وعزوم عطالة I_i) تستبدل بعزم العطالة المختزل I_{Π} وبارمترات القوى على الحدود (أشعة القوى F_i ، وعزوم القوى M_i) تستبدل بعزم مختزل للقوى M_{Π} .

عزم العطالة المختزل I_{Π} هو عزم العطالة التي يفرضها الاختزال والطاقة الحركية T_{Π} الذي تساوي مجموع الطاقات الحركية $T_{\Pi} = \sum T_i$ أو بشكل آخر [2,3]:

$$\frac{1}{2} I_{\Pi} \omega_1^2 = \sum T_i \Rightarrow I_{\Pi} = 2 \frac{\sum T_i}{\omega_1^2}$$

في بحثنا عزم العطالة المختزل I_{Π} يتم صياغته وفق جزئيين الشكل (12) (b) ما يأتي :

$$I_{\Pi} = I_{\Pi}^I + I_{\Pi}^{II}$$

إذ أن :

$-I_{\Pi}^I$ القيمة أو المركبة الثابتة لـ I_{Π} من دوران الحدود و من علاقة النقل الثانية
لذلك $I_{\Pi}^I = const$ $u = i = const$.

$-I_{\Pi}^{II}$ المركبة المتغيرة للعزم المختزل I_{Π} ، والتي تنتج من الحدود متغيرة السرعة $u = i$

المركبة الثابتة I_{Π}^1 وفق الشكل (12) بدورها تعطى وفق المعادلة الآتية:

$$I_{\Pi} = I_{O1} + I_{\Pi}^{Bp} + I_M = I_{\Pi}^o + I_M \quad (13)$$

$I_{O1} = 0,03024 kg.m^2$ عزم عطالة المرفق (1) وفي مشروعنا هذا يملك القيمة

I_{Π}^{Bp} عزم العطالة المختزل على المحور (1) لعزم العطالة للحدود الذي تدور في الآلية في

مشروعنا يملك القيمة الآتية: $I_{\Pi}^{Bp} = I_{\Pi}^T = 3I_{O1} = 3.0,03024 = 0,09072 kg.m^2$

ملاحظات: إذا كانت الشروط المعطاة لـ I_i وحدود أخرى غير مختزلة على المحور 1 يجب أن

يتم اختزاله (يمكن اعتبارها) على محور الكرنك وذلك من معادلة الطاقة الحركية كما يأتي:

$$I_{\Pi}^{BP} = I_i \left(\frac{\omega_i}{\omega_1} \right)^2 = I_i u_{i-1}^2 = \frac{I_i}{u_{1-i}^2} \text{ من هنا نجد: } \frac{I_{\Pi}^{BP} \cdot \omega_1^2}{2} = \frac{I_i \cdot \omega_i^2}{2}$$

إذ أن : ω_i - السرعة الزاوية للحد (i) مع عزم عطالة I_i .

u_{1-i} - النقل من المحور (1) إلى الحد (i).

I_{Π}^o - مركبة معلومة لـ I_{Π}^1 ، ويعطى: $I_{\Pi}^o = I_{O1} + I_{\Pi}^{Bp} = 0,03024 + 0,09072 = 0,121 kg.m^2$

I_M - عزم عطالة الحداقة (الدولاب المعدل).

تحديد المركبة المتغيرة لعزم العطالة المختزل

المركبة المتغيرة I_{Π}^{11} لعزم العطالة المختزل تحدد من المساوآت للطاقة الحركية للحد

المختزل (1) والحدود 2,3,4,5 لأذرع الميكانيزم بالشكل الآتي:

$$\frac{1}{2} I_{\Pi}^{11} \cdot \omega_1^2 = \sum T_i = \sum \left(\frac{m_i \cdot V_{si}^2}{2} + \frac{I_{si} \cdot \omega_1^2}{2} \right) \quad (13)$$

كما أنه لأجل الحد (4) $m_4 \approx 0$ وكذلك $I_{S4} \approx 0$ ومن ثم مساوآت الطاقة الحركية بالتطابق

مع الرسوم المبينة على الشكل (b1) تصاغ بالشكل الآتي :

$$\frac{I_{\Pi}^{11} \cdot \omega_1^2}{2} = \frac{m_2 V_{s2}^2}{2} + \frac{I_{s2} \cdot \omega_2^2}{2} + \frac{m_3 V_B^2}{2} + \frac{m_5 V_D^2}{2}$$

$$I_{\Pi}^{11} = m_2 \left(\frac{V_{s2}}{\omega_1} \right)^2 + I_{s2} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + m_3 \left(\frac{V_B}{\omega_1} \right)^2 + m_5 \left(\frac{V_D}{\omega_1} \right)^2 = \text{من هنا نجد:}$$

$$m_2 u_{S2}^2 + I_{s2} u_{21}^2 + m_3 u_{31}^2 + m_5 u_{51}^2 = A + B + C + D$$

إذا أن : $A = m_2 u_{S2}^2, B = I_{s2} u_{21}^2, C = m_3 u_{31}^2, D = m_5 u_{51}^2$

دراسة انشائية وحركية وديناميكية لبعض ميكانيزمات سيارة سياحية
(آلية التوقيت)

بأخذ القيم الفعلية للسرعات من الجدول (5) الكتل وعزوم العطالة m_i & I_i من الجدول (1)

نحسب I_{Π}^{11} لكل وضعية وفق ما تم عمله في الوضعية الثالثة نجد:

$$A = m_2 u_{s_2}^2 = 2,1.(0,0485)^2 = 0,00484 kg.m^2$$

$$B = I_{s_2} u_{21}^2 = 0,03024.(0,103)^2 = 0,00026 kg.m^2$$

$$C = m_3 u_{31}^2 = 1,47(0,048)^2 = 0.00339 kg.m^2$$

$$D = m_5 u_{51}^2 = 1,47(-0,048)^2 = 0.00339 kg.m^2$$

جدول 6

رقم الوضعية	A kg.m ²		B kg.m ²		C kg.m ²		D kg.m ²		I_{Π}^{11} kg.m ²	y_i mm
1	0,0022 2	44,4	0,0008 9	17,8	0	0	0	0	0,0031 1	62,2
2	0,0031 9	63,8	0,0006 9	13,8	0,0017 7	35, 4	0,0017 7	35,4	0,0074 2	148, 4
3	0,0049 4	89	0,0026	5,2	0,0033 9	67, 8	0,0033 9	67,8	0,0119 7	239, 4
4	0,0052 5	105	0	0	0,0036 7	73, 4	0,0036 7	73,4	0,0126	255 2
5	0,0044 4	88,8	0,0026	5,2	0,0022 3	44, 6	0,0022 3	44,6	0,0091 7	183, 4
6	0,0028 7	57,4	0,0006 9	13,8	0,0007 1	14, 2	0,0007 1	14,2	0,0049 9	99,8
7	0,0022 2	44,4	0,0008 9	17,8	0	0	0	0	0,0031 1	62,2

8	0,0028 7	57,4	0,0006 9	13,8	0,0007 1	14, 2	0,0007 1	14,2	0,0049 9	99,8
9	0,0044 4	88,8	0,0026	5,2	0,0022 3	44, 6	0,0022 3	44,6	0,0091 7	183, 4
10	0,0052 5	105	0	0	0,0036 7	73, 4	0,0036 7	73,4	0,0126	255 2
11	0,0049 4	89	0,0026	5,2	0,0033 9	67, 8	0,0033 9	67,8	0,0119 7	239, 4
12	0,0031 9	63,8	0,0006 9	13,8	0,0017 7	35, 4	0,0017 7	35,4	0,0074 2	148, 4

نتائج الحساب I_{Π}^{11} لكل الوضعيات الأخرى (12) نوردتها بالجدول (2-2) وفق نتائج الحساب
ننشئ مخططات المركبة المتغيرة لعزم العطالة كتابع لزاوية دوران المرفق (φ_1)، ومقياس رسم

$$M_I = 0,00005 \frac{kg.m^2}{mm} \text{ مخطط عزم العطالة يعطي بالشكل الآتي:}$$

إحداثيات الرسم $y_I = \frac{I_{\Pi}^{11}}{M_I}$ ، ومن ثم تحدد الاحداثيات المتطابقة نوردتها بالجدول (6) وتعطى

$$y_A = \frac{A}{M_I}, y_B = \frac{B}{M_I}, y_C = \frac{C}{M_I}, y_D = \frac{D}{M_I} \text{ بالشكل الآتي:}$$

تحديد عزوم القوى المختزلة

عزوم القوى المختزلة M_{Π} - هي شروط العزم للقوى على الحدود المختزلة والعمل العنصري
هو dA_{Π} (يساوي الاستطاعة اللحظية P_{Π})، و يساوي مجموع الاعمال للعناصر $\sum dA_{\Pi}$
(أو مجموع الاستطاعات اللحظية $\sum P_i$). كل القوى الداخلية وعزوم القوى على حدود الآلية
المتحركة في مشروعنا M_{Π} يعتبر المجموع للجزئين كما يأتي [4,5,6,7]:

$$M_{\Pi} = M_{\Pi}^D + M_{\Pi}^C$$

إذا أن : M_{Π}^D - العزم المختزل لقوى الحركة .

M_{Π}^C - العزم المختزل لقوى المقاومة .

في بحثنا M_{Π}^D تحدد بالأساس من خلال قوى الحركة الناتجة عن ضغط غازات الاحتراق على المكابس 3&5 .

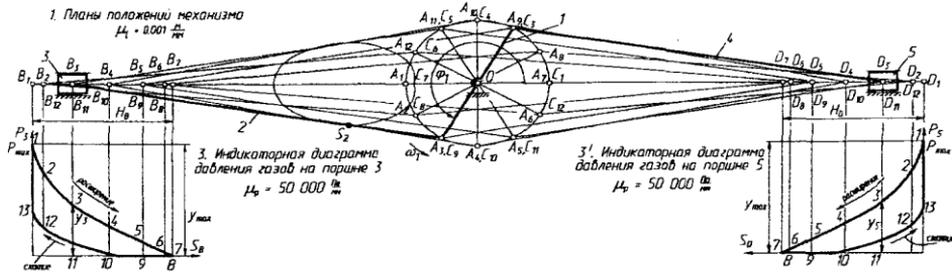
تحديد قوى الحركة على مكابس محرك الاحتراق الداخلي

القوى المحركة على المكابس 5&3 تتبع من قيمة الضغط P_i في أسطوانات المحرك :

$$F = P_i \cdot A_D \quad (14)$$

إذا أن : A_D - مساحة المكبس وتعطى بالعلاقة الآتية :

$$A_D = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,075)^2}{4} = 0,00442 m^2$$



يبين الشكل (13) رسم الدارة الترموديناميكية استناداً إلى وضعيات المكبس

قيمة الضغط تحدد وفق الرسم البياني المبين في الشكل (13)، والتي يبين تغيرات الضغط وفق إزاحة المكبس $P_i(S_i)$ الرسم المعطى والمرسوم وفق مقياس رسم معين مع مخطط لوضعيات بالجهة اليمينية المحور S يوازي المحور الذي يتحرك عليه المكبس أي $S_D // OD, S_B // OB$ ، ويوجد وضعيات بالأعلى TDC وبالأسفل BDC والنقاط الحدية للمكبس (النقطة الميتة السفلى والعليا) مقياس رسم مخطط الضغط يعطى بالشكل الآتي :

$$M_p = \frac{P_{\max}}{y_{P_{\max}}} = \frac{4,4 \cdot 10^6}{88} = 5000 \frac{Pa}{mm}$$

إذا أن : P_{\max} - الضغط الأعظمي المعطى $P_{\max} = 4,4 MPa = 4,4 \cdot 10^6 Pa$

$y_{P_{\max}}$ - القيمة الأعظمية المختارة للإحداثيات $y_{P_{\max}} = 88 mm$

ملاحظة: $y_{P_{\max}}$ لأجل مخططات الصفحة 1 تعتمد مو أقل من 60mm.

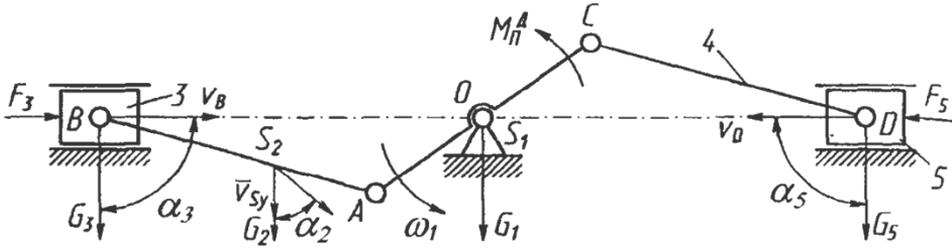
الجدول (7)

رقم الوضعية	y_3, mm	$P_3, N / m^2 \times 10^6$	F_3, N	y_5, mm	$P_5, N / m^2 \times 10^6$	F_5, N
1	88	4,4	19439	88	4,4	- 19439
2	65	3,25	14358	65	3,25	- 14358
3	40	2	8836	40	2	-8836
4	27	1,1	4860	27	1,1	-4860
5	9	0,45	1988	9	0,45	-1988
6	3	0,15	663	3	0,15	-663
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	4	0,2	884	4	0,2	-884
11	13	0,65	2872	13	0,65	-2872
12	27	1,35	5964	27	1,35	-5964
13	35,2	1,76	7776	35,2	1,76	-7776

ملاحظة : إشارة القوى (+, -) تحدد كتابع لاتجاه القوة التي يمكن لمنظومة للإحداثيات (+) لليمين والأعلى . (-) للأسفل واليسار .

تحديد العزم المختزل لقوى الحركة

بالآليات منها المحركات (في مشروعنا هذا - محرك احتراق داخلي لسيارة) بالبداية نحدد العزم المختزل لقوى الحركة M_{II}^D من مساوات الاستطاعة P_{III} على الحدود ومجموع الاستطاعات



الشكل (13a)

$\sum P_i$ للقوى الداخلية F_i والعزوم M_i للحدود المتحركة مما يعني $P_{II} = \sum P_i$ في مشروعنا هذا M_{II}^D تحدد من تأثير قوى الحركة F_5 & F_3 على المكابس وقوى الثقالة G للحدود بالتوافق مع مخطط القوى الشكل (13a) [4,5].

قوة النقل تحسب بالشكل الآتي :

$$G_2 = m_2 \cdot g = 2,1,9,81 = 20,6N, \quad G_3 = G_5 = m_5 \cdot g = 1,47,9,81 = 14,4N$$

الاستطاعة تعطى بالشكل الآتي :

$$P_{II} = \sum P_i = P_{F_3} + P_{G_3} + P_{G_2} + P_{F_5} + P_{G_5}$$

في هذه الحالة P_{G_3} & P_{G_5} تساوي الصفر إذا تصنع زوايا $\alpha_5 = \alpha_3 = 90^\circ$ ومن ثم تعطى

$$P_{G_i} = G_i \cdot V_i \cdot \cos \alpha_i = 0$$

عندئذ الاستطاعة يمكن حسابها بالعلاقة الآتية:

$$P_{II} = M_{II}^D \cdot \omega_1 = F_3 \cdot V_B + G_2 \cdot V_{S_2}^y + F_5 \cdot V_D \quad (15)$$

$$M_{II}^D = F_3 \cdot \frac{V_B}{\omega_1} + G_2 \cdot \frac{V_{S_2}^y}{\omega_1} + F_5 \cdot \frac{V_D}{\omega_1} = F_3 u_{31} + G_2 u_{S_2}^y + F_5 u_{51}$$

وهكذا في حالتنا $(20,6 \ll 663)$ $G_2 \ll F_{3min}$ & F_{5min} ، ولذلك فعلياً تأثير G_2 يمكن

$$M_{II}^D = F_3 u_{31} + F_5 u_{51}$$

إهمالها وحساب M_{II}^D وذلك وفق المعادلة $M_{II}^D = F_3 u_{31} + F_5 u_{51}$ وللسرعات الفعلية u_{31} & u_{51} من الجدول (7)

$$\text{الجدول (5) نحصل على : } M_{II}^D = 8836.0,048 + (-8836) \cdot (-0,048) = 848,2N \cdot m$$

تحديد العزم المختزل لقوى المقاومة

العزم المختزل لقوى المقاومة M_{Π}^C يحدد من مساوات عمل قوى الحركة A_D وعمل قوى المقاومة A_C خلال دورة للحركة المدروسة : $A_{D13} = |A_C|_{13}$ ، وكما هو معلوم العمل يعبر عنه من خلال تكامل عزم القوى وفق المعادلة الآتية [4] :

$$A = \int_0^{\varphi} M(\varphi) d\varphi \quad (2-8)$$

جدول (8)

رقم الوضعية	$F_3 u_{31}$ N.m	$F_5 u_{51}$ N.m	M_{Π}^D N.m	y_M mm	A_D J	y_A mm	y_T mm
1	0	0	0	0	0	0	6,8
2	416,4	416,4	832,8	83,3	218	21,8	16,3
3	424,1	424,1	848,2	84,8	658	65,8	26,2
4	243	243	486	48,6	1007	100,7	27,6
5	77,5	77,5	155	15,5	1175	117,5	20,1
6	14,6	14,6	29,2	2,9	1223	122,3	10,9
7	0	0	0	0	1231	123,1	6,8
8	0	0	0	0	1231	123,1	10,9
9	0	0	0	0	1231	123,1	20,1
10	-44,2	-44,2	-88,4	-8,8	1208	120,8	27,6
11	-137,8	-137,8	- 275,6	-27,6	1112	111,2	26,2
12	-172,9	-172,9	- 345,8	-34,6	949	94,9	16,3
13	0	0	0	0	859	85,9	6,8

في السيارات أو الآليات (محرك) يتم في البداية تحديد عمل قوى الحركة A_D بأسلوب حساب التكامل لتابع العزم المختزل لقوى الحركة $M_{\Pi}^D(\varphi_1)$ الذي يعطى القيمة المنفصلة

M_{Π}^D ونوردها في الجدول (4-2) وفق العلاقة الآتية :

$$A_{Di} = A_{Di-1} + \Delta A_{Di} = A_{Di-1} + \frac{M_{\Pi i}^D + M_{\Pi i-1}^D}{2} \Delta \varphi_1$$

$$\Delta \varphi_1 = \frac{2\pi}{12} = 0,5236 \text{ rad} \quad \text{إذ أن : } \Delta \varphi_1 - \text{خطوة التكامل وتحسب بالشكل الآتي:}$$

- . A_{Di} & A_{Di-1} - قيمة العمل في البدائي والنهائي i خطوة لتكامل $\Delta \varphi_1$.
- . $M_{\Pi i}^D, M_{\Pi i-1}^D$ - قيمة العزم المختزل للقوى.
- . M_{Π}^D - بدائي والنهائي i خطوة التكامل $\Delta \varphi_1$.
- . $A_{Di} = 0$ - قيمة A_D في الوضعية البدئية.

لأجل وضعية الحساب (3) إذ أن $\varphi_1 = 240^\circ$ يكون $A_{Di} = 0$

$$A_{D2} = A_{D1} + \frac{M_{\Pi 1}^D + M_{\Pi 2}^D}{2} \Delta \varphi_1 = 0 + \frac{0 + 83,8}{2} 0,5236 = 218J$$

$$A_{D3} = A_{D2} + \frac{M_{\Pi 2}^D + M_{\Pi 3}^D}{2} \Delta \varphi_1 = 218 + \frac{832,8 + 848,2}{2} 0,5236 = 658J$$

نتائج حساب A_D لأجل (3) وضعية للنقاط لدورة واحدة و مبينة في الجدول (8) بالنهاية للدارات الحركة التالية (النقطة 13) $A_{D13} = |A_{C13}| = 859J$. بالأخذ بالحساب فإن العزم

المختزل لقوى المقاومة فإنه ثابت $M_{\Pi}^C = const$ نحصل على :

$$A_{C13} = \int_0^{\varphi_{13}} M_{\Pi}^C d\varphi = M_{\Pi}^C \cdot \varphi_{13} = M_{\Pi}^C \cdot 2\pi$$

$$\text{المقاومة : } |M_{\Pi}^C| = \frac{|A_{C13}|}{2\pi} = \frac{A_{D13}}{2\pi} = \frac{859}{2.3,1416} = 136,8N.m$$

لقوى المقاومة ثابت، ومن ثم المخطط $M_{\Pi}^C(\varphi_1)$ نوره على شكل خط مستقيم أفقي على

$$\cdot y_{M_{\Pi}^C} = \frac{M_{\Pi}^C}{M_m} = \frac{136,8}{10} = 13,7mm$$

إنشاء مخططات العمل وتغير الطاقة الحركية

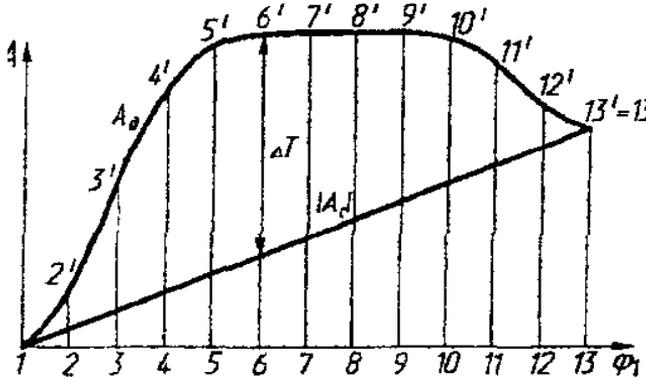
بنتيجة الحساب A_D في الجدول (8) ننشئ مخطط عمل قوى الحركة $A_D(\varphi_1)$ مقياس رسم مخطط العمل يعتمد $M_A = 10 \frac{J}{mm}$ والإحداثيات $y_A = \frac{A_D}{M_A}$ نوردتها بالجدول (8) مخطط عمل قوى المقاومة $A_C(\varphi_1)$ نوردتها على شكل مستقيم مائل متصل مع البداية ونهاية المخطط $A_{D13} = |A_C|_{13}$ النقاط $(1,13')$ كما أن $M_{II}^C = const$ خلال للحركة المدروسة: $A_{D13} = |A_C|_{13}$ كما هو مبين في الشكل (14) [2,3].

تغير الطاقة الحركية للآليات ΔT تساوي كما هو معلوم مجموع الأعمال أي أن:

$$\Delta T = \sum A = A_D + A_C = A_D + (-A_C) \quad (2-9)$$

ولكن كما هو مخطط عمل القوى المقاومة A_C ينشئ مع إشارة معاكسة $-A_C$ ومن ثم مخطط تغير الطاقة الحركية $\Delta T(\varphi)$ للآلية تنشئ بالحسابات التخطيطية للمخططات $A_D(\varphi_1)$ & $A_C(\varphi_1)$ وتوضع في منظومة إحداثيات جديدة $\varphi_1 - \Delta T$ والإحداثيات $y_{\Delta T}$ من مخطط العمل $A(\varphi_1)$ مقياس رسم الطاقة الحركية للقوى في هذه الحالة يساوي

$$M_T = M_A = 10 \frac{J}{mm}$$



يبين الشكل (14) مخطط العمل وتغير الطاقة كتابع لزاوية دوران المرفق مقياس الرسم

$$M_{w.T} = \frac{10J}{1mm}$$

ملاحظة: إذا كانت الإحداثيات $y_{\Delta T}$ صغيرة جداً ($y_{\max} < 20mm$) أو قيمة كبيرة

($y_{\max} > 120mm$) عندئذ على المخطط $\Delta T(\varphi)$ توضع إحداثيات أخرى $y'_{\Delta T} = k \cdot y_{\Delta T}$

إذا أن : K - معامل تكبير أو تصغير وبذلك $M_T = \frac{M_A}{k}$.

تحديد عزم العطالة المختزل I_{II}^I وعزم عطالة الدولاب المعدل (الحداقة)

نستخدم أسلوب ميرتسلاوف لدى إنشاء المخطط للطاقة الحركية المتغيرة $\Delta T_I(\varphi_1)$ للحدود الدوارة مع $I_{II}^I = const$ فيكون:

$$\Delta T_I = \Delta T - T_{II} \quad (16)$$

إذا أن:

$-T_{II}$ الطاقة الحركية للحدود مع عزم عطالة I_{II}^{II} متغير ومن ثم تعطى الطاقة الحركية بالشكل

$$T_{II} \approx \frac{I_{II}^{II} \cdot \omega_{lave}^2}{2} \text{ الآتي:}$$

على أساس العلاقة (16) لأجل الحصول على المخطط $\Delta T_I(\varphi_1)$ توضعها من المنحني $\Delta T(\varphi_1)$ باتجاه الأسفل للإحداثيات الاحداثية:

$$y_T = \frac{T_{II}}{M_T} = \frac{I_{II}^{II} \cdot \omega_{lave}^2}{2M_T} = \frac{y_1 \cdot \omega_{lave}^2}{2M_T} = k_1 \cdot y_1 \quad (17)$$

إذا أن : k_1 - معامل تحسب الإحداثيات y_1 للمنحنيات $I_{II}^{II}(\varphi_1)$ جدول (2)، ويعى بالعلاقة

$$k_1 = \frac{M_I \cdot \omega_{lave}^2}{2M_T} = \frac{0,00005 \cdot (209,44)^2}{2 \cdot 10} = 0,1097 \text{ الاتية:}$$

لأجل الوضعية المدروسة (3) نجد: $y_{T3} = 0,107.239,4 = 26,2mm$

للإحداثيات y_T نورها في الجدول (9) لأجل بناء المخطط $\Delta T_I(\varphi_1)$ يكون باتجاه الأعلى ومن

ثم أفقياً مماسايتفق مع المحور ΔT عندئذ التغير الأعظمي ΔT_{max} يعطى بالشكل الآتي:

حساب قيمة الجزء يتوجب أن تكون ثابتة لعزم العطالة $\Delta T_{max}^I = ab \cdot M_T = 84.10 = 840J$

المختزل I_{II}^I بحيث تؤمن استقرار بالدوران للمرفق 1 وفق معامل عدم انتظام الدوران المعطى

$$I_{II}^I = \frac{\Delta T_{max}^I}{\delta \cdot \omega_{lave}^2} = \frac{840}{0,02 \cdot (209,44)^2} = 0,95748kg \cdot m^2 \text{ ويساوي إلى:}$$

من المعادلة (17) لأجل I_{II}^I تحدد عزم العطالة للدولاب المعدل (الحداقة) على محور المرفق

(الكرنك) الذي يؤمن متطلبات انتظام الدوران بالشكل الآتي:

$$I_M = I_{\Pi}^I - I_{\Pi}^O = 0,95748 - 0,12096 = 0,83652 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

المعدل (الحداقة) يكون قطر القرص: $D \approx 12 \cdot \ell_{OA} = 12 \cdot 0,05 = 0,6 \text{ m}$
المعدل (الحداقة) $m \cdot D^2$ واعتماد الكتلة m_M كما يأتي:

$$m \cdot D^2 = 8 \cdot I_M = 8 \cdot 0,83652 = 6,692 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \quad m_M = \frac{m \cdot D^2}{D^2} = \frac{6,692}{0,6} = 18,59 \text{ kg}$$

التحليل الديناميكي لحركة الآلية

يتوجب تحديد السرعة الزاوية ω_1 والتسارع الزاوي α_1 للحد المختزل إليه (المرفق 1) داخل الدارة بعد أن يكون وضع عليه الحداقة (الدولاب المعدل) بما يؤمن حساب قيمة I_{Π}^I [5].
السرعة الزاوية ω_1 يمكن أن تحدد من علاقة الطاقة الحركية T_1 للحدود الدوارة مع I_{Π}^I كما يأتي:

$$T_1 = \frac{I_{\Pi}^I \cdot \omega_1^2}{2} \Rightarrow \omega_1 = \sqrt{\frac{2T_1}{I_{\Pi}^I}}$$

بالتوافق مع طريقة ميرتسالوف ننشئ المنحني $\Delta T_1(\varphi_1)$ الذي يعتبر تقريبي، ومخطط تغير السرعة الزاوية $\Delta \omega(\varphi_1)$ وتغيرها عن القيمة الوسطية للسرعة الزاوية ω_{ave} لذلك لأجل التحديد التخطيطي لـ ω_1 نحتاج للقطعة ab على المخطط $\Delta T_1(\varphi_1)$ يقسم بمنتصفه ومن النقطة $\frac{ab}{2}$ ننشئ مستقيم أفقي (وسطي) والذي يتوافق مع القيمة ω_{ave} من هذا المستقيم المتوسط في وضعية الحساب رقم (3) يمكن قياس الإحداثيات $y_{\Delta \omega_3}$ حتى المنحني ΔT_1 فيكون $y_{\Delta \omega_3} = -11 \text{ mm}$ عندئذ السرعة الزاوية ω_1 في هذه الوضعية تكون مساوية: $\omega_1 = \omega_{ave} + \Delta \omega_1 = \omega_{ave} + y_{\Delta \omega} \cdot M_{\omega}$
إذا أن: M_{ω} - مقياس رسم السرعة الزاوية بالمخطط $\Delta \omega$ ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$M_{\omega} = \frac{\Delta \omega_{\max}}{ab} = \frac{\delta \cdot \omega_{ave}}{ab} = \frac{0,02 \cdot 209,44}{84} = 0,0499 \frac{\text{radmm} \cdot \text{sec}}{\text{sec}}$$

بالوضعية رقم (3) تعطى السرعة الزاوية بالشكل الآتي:

$$\omega_{13} = 209,44 + (-11) \cdot 0,0499 = 208,99 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

التسارع الزاوي α_1 للحد (1) يحدد من معادلة الحركة للحدود وذلك وفق شكلها التفاضلي كما يأتي:

$$\alpha_1 = \frac{\partial \omega_1}{\partial t} = \frac{M_{\Pi}^D - M_{\Pi}^C - \frac{\omega_1^2}{2} \cdot \frac{\partial I_{\Pi}}{\partial \varphi_1}}{I_{\Pi}^I} \quad : \quad M_{\Pi}^D + M_{\Pi}^C = I_{\Pi}^I \cdot \frac{\partial \omega_1}{\partial t} + \frac{\omega_1^2}{2} \cdot \frac{\partial I_{\Pi}}{\partial \varphi_1}$$

نجد لأجل الوضعية (3) للحساب تكون قيمة التسارع الزاوي:

$$\alpha_1 = \frac{848 - 136,8 - \frac{(208,99)^2}{2} \cdot 0,004686}{0,096945} = 628,3 \frac{rad}{sec^2}$$

إذا أن :

M_{Π}^D, M_{Π}^C - عزم القوى المختزلة المقاومة والحركية في الوضعية للحساب تأخذ القيم الآتية :

$$M_{\Pi}^D = 848N.m, M_{\Pi}^C = 136,8N.m$$

$$\omega_1 - \text{السرعة الزاوية الفعلية للوضعية (3) تأخذ القيمة الآتية: } \omega_1 = 208,99 \frac{rad}{sec}$$

I_{Π} - العزم الإجمالي المختزل للعتالة في الوضعية (3) ويعطى بالشكل الآتي:

$$I_{\Pi} = I_{\Pi}^I + I_{\Pi(3)}^II = 0,95748 + 0,01197 = 0,96945 kg.m^2$$

$\frac{\partial I_{\Pi}}{\partial \varphi_1}$ - تفاضل I_{Π} بالنسبة للزاوية φ_1 ويحدد تخطيطياً من المنحني $I_{\Pi}^II(\varphi_1)$ ويعطى

بالشكل الآتي:

$$\frac{\partial I_{\Pi}}{\partial \varphi_1} = \frac{\partial}{\partial \varphi_1} (I_{\Pi}^I + I_{\Pi}^II) = \frac{\partial I_{\Pi}^II}{\partial \varphi_1} = \frac{M_I}{M_{\varphi}} tg \alpha_1 = \frac{0,00005}{0,0349} tg 73^{\circ} = 0,004685 kg.m^2$$

α_1 - زاوية ميل نحصل من المخطط $I_{\Pi}^II(\varphi_1)$ وفي الوضعية (3) تأخذ القيمة $\alpha_1 = 73^{\circ}$

M_{φ}, M_I - مقاييس رسم المخطط $I_{\Pi}^II(\varphi_1)$ وتأخذ القيم الآتية:

$$M_{\varphi} = 0,0349 \frac{rad}{mm}, M_I = 0,00005 \frac{kg.m^2}{mm}$$

يوجه في جهة السرعة الزاوية ω_1 وفي الاتجاه المعاكس في (-) .

التحليل الحركي وفق طريقة المخططات

بعد تحديد القيمة الفعلية للسرعة الزاوية الدنيا نظرياً للحد القائد(الكرنك) يتم إجراء التحليل

الحركي، و يتم الحساب لأجل الوضعية رقم (9) بمعرفة الإحداثيات العامة $\varphi_1 = 240^{\circ}$ التي

تعكسها رسمة الميكانيزم في هذه الوضعية باستخدام مقياس رسم M_{φ} ورسم القطع

AS_2, CD, AB, OC, OA ، وإجراء الحساب وفق الفقرة (3-4-1)، وذلك الأجراء يتم وفق

الأسلوب المستخدم لأجل الإحداثيات المعطاة إذ أن قيمة السرعة الزاوية والتسارع الزاوي للكرنك 1

في الوضعية (9) تساوي $\alpha_1 = 628,5 \frac{rad}{sec^2}$, $\omega_1 = 208,89 \frac{rad}{sec}$ و يبين الاتجاه لها على

الرسم كما يشير إلى ذلك الأسهم [1,4,5,6].

إنشاء مخطط السرعة

لأجل إنشاء مخطط السرعة يلزم تحديد سرع النقاط A&C للمرفق كما يأتي:

$$V_A = V_C = \omega_1 \cdot \ell_{OA} = 208,89 \cdot 0,05 = 10,44 \frac{m}{sec}$$

القطع oc & oa تعبر عن سرعة النقاط A&C وتساوي $26,1mm$ ونساوي $\frac{V_A}{M_V} = \frac{10,44}{0,4} = 26,1mm$

إنشاء مخطط السرعة ينفذ وفق المعادلة (18) وإنشاء الميكانيزم يتم كما يأتي:

$$II(2,3) \leftarrow I(0,1) \rightarrow II(4,5)$$

لأجل مجموعة اشور $II(2,3)$ نكتب المعادلة الشعاعية لسرعة النقطة B كما يأتي:

$$\vec{V}_B = \vec{V}_A + \vec{V}_{B/A}, \quad \vec{V}_B = \vec{V}_{Bo} + \vec{V}_{B/Bo} \quad (17)$$

إذا أن $\vec{V}_A \perp OA$ وتوجه باتجاه ω_1 ، \vec{V}_C عكس اتجاه \vec{V}_A ، $\vec{V}_{B/A} \perp AB$ ، $\vec{V}_{Bo} = \vec{0}$ ، $\vec{V}_{B/Bo} \parallel OB$ ، في نقطة تقاطع الأشعة المعادلة (17) تمثل تخطيطياً كما هو مبين في الشكل (15) في نقطة تقاطع الأشعة $\vec{V}_{B/A}$ & $\vec{V}_{B/Bo}$ نحصل على النقطة b موقع النقطة S_2 لمركز كتلة ذراع التوصيل (2) على القطعة ab تحدد وفق نظرية خيال السرعة كما يأتي:

$$\frac{as_2}{ab} = \frac{AS_2}{AB} \Rightarrow as_2 = ab \frac{AS_2}{AB} = 12,8 \frac{46}{131} = 3,51mm$$

سرعة النقطة D في مجموعة اشور (4,5) تحدد كذلك من جملة المعادلات الشعاعية الآتية:

$$\vec{V}_D = \vec{V}_C + \vec{V}_{D/C}, \quad \vec{V}_D = \vec{V}_{Do} + \vec{V}_{D/Do} \quad (18)$$

إذا أن $\vec{V}_C \perp OC$ ويتجه باتجاه ω_1 و $\vec{V}_{D/C} \perp DC$ ، $\vec{V}_{Do} = \vec{0}$ ، $\vec{V}_{D/Do} \parallel OD$ حل المعادلات (18) يتم بتمثيلها تخطيطياً من إنشاء مخطط السرعة المنشأ توجد السرعات المطلقة للنقاط .

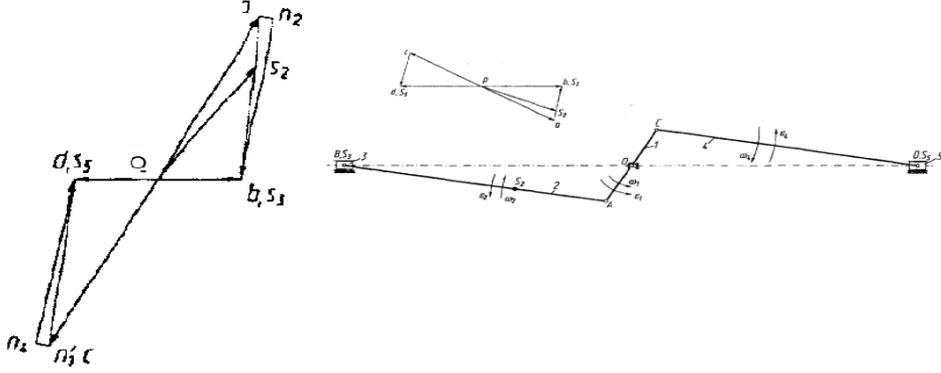
$$V_B = ob \cdot M_V = 25 \cdot 0,4 = 10m / sec, V_D = od \cdot M_V = 25 \cdot 0,4 = 10m / sec$$

$$V_{S_2} = os_2 \cdot M_V = 25 \cdot 0,4 = 10m / sec$$

السرعات النسبية تعطى بالشكل الآتي:

$$V_{B/A} = ab.M_V = 12,8.0,4 = 5,12m / sec$$

$$V_{D/C} = dc.M_V = 12,8.0,4 = 5,12m / sec$$



الشكل (15)

السرعات الزاوية لأذرع التوصيل 2&4 :

$$\omega_2 = \frac{V_{B/A}}{l_{AB}} = \frac{ab.M_V}{l_{AB}} = \frac{5,12}{0,262} = 19,54 \frac{rad}{sec}, \omega_4 = \frac{V_{D/C}}{l_{DC}} = \frac{dc.M_V}{l_{DC}} = \frac{5,12}{0,262} = 19,54 \frac{rad}{sec}$$

اتجاهات السرعة الزاوية ω_2 & ω_4 تحدد بالتوافق مع اتجاهات السرعة النسبية $V_{B/A}$ & $V_{D/C}$ في النقاط B&D لأذرع التوصيل 2&4 ومن ثم اتجاه ω_2 & ω_4 يعبر عنها بسهم منحني على الحدود 2&4 للمخطط الحركي للميكانيزم.

2-2-3- إنشاء مخطط التسارع

لإنشاء مخطط التسارع نبدأ من وصلة الدخل (1) وذلك بتحديد تسارع النقاط A&C من المرفق

وفق ما يأتي [1] :

$$\vec{a}_A = \vec{a}_{A_o}^{\tau} + \vec{a}_{A_o}^n, \quad \vec{a}_C = \vec{a}_{C_o}^{\tau} + \vec{a}_{C_o}^n \quad (19)$$

إذا أن : \vec{a}^n - مركبة التسارع الناطمية وتمثل على مخطط التسارع بالشكل الآتي :

وتعطى قيمها كما يأتي :

$$a_{A_o}^n = \omega_1^2 l_{OA} = 208,89^2.0,05 = 2181,75m / sec^2, a_{C_o}^n = \omega_1^2 l_{OC} = 208,89^2.0,05 = 2181,75m / sec^2$$

مركبة التسارع المماسية $\vec{a}_{A_o}^{\tau}$ & $\vec{a}_{C_o}^{\tau}$ وتمثل على مخطط التسارع كما يأتي :

و $\vec{a}_{C_o}^{\tau} \perp \vec{a}_{C_o}^n$ وتكون متعامدة مع المركبة الناطمية وتتجه وفق اتجاه التسارع الزاوي وتحسب

$$a_{Ao}^{\tau} = \alpha_1 \cdot \ell_{OA} = 628,3.0,05 = 31,42m / \text{sec}^2$$

قيمتها كما يأتي :

$$a_{Co}^{\tau} = \alpha_1 \cdot \ell_{OC} = 628,3.0,05 = 31,42m / \text{sec}^2$$

باختيار مقياس رسم $M_a = 100 \frac{m / \text{sec}^2}{mm}$ تحدد طول القطع الممثلة والمبينة على المخطط

التي تمثل تسارع النقاط C&A وقيمتها كما يأتي:

$$o'a_1' = \frac{a_{Ao}^n}{M_a} = \frac{2181,75}{100} = 21,82mm; a_1'a' = \frac{a_{Ao}^{\tau}}{M_a} = \frac{31,42}{100} = 0,31mm$$

$$o'c_1' = \frac{a_{Co}^n}{M_a} = \frac{2181,75}{100} = 21,82mm; c_1'c' = \frac{a_{Co}^{\tau}}{M_a} = \frac{31,42}{100} = 0,31mm$$

من قطب مخطط التسارع o' ننشئ القطع $o'a_1'$ و $o'c_1'$ موازي للحدود OA&OC ومن

نهايتها a_1' و c_1' ننشئ القطع $a_1'a' \perp AO$ و $c_1'c' \perp CO$ وذلك باتجاه α_1 .

تسارع النقطة B في المجموعة (2-3) توجدنا تخطيطياً من جملة المعادلات الشعاعية الآتية :

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{B/A}^n + \vec{a}_{B/A}^{\tau}, \quad \vec{a}_B = \vec{a}_{BO} + \vec{a}_{B/Bo}^{cor} + \vec{a}_{B/Bo}, \quad (20)$$

إذا أن : $-\vec{a}_{B/Bo}^{cor}$ مركبة تسارع كوريوليس للنقطة B وتعطى قيمته بالشكل الآتي:

$$\vec{a}_{B/Bo}^{cor} = 2 \cdot \omega_o \cdot V_{B/Bo} = 2 \cdot 0,10 = 0$$

التسارع الناظمي للنقطة B بالنسبة للنقطة A يعطى بالعلاقة الآتية:

$$a_{B/A}^n = \omega_2^2 \ell_{AB} = 19,54^2 \cdot 0,05 = 100,03m / \text{sec}^2$$

$$a'b_1' = \frac{a_{B/A}^n}{M_a} = \frac{100,03}{100} = 1mm \text{ كما يأتي :}$$

النقطة S_2 مركز كتلة ذراع التوصيل (2) تحددنا على مخطط التسارع وفق نظرية خيال التسارع

وبالقياس للقطعة $a'b' = 19,5mm$ ومن ثم نحسب طول القطعة $a's_2'$ بالشكل الآتي :

$$a's_2' = a'b' \frac{AS_2}{AB} = 19,5 \frac{46}{131} = 6,8mm$$

تسارع النقطة D بالمجموعة (4,5) تحدد من منظومة المعادلات الشعاعية كما يأتي:

$$\vec{a}_D = \vec{a}_C + \vec{a}_{D/C}^n + \vec{a}_{D/C}^{\tau}, \quad \vec{a}_D = \vec{a}_{DO} + \vec{a}_{D/Do}^{cor} + \vec{a}_{D/Do}, \quad (21)$$

إذا أن : $\vec{a}_{D/C}^n$ - مركبات التسارع الناظمية والمماسية للنقطة D عند دوران الحد (4) بالنسبة للنقطة C $\vec{a}_{D/C}^t \perp DC$, $\vec{a}_{D/C}^n // DC$ وتعطى قيمته بالشكل الآتي:

$$a_{D/C}^n = \omega_4^2 \ell_{DC} = 19,54^2 \cdot 0,05 = 100,03 \text{ m/sec}^2$$

ومن ثم يمثل على مخطط التسارع بالشكل الآتي: $c'd'_1 = \frac{a_{D/C}^n}{M_a} = \frac{100,03}{100} = 1 \text{ mm}$

(النقطة Do لا تتحرك لأنها تعتبر من الحد الثابت) $\vec{a}_{D/Do} = 0$

$\vec{a}_{D/Do}^{cor}$ - مركبة تسارع كوريوليس للنقطة D وتعطى قيمته بالشكل الآتي:

$$\vec{a}_{D/Do}^{cor} = 2 \cdot \omega_o \cdot V_{D/Do} = 2 \cdot 0,10 = 0$$

$\vec{a}_{D/Do}$ - التسارع النسبي للنقطة D بعلاقتها مع النقطة Do .

من مخطط التسارع الذي تم إنشاؤه نوجد التسارع المطلق للنقاط :

$$a_B = o'b' \cdot M_a = 8 \cdot 100 = 800 \text{ m/sec}^2, a_D = o'd' \cdot M_a = 8 \cdot 100 = 800 \text{ m/sec}^2$$

$$a_{S_2} = o's'_2 \cdot M_a = 15,5 \cdot 100 = 1550 \text{ m/sec}^2$$

المركبة المماسية النسبية لتسارع الحد(2) والحد (4) يعطى بالشكل الآتي :

$$a_{B/A}^t = b_2'b' \cdot M_a = 18,5 \cdot 100 = 1850 \text{ m/sec}^2, a_{D/C}^t = d_4'd' \cdot M_a = 18,5 \cdot 100 = 1850 \text{ m/sec}^2$$

التسارع الزاوي للحدود يعطى بالعلاقات الآتية :

$$\alpha_2 = \frac{a_{B/A}^t}{\ell_{AB}} = \frac{1850}{0,262} = 7061,1 \frac{\text{rad}}{\text{sec}^2}, \alpha_4 = \frac{a_{D/C}^t}{\ell_{DC}} = \frac{1850}{0,262} = 7061,1 \frac{\text{rad}}{\text{sec}^2}$$

اتجاهات α_2 & α_4 نحصل عليها عن طريق وضع الشعاع $\vec{a}_{B/A}^t$ & $\vec{a}_{D/C}^t$ في النقاط B&D

لذرع التوصيل 2&4 عندئذ دور الوصلات 2&4 تحت تأثير هذه المركبة حول A&C فنحصل

على اتجاه دوران α_2 & α_4 .

تحديد القوى الخارجية على الوصلات

في البداية نحدد القوى المؤثرة على حدود الميكانيزم الكرنك (1) :

$$G_1 = (m_1 + m_M) \cdot g = (7,56 + 41,826) \cdot 9,81 = 4845 \text{ N}$$

قوة الثقالة وتعطى بالشكل الآتي: $F_1^I = m_1 \cdot 0 = 0$ ، وذلك باعتبار مركز كتلة الكرنك S_1 غير متحرك.

عزم العطالة لقوى العطالة: $M_1^I = I_{\Pi}^1 \cdot \alpha_1 = 0,95748.628,3 = 601,58N \cdot m$ الشعاع الرئيسي F_1^I والعزم الرئيسي M_1^I لقوى العطالة يوجهان عكس اتجاه التسارع الخطي لمركز النقل والتسارع الزاوي، وتحديد الوزن و قوى العطالة وعزمها لذراع التوصيل 2 بالشكل الآتي:

$G_2 = m_2 \cdot g = 2,1.9,81 = 20,6N$, $F_2^I = m_2 \cdot a_{s_2} = 2,1.1550 = 3255N$

$M_2^I = I_{s_2} \cdot \alpha_2 = 0,0245.7061,1 = 173N \cdot m$

المكبس (3):

$$G_3 = m_3 \cdot g = 1,47.9,81 = 14,42N$$
 , $F_3^I = m_3 \cdot a_{s_3} = 1,47.800 = 1176N$

قوى ضغط الغاز على المكبس تملك القيمة الآتية: $F_3 = 8836N$

تحديد الوزن و قوى العطالة وعزمها لذراع التوصيل (4) بالشكل الآتي:

$$m_4 \approx 0, I_{s_4} \approx 0 \Rightarrow G_4 \approx 0 \Rightarrow F_4^I = 0$$

$$G_5 = m_5 \cdot g = 1,47.9,81 = 14,42N$$
 , $F_5^I = m_5 \cdot a_{s_5} = 1,47.800 = 1176N$: (5) المكبس

قوى ضغط الغاز على المكبس تملك القيمة الآتية: $F_5 = 8836N$

قوى المجموعة (4-5)

من توصيل مجموعة اشور (4&5) وانشاءه وفق المقياس $M_\ell = 0,002m / mm$ إذ

تطبق على المكبس (5) القوى الخارجية G_5, F_5 & F_{E5} المؤثرة من الاتصال مع الحد (1) الكرنك والحد الثابت بالتعويض لردود الأفعال غير المعلومة F_{41} (في النقطة C) و F_{50} على المكبس في النقطة D. يكون غير معلوم الشعاع \vec{F}_{41} والتي يعبر عنه كمجموع الأشعة كما يأتي [1,3]:

$$\vec{F}_{41} = \vec{F}_{41}^n + \vec{F}_{41}^\tau \quad (22)$$

إذا أن : \vec{F}_{41}^n - المركبة الناعظمية لرد الفعل ($\vec{F}_{41}^n // CD$).

\vec{F}_{41}^τ - المركبة المماسية لرد الفعل $\vec{F}_{41}^\tau \perp CD$.

$$\sum M_D(F_i)_4 = 0 \quad , F_{41}^\tau \cdot \ell_{CD} = 0$$
 وتحدد وفق العلاقات الآتية:

إذا أن $\ell_{CD} \neq 0$ ، ومن ثم $\vec{F}_{41}^\tau = 0$ ، وبالتالي رد الفعل الكامل $\vec{F}_{41} = \vec{F}_{41}^n$.

غير معلوم رد الفعل ويحدد من معادلة توازن القوى للمجموعة (4,5) كما يأتي :

$$\vec{F}_{41}^n + \vec{F}_{E5} + \vec{G}_5 + \vec{F}_5 + \vec{F}_{50} = \vec{0} \quad (23)$$

المعادلة (23) تحل تخطيطياً يرسم مضلع القوى ونختار مقياس القوى $M_F = 40N / mm$ ومن ثم اطوال القطع تكون مساوية إلى:

$$[1-2] = \frac{F_5^I}{M_F} = \frac{1176}{100} \approx 11,8mm, [2-3] = \frac{G_5}{M_F} = \frac{14,42}{100} \approx 014mm,$$

$$[3-4] = \frac{F_5}{M_F} = \frac{8836}{100} \approx 88,4mm,$$

بحيث يكون: $[1-2] // \vec{F}_5^I, [2-3] // \vec{G}_5, [3-4] // \vec{F}_5$

من المخطط الذي تم إنشاؤه للقوى للمجموع (4-5) نحدد ردود الافعال في الازدواجات كما يأتي:

$$\vec{F}_{41} = \vec{F}_{41}^n = [5-1].M_F = 79.100 = 7900N, \vec{F}_{50} = \vec{F}_{41}^n = [4-5].M_F = 14.100 = 1400N$$

ردود الأفعال الداخلية \vec{F}_{45} في المفصل D من شروط توازن القوى لحد واحد مثلاً الحد 4 نجد:

$$\vec{F}_{41} = \vec{F}_{41}^n = [5-1].M_F = 79.100 = 7900N$$

حساب قوى المجموعة (2-3)

لإنشاء مخطط المجموعة (3,2) بمقياس رسم $M_\ell = 0,002m / mm$ لتمثل جميع القوى

الداخلية المؤثرة على الحدود 2&3 التي تؤثر من الحدود 1&0 يتغير الشعاعين F_{30} & F_4 كما

أنه غير معلوم قيمة واتجاه F_{21} التي تعتبر مساوية إلى المجموع كما يأتي: $\vec{F}_{21} = \vec{F}_{21}^n + \vec{F}_{21}^r$

رد الفعل \vec{F}_{30} توجه عمودية على اتجاه حركة المنزلقة 3 والمركبة المماسية \vec{F}_{21}^r تحدد من

$$\text{المعادلة: } \sum M_B (F_i)_2 = 0 \text{ لأجل الحد 2 يكون: } F_{21}^r \cdot AB - F_2^I \cdot h_2 - \frac{M_2^I}{M_\ell} + G_2 \cdot h_3 = 0$$

إذا أن: AB, h_2, h_3 - قطع تتغير على مخطط المجموعة (3,2) في mm عندئذ:

$$F_{21}^r = \frac{F_2^I \cdot h_2 + \frac{M_2^I}{M_\ell} - G_2 \cdot h_3}{AB} = \frac{3255.73 + \frac{173}{0,002} - 206.83}{131} = 2473,5N$$

المركبة F_{21}^n تعتبر القيمة الكاملة لرد الفعل F_{21} و رد الفعل F_{30} تحدد من مخطط القوى الذي

تم إنشاؤه وفق المعادلة الشعاعية لتوازن المجموعة (3,2)، ومن ثم يكون:

$$\vec{F}_{21}^n + \vec{F}_{21}^r + \vec{F}_2^I + \vec{G}_2 + \vec{G}_3 + \vec{F}_3^I + \vec{F}_{30} = 0 \quad (24)$$

وباعتماد مقياس رسم القوى: $M_F = 100N / mm$ وبالحساب بما يتفق مع القطع المستقيمة

لمخطط القوى نجد :

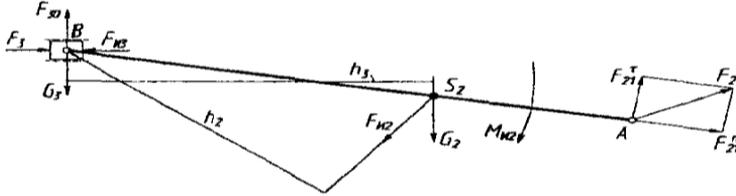
$$[1-2] = \frac{F_5^I}{M_F} = \frac{2473,5}{100} \approx 24,7mm, [2-3] = \frac{F_2^I}{M_F} = \frac{3225}{100} \approx 32,6mm,$$

$$[3-4] = \frac{G_2}{M_F} = \frac{20,6}{100} \approx 0,21mm,$$

$$[4-5] = \frac{G_3}{M_F} = \frac{14,42}{100} \approx 0,1442mm, [5-6] = \frac{F_3^I}{M_F} = \frac{1176}{100} \approx 11,76mm,$$

$$[6-7] = \frac{F_3}{M_F} = \frac{8836}{100} \approx 88,36mm,$$

القطع $[7-8] \perp OB$ & $[1-8] \parallel AB$ تعبر عن ردود الفعل F_{30} & \vec{F}_{21}^n تعتبر غير معلومة حتى الآن ويتوجب حسابها، وننشئ مخطط القوى وفق اشور كما هو مبين على الشكل ومنه تحدد القوى غير المعلومة:



الشكل (16)

$$F_{21}^n = [8-1].M_F = 63,5.100 = 6350N, F_{21} = [8-2].M_F = 68.100 = 6800N$$

$$F_{30} = [7-8].M_F = 8.100 = 800N$$

لأجل تحديد رد الفعل F_{23} في المفصل B ندرس توازن ذراع التوصيل 2:

$$\vec{F}_{21}^n + \vec{F}_{21}^c + \vec{F}_2^I + \vec{G}_2 + \vec{F}_{23} = \vec{0} \quad (3-9)$$

من المعادلة (4-2) وبالأخذ بالحسبان المعادلة (4-8) نجد أنه لأجل تحديد \vec{F}_{23} يكفي رسم مخطط القوى لمجموعة نقاط وصل الحدود 4&8 وبالتالي نجد : $F_{23} = [4-8].M_F = 77.100 = 7700N$

حساب قوى وصلة الخرج

ننشئ وضعيات الميكانيزم من الصنف الأول كما هو مبين في الشكل للنقاط A&C المرفق وفق وجهة مجموعة اشور (2-3)&(4-5) وذلك بوضع قوى رد الفعل الآتية [1,2,5]: $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{21}, \vec{F}_{14} = -\vec{F}_{14}$ من مركز الدوران O نرسم عمود على مناحي الأشعة \vec{F}_{21} & \vec{F}_{14} وبالقياس نجد: $h_1' = 24,5mm, h_1 = 24,9mm$. إضافة لذلك على المرفق تؤثر قوى الثقالة، والعزم الرئيسي M_1^I لقوى العطالة كما أن الميكانيزم ينفصل من الآلية القياسية، و تؤثر

أيضاً على أجزاء السيارة للنقل (نقل الحركة) نستعيض عن هذا العزم في معادلة التوازن بالعزم M_y الذي يحدد من معادلة العزوم بالنسبة للنقطة O كما يأتي [1,2,4,5]:

$$M_y + M_1^I - F_{12} \cdot h_1 \cdot M_\ell - F_{14} \cdot h_1' \cdot M_\ell = 0$$

ومن ثم نجد :

$$M_y = F_{12} \cdot h_1 \cdot M_\ell - M_1^I + F_{14} \cdot h_1' \cdot M_\ell =$$

$$6800 \cdot 24,9 \cdot 0,002 + 7900 \cdot 24,5 \cdot 0,002 - 601,58 = 124,2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

معادلة توازن المرفق تملك الشكل الآتي :

$$\vec{F}_{12} + \vec{F}_{14} + \vec{G}_{11} + \vec{F}_{10} = \vec{0} \quad (3-10)$$

نختار مقياس رسم القوى: $M_F = 100 \text{ N} / \text{mm}$ ، أطوال قطع مخطط قوى المرفق (1) تعطى

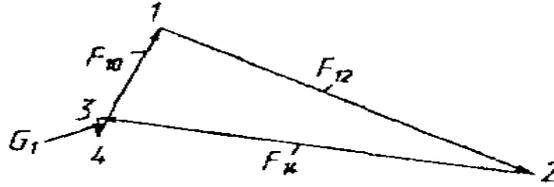
$$[1-2] = \frac{F_{12}}{M_F} = \frac{6800}{100} = 68 \text{ mm}, [2-3] = \frac{F_{14}}{M_F} = \frac{7900}{100} = 79 \text{ mm},$$

$$[3-4] = \frac{G_1}{M_F} = \frac{484}{100} \approx 4,9 \text{ mm},$$

تنشئ مضلع القوى وفق المعادلة (4-10) كما هو مبين في الشكل (17) إذ تغلق القطعة

[4-1] التي تمثل رد الفعل \vec{F}_{10} المؤثرة على المرفق من الحد الثابت ومن ثم تملك القيمة الآتية :

$$F_{10} = [4-1] \cdot M_F = 34 \cdot 100 = 3400 \text{ N}$$



الشكل (17)

التحليل الديناميكي لميكانيزم الكامة

يهدف ميكانيزم الكامة بشكل أساسي إلى تأمين حركة الكامة بشكل ضروري وفقاً للشروط

التكنولوجية لحركة التابع ، و الشكل التالي يبين احتمالات متعددة لميكانيزم آلية آلية التوقيت

وسوف نركز على أهم ما يتوافق مع معطيات بحثنا [7,8,9].

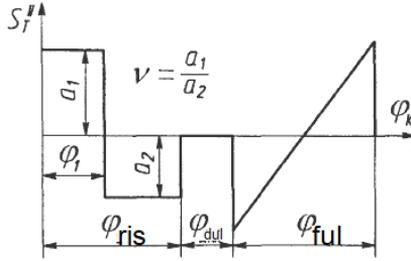
بارامترات الدخول للتحليل

- الرسوم البنوية للميكانيزم مع تبيان طريقة الازدواجات الحركية المغلقة.

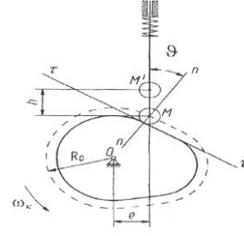
- قانون حركة التابع الذي يعطي مخططه على شكل رسوم وكذلك التسارع كتابع لزاوية دوران الكامرة φ أو معرفته بالتوافق مع الجدول (1) نجد:
- الإزاحة الأعظمية للتابع مستقيمة h أو زاوية التآرجح ψ للخيار الثاني.
- مقدار زاوية الدوران للكامرة في كل شوط :
- φ_r - شوط الصعود ، φ_d - زاوية السكون ، φ_f - شوط الهبوط
- القيمة الأعظمية لزاوية الضغط $\theta_{\max} = [\theta]$ لأجل الخيار الأول والثاني وإذا كانت $\theta_{\max} = [\theta]$ غير معلومة في معطيات المشروع تعتمد $\theta_{\max} = [\theta] = 30^\circ$ في الخيار الأول للتتابع وفي الخيار الثاني للتتابع المتأرجحة.
- كتلة التابع m_T إذا كانت غير معلومة في مشروعنا تعتمد كنسبة من كتلة ذراع التوصيل $m_T = 0,1m_2$
- إذا أن : m_2 - كتلة ذراع التوصيل.
- حل المسألة المطروحة للتحليل تدرس بشكل ميكانيزم الكامرة مع حركة انسحابية للتابع الدحرجي مع ازدواجات مركبة كبيرة ومغلقة بالقوى كما في الشكل (18) بهذه المعطيات لبارامترات الدخل الجدول (2) قانون حركة التابع مبين في الشكل (19).

الجدول (2)

$\omega_k, \frac{rad}{sec}$	$h; m$	$m_T; kg$	$m_T; kg$	زاوية دوران الكامرة			قانون حركة التابع	
				φ_r	φ_D	φ_f	هبوط	صعود
76,4	0,01 1	27	0,23	65	0	65	قطع مكافئ $V=1,5$	مع تسارع ثابت



الشكل (18)



الشكل (19)

5-2- تحديد قانون حركة التابع

قانون حركة التابع يقترح على شكل رسوم للازحة $S(\varphi)$ ، والسرعة والتسارع كتابعين لزاوية الدوران φ للكامة شكل (19) زاوية عمل الكامة تعطى بالشكل الآتي:

$$\varphi_p = \varphi_r + \varphi_D + \varphi_f = 65 + 0 + 65 = 130^\circ$$

تحول هذه الزاوية للراديان نجد :

$$\varphi_p^{rad} = \frac{\pi}{180} \varphi_p = \frac{\pi}{180} 130 = 2,269 rad; \varphi_{ris}^{rad} = \varphi_{ful}^{rad} = \frac{\pi}{180} 65 = 1,1345 rad$$

باعتقاد مقياس لمحور الزاوي يكون : $M_\varphi = 0,015 rad / mm$

عندئذ طول القطعة l لزاوية الدوران للكامة على المحور φ تساوي :

$$l_p = \frac{\varphi_p}{M_\varphi} = \frac{2,263}{0,015} = 150,86 mm; l_{ris} = l_{ful} = \frac{\varphi_{ris}}{M_\varphi} = \frac{1,1345}{0,015} = 75,43 mm; l_D = 0$$

بحساب القيم الأعظمية للسرعة S'_{max} ، وكذلك التسارع S''_{max} وفق المعادلات الواردة بالجدول (3)، وزاوية الرفع للتابع حيث تتم الحركة وفق قطع مكافئ تملك الشكل الآتي :

$$\varphi_1 = \frac{\varphi_{ris}}{1+V} = \frac{1,1345}{1+1,5} = 0,4538; l_{\varphi_1} = \frac{\varphi_1}{M_\varphi} = \frac{0,4538}{0,015} = 30,25 mm$$

$$S'_{ris \max} = \frac{2 \cdot h}{\varphi_{ris}} = \frac{2 \cdot 0,011}{1,1345} = 0,0194 m$$

$$S''_{ris \max} = \frac{2 \cdot h}{\varphi_{ris} \cdot \varphi_1} = \frac{2 \cdot 0,011}{1,1345 \cdot 0,4538} = 0,04273 m \text{ عندما } 0 \leq \varphi \leq \varphi_1 \text{ يكون}$$

$$S''_{ris \max} = \frac{2 \cdot h}{\varphi_{ris} \cdot (\varphi_{ris} - \varphi_1)} = \frac{2 \cdot 0,011}{1,1345 \cdot (1,1345 - 0,4538)} = -0,0284 m \text{ عندما } \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_{ris} \text{ يكون}$$

خلال زاوية الهبوط للتابع الحركة تكون فوق قانون تغير التسارع بانتظام لأجل ذلك نملك:

$$S''_{ful\ max} = -\frac{3h}{2\varphi_{ful}} = -\frac{3.0,011}{1,1345.2} = -0,0145m \quad 'S''_{ful\ max} = \pm \frac{6.h}{\varphi_{ful}^2} = \pm \frac{6.0,011}{1,1345^2} = \pm 0,05128m$$

باعتدال مقياس الرسم على محاور الرسم واحدة لأجل المخططات $S(\varphi)$ & $S'(\varphi)$ نجد:

$$M_{S''} = 0,002 \frac{m}{mm} \quad \text{نجد: } S''(\varphi) \text{ ولأجل المخطط } M_S = M_{S'} = 0,0005 \frac{m}{mm}$$

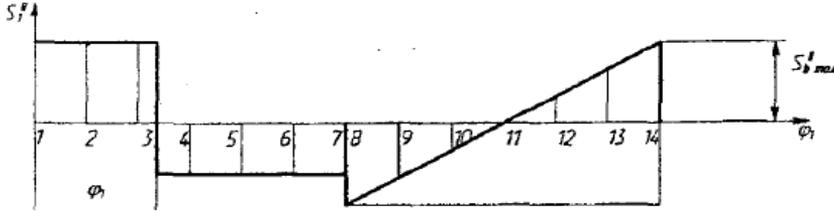
نحسب الإحداثيات الأعظمية للمخططات

$$1- \text{الإزاحة الأعظمية: } y_{S\ max} = \frac{h}{M_S} = \frac{0,011}{0,0005} = 22'$$

$$2- \text{السرعة الأعظمية } y_{S'\ max\ ris} = \frac{S'_{ris\ max}}{M_{S'}} = \frac{0,0194}{0,0005} = 38,8mm$$

$$\text{التسارع: عندما } 0 \leq \varphi \leq \varphi_1 \text{ يكون: } y_{S''\ max} = \frac{S''_{ris\ max}}{M_{S''}} = \frac{0,042731}{0,002} = 21,36mm$$

$$\text{عندما } \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_{ris} \text{ يكون: } y_{S''_{ful\ max}} = \frac{S''_{ful\ max}}{M_{S''}} = \frac{0,0284}{0,002} = \pm 25,24mm$$



مخطط التسارع

الشكل (20)

بحساب القيم S & S' نوردتها بالجدول (2)

الجدول (4)

رقم	8	9	10	11	12	13	1
الوضعية							4
φ_i, rad	1,134	0,945	0,756	0,567	0,378	0,189	0
	5						
S, m	0,011	0,0101	0,0081	0,0054	0,0028	0,0008	0
		8	4	9	4	1	

دراسة انشائية وحركية وديناميكية لبعض ميكانيزمات سيارة سياحية
(آلية التوقيت)

y_s, m	22	20,36	16,28	10,99	5,69	1,62	0
S', m	0	-	-	-	-0,129	-	0
		0,0081	0,0129	0,0145		0,0081	
y_s', mm	0	-16,19	-25,87	-29	-25,87	-16,19	0

النتائج

- 1- تم في هذا البحث وضع تسلسل تنفيذ الحسابات الديناميكية بشكل سلس.
- 2- تم وضع أسس تحديد حجم وابعاد الية التوقيت بشكل واضح ودقيق ومتسلسل.
- 3- توصلنا الى نتيجة توضح توضع المكابس في الأسطوانة انطلاقاً من الدارة الترموديناميكية كتابع بعلاقتها بزواوية دوران المرفق.

المراجع

- 1- نزيه يوسف 2018-2019- نظرية الآلات منشورات جامعة البعث.
- 2- نزيه يوسف المودول الرياضي لتحليل بنية الآليات بمستويات تعقيد وقيم تحركية مختلفة منشور في مجلة جامعة البعث مجلد 38 لعام 2016.
- 3- نزيه يوسف، مروان الحجى استخدام معيار تقيد الحركة لتحليل بنية الآليات المستوية التي تملك درجة طلاقة واحدة وازدواجات من ذات النوع وتطبيق ذلك على آلة مكونة من 14/ حداً منشور في مجلة جامعة البعث مجلد 33 لعام 2011.
- 4- معن حوراني ديناميك الآلات منشورات جامعة دمشق.
- 5- نزيه يوسف 2023-2024- ميكانيك هندسي 2 منشورات جامعة حمص.

- 6-Забара К.Н.и др.2021.Проект по ТММ издели Сибири.
- 7- Курсовое проектирование по теории механизмов и машин /Под общ, ред. Г.Н. Девойно. - Мн.: Выш. шк., 1986. - 285 с.
- 8- Теория механизмов и машин / Под ред. К.В. Фролова. - М.:Высш. шк., 1987. - 496 с.
- 9- Машков, А.А. Теория механизмов и машин: учебное пособие. - Мн.: Выш. школа, 1971. - 1971 с.
- 10- Теория механизмов и машин: методические указания и контр,задания для студентов-заочников инженерно-технических специ-альностей вузов / Н.И. Левитский, Л.П. Солдаткин, В.Д. Плахин, Ю.Я. Гуревич. - М.: Высш. шк., 1989. - 127 с.
- 11- Левитская, О.Н., Левитский, Н.И. Курс теории механизмов имашин.- М.:Высш. шк.,1985. - 280 с.

كشف هجمات حجب الخدمة الموزعة على الشبكات المعرفة برمجياً باستخدام التعلم العميق

م. وسام العلي د. حسين طياوي بحبوح

ملخص

يهدف هذا البحث إلى تطوير منهجية فعّالة لكشف ومنع هجمات حجب الخدمة الموزعة (DDoS) في الشبكات المعرفة برمجياً (SDN) باستخدام تقنيات التعلم العميق. إذ تبدأ الدراسة باستعراض الطرق السابقة المتبعة في كشف هذه الهجمات، وتحليل مدى كفاءتها عند تطبيقها في بيئة SDN. وبناءً على القصور الموجود في الطرق التقليدية، يقترح البحث نموذجاً يعتمد على الشبكات العصبية العميقة، وتحديداً الوحدات التكرارية المبنية (GRU)، حيث تم تدريب النموذج باستخدام قاعدة بيانات CICDDoS2019. وعليه، تم تقييم فعالية الطريقة المقترحة من خلال معايير الدقة، الإحكام، والاسترداد، بالإضافة إلى اختبار النموذج في بيئة محاكاة باستخدام Mininet. وعليه فقد أظهرت النتائج تفوق النموذج المقترح، حيث حقق نسبة كشف وصلت إلى 99% في السيناريوهات القياسية، مع استقرار ملحوظ مقارنة بالطرق التقليدية. وتوصل البحث إلى أن استخدام التعلم العميق يعزز بشكل كبير من أمان واستقرار الشبكات المعرفة برمجياً، موصياً بإجراء مزيد من الدراسات حول الهجمات المعقدة في بيئات الشبكات الواسعة.

الكلمات المفتاحية:

هجمات حجب الخدمة الموزعة، الشبكات المعرفة برمجياً، التعلم العميق، منع هجمات حجب الخدمة، حجب الخدمة.

Detecting DDoS Attacks on Software-Defined Networks Using Deep Learning

Eng. Wesam Alali Dr. Hussein Teiawi Bahbouh

Abstract

This research aims to develop an effective methodology for detecting and mitigating Distributed Denial of Service (DDoS) attacks in Software-Defined Networks (SDN) using deep learning techniques. The study begins by reviewing existing detection methods and analyzing their efficiency within SDN environments. Addressing the limitations of traditional approaches, the paper proposes a model based on Deep Neural Networks, specifically utilizing Gated Recurrent Units (GRU). The model was trained using the CICDDoS2019 dataset. The effectiveness of the proposed method was evaluated using Accuracy, Precision, and Recall metrics, alongside validation in a simulation environment using Mininet. Experimental results demonstrate the superiority of the proposed model, achieving a detection rate of up to 99% in standard scenarios, with notable stability compared to conventional methods. The research concludes that leveraging deep learning significantly enhances the security and stability of SDNs, recommending further investigation into complex attacks within wide network environments. The research concluded that the proposed

method is effective in detecting and preventing distributed denial of service (DDoS) attacks in software-defined networks (SDN). The researcher recommended conducting more studies in this field to support the results of the study.

Keywords:

DDoS attacks, Software-defined networks, Deep learning, DDoS prevention, Denial of service.

1- المقدمة:

شهدت البنية التحتية للشبكات خلال العقد الأخير توسعاً سريعاً في عدد الأجهزة المتصلة، مما زاد من التعقيد الإداري وخلق عقبات أمام الابتكارات المستقبلية. [1] وفي ظل هذه التحديات، ظهرت الشبكات المعرفة بالبرمجيات (SDN) كنموذج مبتكر يفصل بين مستوى التحكم (Control Plane) ومستوى البيانات (Data Plane)، مما يتيح إدارة مركزية ومرنة للشبكة. [2]

ومع ذلك، وبالرغم من الميزات العديدة التي توفرها SDN، فإن مركزية التحكم تجعلها هدفاً جذاباً للهجمات السيبرانية، وأخطرها هجمات حجب الخدمة الموزعة (DDoS). تهدف هذه الهجمات إلى استنزاف موارد وحدة التحكم (Controller) من خلال إغراقها بطلبات وهمية، مما يؤدي إلى شلل كامل في الشبكة. [3]

تتمثل مشكلة البحث في أن أنظمة الكشف التقليدية (IDS) غالباً ما تعتمد على قواعد ثابتة [4] أو تحليل إحصائي بسيط [5]، مما يجعلها غير قادرة على مواكبة تطور الهجمات الحديثة أو التعامل مع الأحجام الهائلة للبيانات في شبكات SDN دون التأثير على الأداء. [6] ومن هنا تتبع الحاجة الملحة إلى استخدام تقنيات أكثر ذكاءً وتكيفاً مثل التعلم العميق (Deep Learning)، الذي يمتلك القدرة على استخراج الأنماط المعقدة من حركة المرور الشبكية والتمييز بين السلوك الطبيعي والهجومى بدقة عالية واستجابة سريعة، وهو ما يسعى هذا البحث لتحقيقه.

2- أهداف البحث وأهميته:

يهدف هذا البحث إلى معالجة واحدة من أبرز التحديات الأمنية التي تواجه الشبكات المعرفية برمجياً، وهي هجمات حجب الخدمة الموزعة (DDoS)، وذلك من خلال توظيف تقنية التعلم العميق. تعتبر الشبكات المعرفية برمجياً من الحلول المبتكرة التي تسمح بإدارة وتحكم أكثر كفاءة بالشبكات، ولكن هذه الميزة تجعلها أيضاً عرضة للهجمات الإلكترونية، وبخاصة الهجمات التي تسعى لإحداث شلل في الخدمة عبر استغلال موارد الشبكة بشكل مفرط. هجمات حجب الخدمة الموزعة تشكل تهديداً حقيقياً لاستمرارية عمل الشبكات، حيث يمكن لمهاجمين متعددين إرسال طلبات مكثفة ومفرطة في وقت واحد، مما يؤدي إلى استنفاد موارد الشبكة وتعطيلها عن العمل بشكل فعال.

يسعى هذا البحث إلى تطوير نموذج قادر على الكشف عن مثل هذه الهجمات بسرعة ودقة من خلال الاستفادة من خوارزميات التعلم العميق. يتمثل الهدف الرئيسي في استخدام شبكة عصبية عميقة تكون قادرة على التمييز بين الحركة الشبكية الطبيعية وتلك التي ترتبط بهجمات حجب الخدمة، مما يتيح القدرة على اتخاذ إجراءات وقائية واستباقية

لحماية الشبكة من التعطيل. تعتمد منهجية البحث على تدريب الشبكة العصبية العميقة باستخدام مجموعات بيانات واسعة تحتوي على سجلات للهجمات الشبكية، بالإضافة إلى حركات شبكة طبيعية، حيث يتوقع أن يسهم هذا التدريب في تطوير نموذج ذكي يتسم بقدرة عالية على التصنيف والتعرف على الهجمات في وقت مبكر.

تتجلى أهمية هذا البحث في عدة جوانب؛ أولاً، يعتبر هذا النموذج أداة متقدمة في تعزيز أمن الشبكات المعرفية برمجياً، والتي تمثل بنية تحتية أساسية للعديد من التطبيقات الحيوية، بما فيها الخدمات السحابية، وإنترنت الأشياء، وأنظمة المدن الذكية. ثانياً، يسهم البحث في توفير نظام وقائي يستند إلى خوارزميات التعلم العميق، وهو ما يعزز من كفاءة أنظمة الكشف التقليدية التي تعتمد غالباً على التحليل اليدوي أو قواعد بيانات سابقة قد تكون غير قادرة على التكيف مع طبيعة الهجمات المتطورة. ثالثاً، من خلال التدريب على مجموعات بيانات شاملة ومتنوعة، يصبح هذا النموذج مرناً وقادراً على التعرف على أنواع جديدة من الهجمات التي قد لا تكون معروفة سابقاً، مما يعزز من قدرته على التكيف مع التحديات المتغيرة التي تواجه الأمن السيبراني.

3- الإطار النظري:

3-1 الشبكات المعرفة برمجياً (SDN): تعتبر السمة الأكثر تميزاً في بنية SDN مقارنةً بالهياكل التقليدية هي فصل الطبقة المنطقية للتحكم عن طبقة البيانات. [2] يتحكم المستوى المركزي في عدة أجهزة شبكية موزعة، مما يوفر رؤية شاملة للشبكة. وتتألف هذه البنية من ثلاث طبقات: التطبيقات، التحكم، والبيانات، وتعتمد بشكل رئيسي على بروتوكول OpenFlow للتواصل بين وحدة التحكم والمحولات [3].

2-3 مفاهيم التعلم العميق المستخدمة: يعتمد البحث على عدة تقنيات متقدمة لتحسين أداء النموذج:

- **Dropout:**

هو تقنية تُستخدم في الشبكات العصبية لتقليل مشكلة الإفراط في التكيف (overfitting). يتم ذلك من خلال إيقاف عمل بعض الوحدات العصبية بشكل عشوائي أثناء التدريب. في العرض، تم استخدام Dropout بنسبة 0.2 و 0.3 في طبقات مختلفة، مما يعني أن هناك فرصة 20% و 30% لتعطيل بعض الوحدات العصبية في هذه الطبقات خلال كل خطوة تدريبية. الفكرة هي منع النموذج من الاعتماد الشديد على وحدات عصبية محددة، مما يؤدي إلى شبكة أكثر عمومية وقادرة على التكيف مع بيانات جديدة.

- **Batch Normalization:**

هي تقنية تُستخدم لتسريع عملية التدريب وزيادة استقرار الشبكة العصبية عن طريق جعل التوزيع الخاص بالمدخلات إلى كل طبقة أكثر استقراراً. تقوم Batch Normalization بتطبيع المدخلات بحيث يكون متوسطها صفراً وانحرافها المعياري واحداً قبل تمريرها إلى الطبقة التالية، مما يساعد في تحسين عملية التعلم.

- **Adam Optimizer:**

هو خوارزمية تحسين تُستخدم لتحديث الأوزان في الشبكات العصبية خلال التدريب. تعتمد على كل من معدلات التعلم التكيفية والزخم لتسريع التقارب وتقليل الخطأ. في العمل، تم استخدام

Adam بمعدل تعلم قدره 0.00004 مما يعني أن التحديثات على الأوزان تتم بحذر، مما يزيد من دقة التدريب مع مرور الوقت.

• محاكي Mininet

محاكي Mininet هو أداة برمجية مفتوحة المصدر تُستخدم لإنشاء شبكات افتراضية تحاكي الشبكات الحقيقية. صُمم خصيصاً لتوفير بيئة اختبار مثالية لتقنيات الشبكات الحديثة، بما في ذلك الشبكات المعرفة برمجياً (SDN) والبروتوكولات الجديدة التي تحتاج إلى اختبار وتقييم قبل نشرها في بيئات حقيقية. يُستخدم Mininet بشكل واسع في الأوساط الأكاديمية والصناعية لاختبار أداء وتصميم الشبكات وتطوير البروتوكولات المختلفة.

• قاعدة البيانات وتعويض عدم التوازن باستخدام SMOTE

تم استخدام قاعدة بيانات CICDDoS 2019 التي تحتوي على بيانات طبيعية وبيانات لهجمات DDoS. هذه البيانات غير متوازنة حيث أن الهجمات نادرة مقارنة بالبيانات العادية المؤدة كاستخدام طبيعي. لتعويض هذا التفاوت في الفئات، تم استخدام خوارزمية SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique)، التي تُنشئ عينات اصطناعية من الفئة الأقلية (الهجمات) بناءً على المسافة الإقليدية بين نقاط البيانات. المعادلة الرياضية لـ SMOTE هي:

$$(minorityx - neighborx) \times \lambda + minorityx = newx$$

- بنية الشبكة العصبية واستخدام **L2 Regularization**
الشبكة العصبية المستخدمة تعتمد على عدة طبقات تشمل طبقات من الشبكة العصبونية الالتفافية ذات البوابة -والتي تستخدم عادةً في العمليات التي تتطلب تنالي مستمر - (GRU (Gated Recurrent Units و (Dense كثيفة)، وتم تطبيق Dropout و Batch Normalization لتحسين الأداء. تمت إضافة L2 Regularization لتجنب مشكلة الإفراط في التكيّف. يتمثل L2 Regularization في إضافة مجموع مربعات الأوزان إلى دالة الخسارة، والمعادلة الرياضية هي:

$$L_{total} = L_{original} + \lambda \sum w^2$$

4- مواد البحث:

البرمجيات :
-لغة البرمجة بايثون Python الإصدار 3.9. (مستخدمة على نطاق واسع في تطبيقات الذكاء الاصطناعي) [python Docs]

-المكتبة البرمجية تينسورفلو TensorFlow الإصدار [6].2.7

-المكتبة البرمجية كيراس Keras الإصدار [6].2.7.0

-المكتبة البرمجية بانداس Pandas الإصدار [4].1.3.5

العتاديات:

بيئة المخبر الموفرة من غوغل Colab

ذاكرة النفاذ العشوائي RAM المثبتة: 13GB RAM

معالجة بيانات قاعدة البيانات:

-تقسيم مجموعة البيانات إلى أجزاء أصغر.

-معالجة حالات الإدخال الخاطئة وحذفها.

-معالجة قيم الإدخال الأوسع من مجال تخزين القيم العددية.

-معالجة كل القيم لتصبح في المجال من 0 وحتى 1 (يشمل ذلك منفذ الهجوم وعنوان الجهاز المهاجم وهو ما كان يتم تجاهلها في الدراسات السابقة المعتمدة على خوارزميات التعلم العميق.

-اعتماد قيمة I لاعتبار الجهاز كمهاجم و 0 لاعتباره مستخدم طبيعي.

مقاييس الأداء:

الدقة Accuracy: هي مقياس يمثل نسبة التوقعات الصحيحة إلى إجمالي التوقعات .

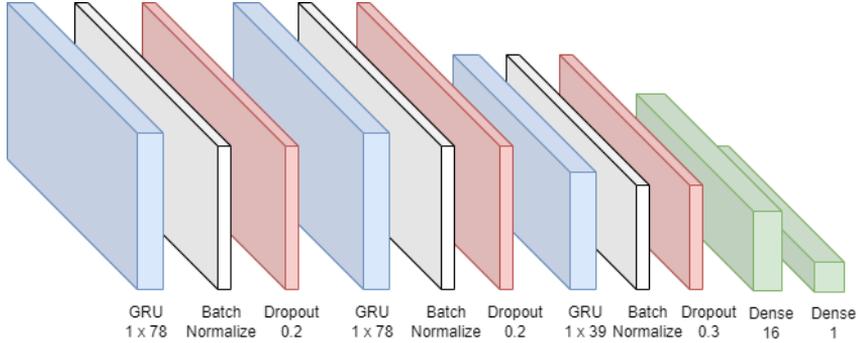
الإحكام (Precision): نسبة التوقعات الإيجابية الصحيحة إلى جميع التوقعات الإيجابية. يُستخدم لقياس مدى دقة النموذج في تحديد الفئات الإيجابية

الاسترجاع أو الحساسية (Recall): يُشير إلى نسبة التوقعات الإيجابية الصحيحة إلى جميع الفئات الإيجابية الحقيقية. يُستخدم لقياس قدرة النموذج على استرجاع الفئات الإيجابية.

مستوى F1 (F1 Score): هي مقياس يجمع بين الإحكام والاسترجاع في قيمة واحدة. تُستخدم لتوفير توازن بينهما، خاصة عندما تكون البيانات غير متوازنة.

5- النتائج والمناقشة:

المخطط البنوي للشبكة:



الشكل (1) المخطط الصندوقي في الصورة يمثل بنية نموذج شبكة عصبية يعتمد على وحدة الـ GRU (Gated Recurrent Unit)، ويحتوي على طبقات متعددة تساعد في التعامل مع البيانات التسلسلية (مثل النصوص، وسلاسل البيانات الزمنية (لتحليلها أو التنبؤ بالأنماط).

6- التفاصيل حول بنية النموذج:

1. مبررات اختيار نموذج GRU : تم اختيار الوحدات التكرارية المبوبة (GRU) بدلاً من الذاكرة طويلة المدى (LSTM) أو الشبكات الالتفافية (CNN) لعدة أسباب جوهرية. على الرغم من أن LSTM فعالة في التعامل مع التسلسلات الزمنية، إلا أن GRU تتميز ببنية أبسط (بوابات أقل)، مما يجعلها أسرع في التدريب وأقل استهلاكاً للموارد الحسابية، وهو عامل حاسم في بيئات SDN التي تتطلب كشافاً في الوقت الحقيقي (Real-time detection) وتأخيراً (Latency) منخفضاً.

2. طبقات GRU:

○ هناك طبقتان من وحدات GRU، كل منهما تحتوي على 78 و 39 وحدة (nodes) على التوالي. وحدات GRU تُستخدم كطبقات متكررة في الشبكات العصبية لتحليل البيانات الزمنية

- أو المتتابعة. تم تصميم هذه الوحدات خصيصاً للحفاظ على المعلومات في الوقت الذي تتقدم فيه عبر التسلسل، مما يجعلها مفيدة للمهام التي تتطلب تذكر السياق.
- الطبقة الأولى تحتوي على شكل (1 × 78) من الوحدات، والطبقة الثانية (1 × 39)، ما يشير إلى عدد الوحدات في كل طبقة.

3. التطبيع بالدفعات (Batch Normalization):

- بين طبقات GRU، توجد طبقات لتطبيع الدفعات. تطبيع الدفعات يُستخدم لتسريع عملية التدريب وجعل النموذج أكثر استقراراً، حيث يقوم بتطبيع مدخلات الطبقة القادمة على أساس القيم المتوسطة والانحراف المعياري لكل دفعة بيانات. هذا يساعد في تجنب مشاكل التشبع وتسريع عملية الانتشار الخلفي.

4. الانسحاب (Dropout):

- هناك طبقات انسحاب (Dropout) تم تطبيقها بعد كل طبقة تطبيع. النسبة المستخدمة هي 0.2 و 0.3، مما يعني أن النموذج سيقوم بتعطيل 20% و 30% من الوحدات في كل دفعة أثناء التدريب بشكل عشوائي لتجنب فرط التكيف (overfitting)، بحيث يعتمد النموذج على مجموعة متنوعة من الوحدات ولا يتوقف على وحدات محددة.

5. الطبقات الكثيفة (Dense Layers):

- بعد طبقات GRU والتطبيع والانسحاب، تأتي طبقتان كثيفتان. الطبقة الأولى تحتوي على 16 وحدة، والأخيرة تحتوي على وحدة واحدة فقط. تُستخدم الطبقات الكثيفة لتجميع المعلومات من الطبقات السابقة وتوليد التنبؤ النهائي. في هذه الحالة، يبدو أن الطبقة النهائية تُستخدم للحصول على مخرج نهائي، وهو ناتج رقمي قد يكون له علاقة بالتنبؤات أو التصنيفات المطلوبة.

7- تفسير العمل العام للنموذج:

هذا النموذج مصمم للتعامل مع البيانات المتتابعة، حيث تقوم طبقات GRU بمعالجة التسلسل واستخراج الميزات الزمنية. يتم تطبيع البيانات عند كل طبقة، وتطبيق الانسحاب لتجنب فرط التكيف. في النهاية، يتم تمرير النتائج إلى الطبقات الكثيفة لتجميع الميزات المستخرجة والحصول على المخرج النهائي للنموذج.

متوسطات المحاكاة:

تم تحديد قيم المتوسطات بناءً على سلسلة من التجارب للوصول إلى الأداء الأمثل:

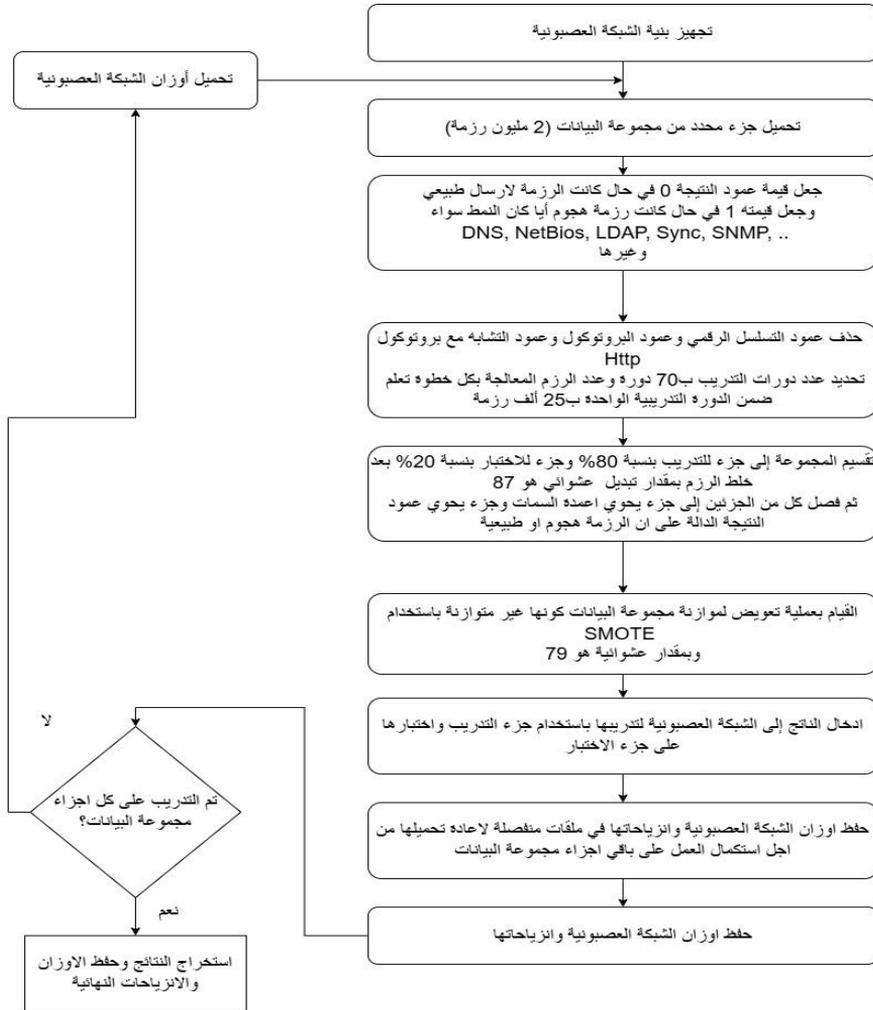
معدل التعلم (0.00004): تم اختياره بعد تجربة قيم أكبر (مثل 0.001) أدت إلى تذبذب النتائج، وقيم أصغر أدت إلى بطء شديد في التقارب. هذه القيمة وفرت التوازن الأفضل بين السرعة والدقة.

نسب Dropout (0.2 و 0.3): تم اعتماد هذه النسب المتفاوتة في الطبقات المختلفة لمنع "الإفراط في التكيف" دون فقدان الكثير من المعلومات الهامة، حيث أثبتت التجارب أن زيادة النسبة عن 0.5 تؤدي إلى انخفاض دقة النموذج (Underfitting).

ملاحظات	القيمة والواحدة	الموسط
تتجاوز قيم المجموعة كاملة 6 مليون رزمة	2 مليون رزمة	المجموعة الجزئية
	70 دورة	عدد الدورات التدريبية
	0.00004	معدل التعلم
	0.022	قيمة المنظم (regularizer) في كل طبقة
	79	قيمة عشوائية خوارزمية SMOTE

الجدول (1)

كشف هجمات حجب الخدمة الموزعة على الشبكات المعرفة برمجياً باستخدام التعلم العميق



الشكل (2)

المخطط التدفقي يمثل عملية إعداد بيانات التدريب وتطبيقها على نموذج شبكي عصبي للتعرف على هجمات حجب الخدمة الموزعة (DDoS) ضمن الشبكات المعرفية برمجياً (SDN) باستخدام التعلم العميق. سأقوم بتوضيح خطوات المعالجة المشار إليها في المخطط كالتالي:

(1) تجهيز بنية الشبكة العصبية:

أول خطوة هي إعداد البنية الأساسية للنموذج الشبكي العصبي الذي سيستخدم لتحليل البيانات والكشف عن الهجمات.

(2) تحميل جزء محدد من مجموعة البيانات:

يتم هنا تحميل عينة من البيانات لتدريب الشبكة. توضح الصورة أن حجم العينة هو 2مليون حزمة بيانات (رزمة)؛ هذا الحجم الكبير من البيانات يتيح تدريب النموذج بشكل أفضل ليتمكن من التعرف على الأنماط المختلفة.

(3) تحديد قيم العمود المستهدف للتصنيف:

في هذه الخطوة، يتم تخصيص عمود للتصنيف، بحيث تُعطى قيمة "0" للزرز التي تمثل حركة مرور طبيعية، وتُعطى قيمة "1" للزرز التي تمثل هجمات، مثل البروتوكولات DNS ، NetBios ، LDAP ، Sync ، و SNMP هذه العملية مهمة لتصنيف البيانات وتحديد ماهية كل رزمة عادية أو هجوم.

(4) إزالة الأعمدة غير الضرورية:

هنا يتم حذف الأعمدة التي لا تنفيذ في عملية التعلم، مثل عمود التسلسل الرقمي والبروتوكول وعمود التشابه مع بروتوكول HTTP هذه الخطوة تهدف إلى تنظيف البيانات من المتغيرات التي قد تؤدي إلى إبطاء النموذج أو زيادة التعقيد دون فائدة كبيرة.

(5) تحديد دورات التدريب وعدد الرزم:

يتم تحديد عدد دورات التدريب ليكون 70 دورة وعدد الرزم في كل خطوة تعلم داخل الدورة التدريبية يكون 5 آلاف رزمة. هذه الإعدادات تساعد في تنظيم عملية التدريب وتحقيق توازن بين الدقة وسرعة التعلم.

(6) تقسيم مجموعة البيانات إلى تدريب واختبار:

تُقسم البيانات بنسبة 80% للتدريب و 20% للاختبار. يتم تقسيم البيانات لضمان أن النموذج يتم اختباره على بيانات لم يسبق له رؤيتها أثناء التدريب، مما يساعد على تقييم أدائه.

يتم اختيار 87 جزءاً عشوائياً من مجموعة الرزم للهجوم والمرور الطبيعي، ثم يُعاد دمج هذه الأجزاء مع بعضها لتكوين مجموعة البيانات النهائية المستخدمة في التدريب.

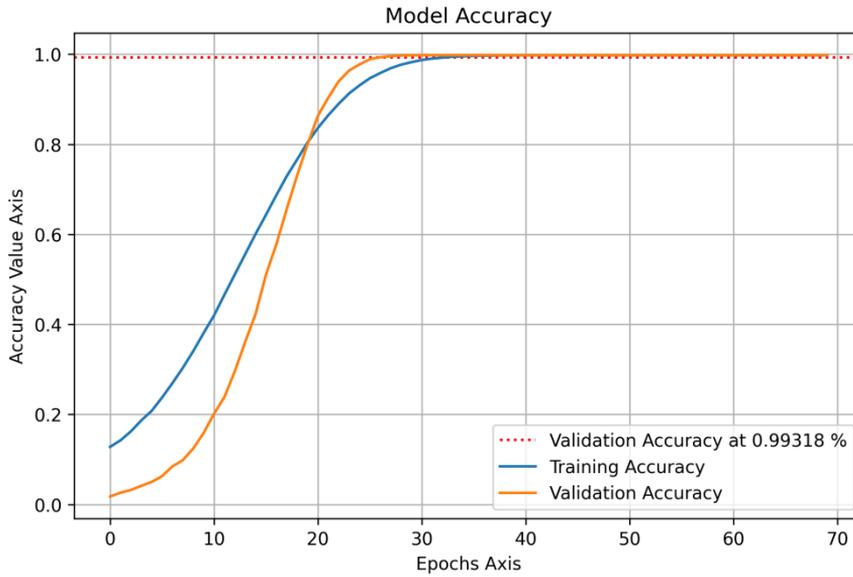
هذه العملية تساعد في تحسين دقة النموذج الشبكي العصبي في الكشف عن هجمات حجب الخدمة (DDoS) في الشبكات المعرفة برمجياً، حيث تتضمن مراحل متعددة لتنظيف البيانات، واختيار الأعمدة المهمة، وتحديد إعدادات التدريب المناسبة.

(7) التعويض وتجهيز البيانات :

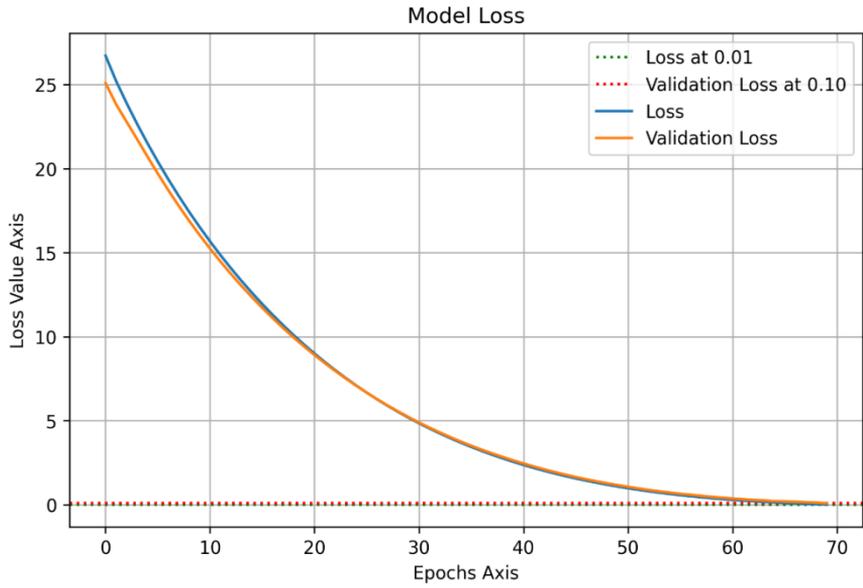
تم خلط مجموعة نهائية من الهجمات المتنوعة في مجموعة البيانات للاختبار عليها.

تم تعويض عدم توازن مجموعة البيانات باستخدام خوارزمية SMOTE.

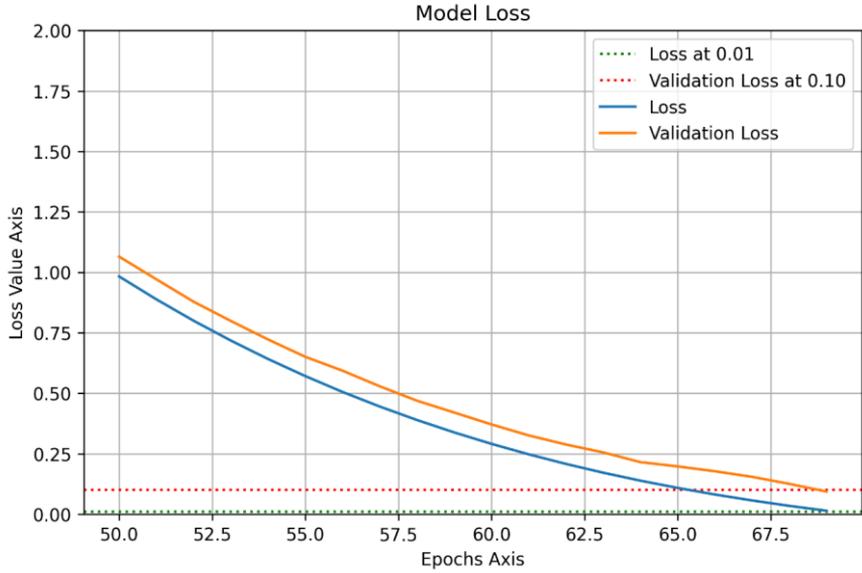
8- نتائج التدريب والاختبار :



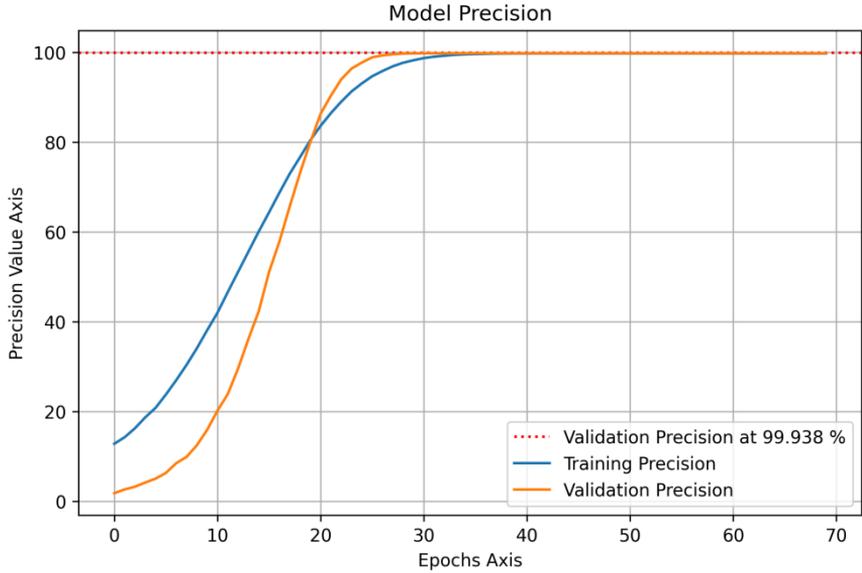
الشكل (3)



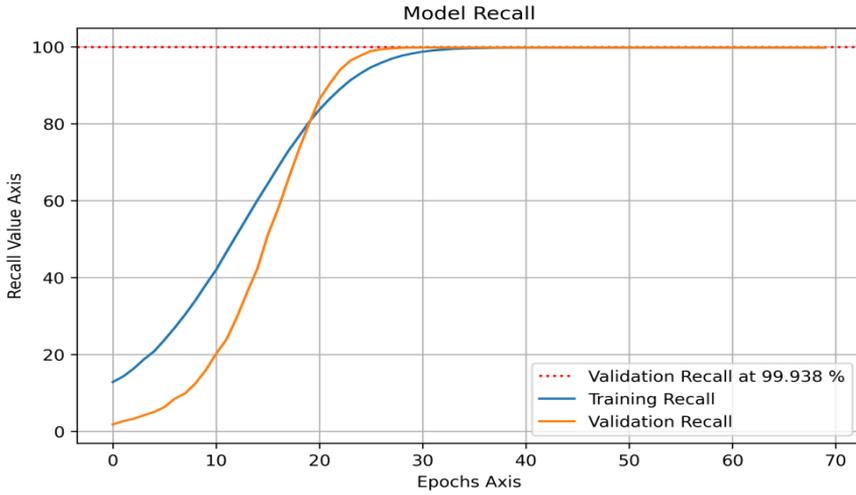
الشكل (4)



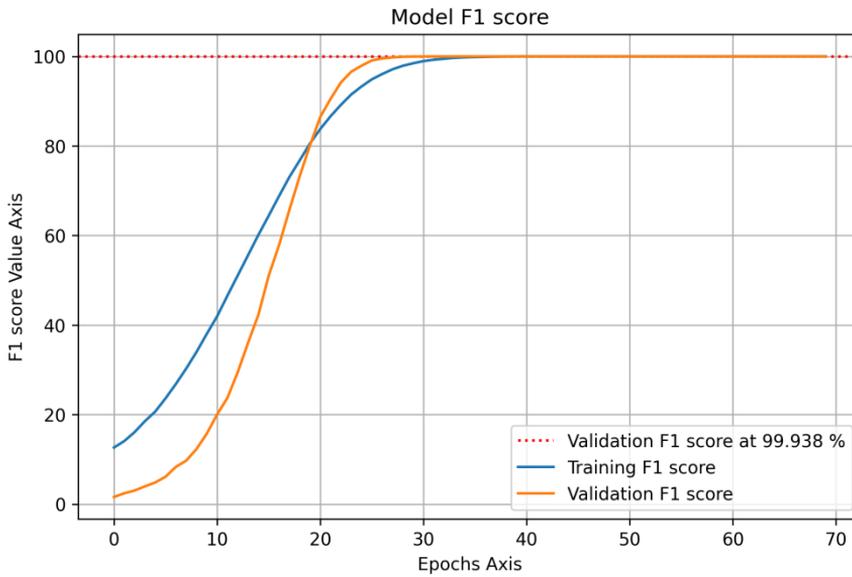
الشكل (5)



الشكل (6)



الشكل (7)

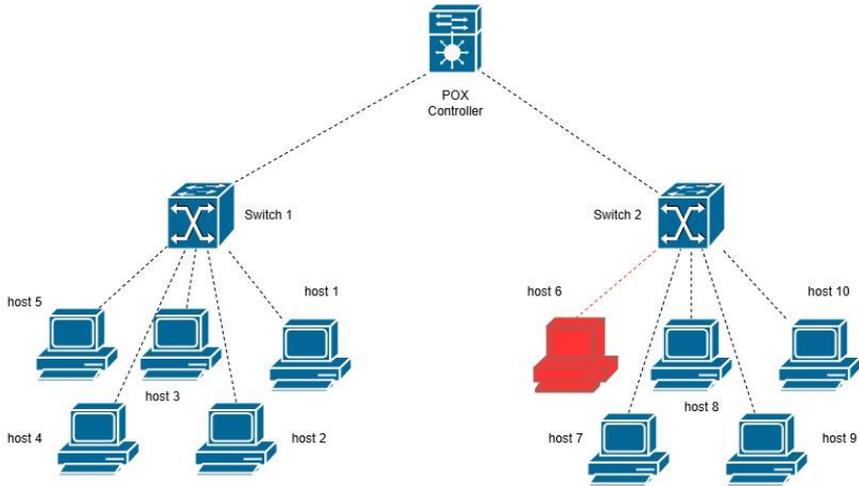


الشكل (8)

إن نتائج تدريب واختبار النموذج المقترح السابقة الذكر تظهر زيادة في عدد دورات التدريب ونلاحظ ارتفاع معدل الكشف في الاختبار عنه في التدريب لبعض المراحل.

تم بعدها بناء شبكة معرفة برمجياً محاكاة في بيئة برنامج mininet لاختبار أداء النموذج فيها في حالة الهجوم وقمنا بزيادة عدد الاجهزة في الشبكة لملاحظة التغييرات التي تحصل عند ارتفاع العدد في حالة الهجوم .تم الاختبار على شبكة تحوي 10 اجهزة ومن ثم على شبكة تحوي 100 جهاز ومن ثم على شبكة تحوي 1000 جهاز .

يبين الشكل التالي بنية الشبكة في حالة ال 10 اجهزة:



الشكل (9)

يمكن تلخيص النتائج التي تم الوصول إليها من عملية الاختبار في بيئة المحاكاة في الجدول التالي:

ملاحظات	حالة 1000 جهاز	حالة 100 جهاز	حالة 10 اجهزة	
أداء مستقر	95%	99%	99%	نسبة الكشف
بداية ارتفاع استهلاك الموارد	92%	75%	40% بدون النموذج - 60% مع النموذج	استهلاك المعالج
انخفاض في الكشف بسبب اختناق الموارد	95%	80%	70%	استهلاك ذاكرة الوصول العشوائي

الجدول (2)

نلاحظ انخفاض نسبة الكشف إلى 95% عند زيادة عدد الأجهزة إلى 1000. يعزى هذا الانخفاض بشكل رئيسي إلى:

- **اختناق الموارد (Resource Bottleneck):** وصول استهلاك المعالج إلى 92% والذاكرة إلى 95% يعني أن وحدة التحكم (Controller) أصبحت مشبعة، مما يؤدي إلى تأخير في معالجة الرزم (Packet Processing Latency) أو حتى إسقاط بعضها قبل وصولها لنموذج الكشف.

- تأثير الضوضاء (Noise): زيادة عدد الأجهزة تزيد من تعقيد الحركة الشبكية وتداخلها، مما يرفع نسبة "الضوضاء" في البيانات المدخلة للنموذج.
- على الرغم من التركيز على دقة الكشف، إلا أن القفزة في استهلاك الموارد (من 60% إلى 92%) تشير ضمناً إلى زيادة في زمن الاستجابة (Latency) للمعالجة. في حالة 1000 جهاز، قد يؤثر التأخير الزمني سلباً على قدرة النظام على منع الهجوم في اللحظات الأولى، وهو ما يفسر جزئياً انخفاض نسبة الكشف.
- يجب الإشارة إلى أن هذا البحث ركز على دقة الكشف (Accuracy) ومقاييس التصنيف (Precision, Recall) ولم يتم بقياس زمن الاستجابة (Latency)، وهو عامل حاسم في أنظمة الكشف الفوري. ويُعد هذا قصوراً سيتم معالجته في التوصيات.
- بمقارنة النموذج الحالي مع دراسات سابقة (مثل Ali et al [1] التي استخدمت طرق تقليدية وحقت دقة 88%، و Elsayed et al [10] باستخدام CNN بدقة 96%)، يتفوق النموذج الحالي في البيئات الصغيرة والمتوسطة (99%) بفضل استخدام GRU الخفيفة، بينما يبرز التحدي المشترك مع الدراسات الأخرى في الحفاظ على الأداء عند التوسع الكبير (Scalability).

9- الاستنتاجات والتوصيات:

النتائج:

- تعطي النتائج استدلالاً على تحسن مستوى الكشف ولكن بعدد مرات تدريب مرتفع نسبياً (70) دورة تدريبية

- يعزى ذلك الى ارتفاع مستوى العشوائية والتبديل المستعمل وعملية تعويض حالة عدم التوازن في مجموعة البيانات.
- ان اعتماد قيمة مرتفعة نسبياً للمنظم (regularizer) تجعل الشبكة أفضل باتجاه عدم حدوث حالة الافراط في التجهيز (overfitting) وهو ما ساهم في زيادة في عدد الدورات التي تحتاجها لتصل الى مستوى دقة مرتفع.
- نلاحظ في بعض دورات التدريب والاختبار تكون نسبة الكشف في الاختبار اعلى من التدريب وهذا بسبب القيمة المرتفعة للمنظم وكذلك آلية الحساب وهي نسبة الكشف سواء من جزء التدريب او الاختبار كما أن بيانات الهجوم في حالة الاختبار لم تتعرض لأي عملية تعويض على عكس بيانات التدريب وهو ما يضيف ضجيجاً لبيانات التدريب.
- عند الاختبار في بيئة المحاكاة نلاحظ ارتفاع استهلاك كل من قدرة المعالجة للمعالج وسعة ذاكرة الوصول العشوائي في المتحكم حتى تصل في حالة 1000 جهاز إلى 92% و 95% على التوالي وهي قيم مرتفعة.
- نلاحظ انخفاض نسبي بمعدل الكشف في حالة 1000 جهاز وهو ما ينذر أن الزيادة اكثر ستكون ذات أثر سلبي على معدل الكشف.

التوصيات:

بناءً على الاستنتاجات السابقة، يوصي البحث بما يلي:

- 1- يوصى بتطوير نماذج تجمع بين تقنيات متعددة من التعلم العميق مثل الشبكات العصبية الالتفافية والتكرارية لتحسين الكشف عن الأنماط الأكثر تعقيداً في البيانات.
- 2- يوصى بإجراء مزيد من الأبحاث لتطوير استراتيجيات جديدة لكشف هجمات DDoS التي تستخدم تقنيات متقدمة مثل هجمات الذكاء الاصطناعي المضادة (Adversarial AI Attacks)، لضمان استدامة فعالية النظام في مواجهة التهديدات المستقبلية.

3- يوصى بقياس وتحسين زمن استجابة النموذج، كونه عاملاً حاسماً لا يقل أهمية عن دقة الكشف، خاصة في بيئات SDN التي تتطلب استجابة سريعة.

10- المراجع:

[1] Ali et al. (2020). Detecting DDoS Attack on SDN Due to Vulnerabilities in OpenFlow, Computer Science, arXiv: 1912.12221v4.

[2] Al-Amiedy, T.A.; Anbar, M.; Belaton, B.; Bahashwan, A.A.; Hasbullah, I.H.; Aladaileh, M.A.; Mukhaini, G.A. A systematic literature review on attacks defense mechanisms in RPL-based 6LoWPAN of Internet of Things. Internet Things 2023, 22, 100741.

[3] Scott-Hayward, S.; Natarajan, S.; Sezer, S. A Survey of Security in Software Defined Networks. IEEE Commun. Surv. Tutor. 2016, 18, 623–654.

[4] Ali et al. (2023). Machine Learning Techniques to Detect a DDoS Attack in SDN:A Systematic Review, Appl. Sci. 2023, 13, 3183. <https://doi.org/10.3390/app13053183>

[5] Mittal et al. (2023). DDoS-AT-2022: a distributed denial of service attack dataset for evaluating DDoS defense system, Proc.Indian Natl. Sci. Acad. 89, 306–324 (2023). <https://doi.org/10.1007/s43538-023-00159-9>

[6] Kanakam et al. (2022). DDOSDET: AN APPROACH TO DETECT DDOS ATTACKS USING NEURAL NETWORKS, arXiv:2201.09514v1.

- [7] Narayan et al. (2024). A Collaborative Approach to Detecting DDoS Attacks in SDN Using Entropy and Deep Learning, Journal of Telecommunications and Information Technology.
- [8] Alfatemi et al. (2024). Advancing DDoS Attack Detection: A Synergistic Approach Using Deep Residual Neural Networks and Synthetic Oversampling, arXiv:2401.03116v1.
- [9] Bahashwan, A., Anbar, M., Manickam, S., Alamiedy, T., Aladaileh, M., & Hasbullah, I. (2023). A Systematic Literature Review on Machine Learning and Deep Learning Approaches for Detecting DDoS Attacks in Software-Defined Networking. Sensors (Basel, Switzerland), 23. <https://doi.org/10.3390/s23094441>.
- [10] Elsayed et al. (2020). DDoSNet: A Deep-Learning Model for Detecting Network Attacks, arXiv:2006.13981v1.
- [11] Roshan et al. (2024). Black-box Adversarial Transferability: An Empirical Study in Cybersecurity Perspective, Computer & Security Volume 141.
- [12] Safaa Alali, Abdulkarim Assalem (2023). Simulation and edge computing structure in 5G, Albaath Journal volume 45, No 18.
- [13] Reem Ibrahim (2024). Comparison of the accuracy of detecting security breaches on the NSL-KDD and UNSWNB15 datasets using artificial intelligence algorithms, Albaath Journal volume 46, No 10.

تخمين قناة الحزمة الفراغية باستخدام طريقة الاتجاه المتناوب**للمضاعفات ADMM**

م. شمعون سعيد د. عبد الكريم السالم

ملخص

يبقى تخمين القناة الدقيق في أنظمة الاتصال المكثفة المليمترية تحدياً بسبب ضجيج التداخل العالي ومحدودية الاشارات الدليلية في بيئات الحزمة الفراغية المتناثرة. تسمح الطبيعة المتناثرة لقنوات الحزمة الفراغية في الأنظمة المدعومة بمصفوفة هوائي العدسة إلى صياغة تخمين القناة كمسألة استرجاع إشارة متناثرة. يقترح هذا البحث نهجاً لحل مسألة تخمين قناة الحزمة الفراغية بالاعتماد على طريقة الاتجاه المتناوب للمضاعفات ADMM التي تعالج هذا التحدي من خلال إطار التحسين القائم على مضاعفات لاغرانج، مع تنظيم التناثر المتحكم به تبعاً لمستوى الضجيج. تم تقييم أداء الطريقة المقترحة مقارنة بالخوارزميات المعروفة بما في ذلك تمرير الرسائل التقريبي AMP وملاحقة التوافق المتعامد OMP وكشف العناصر الأقوى SD باستخدام نموذجي قناة Saleh – Valenzuela و DEEP – MIMO لتشكيلات المصفوفة الخطية المنتظمة ULA والمصفوفة المستوية المنتظمة UPA. تُظهر نتائج محاكاة الفعالية الطيفية والفعالية الطاقية والحد الأدنى المعياري لمتوسط الخطأ التربيعي NMSE أن طريقة ADMM تحقق أداءً متفوقاً، خاصة من أجل نسبة الإشارة إلى الضجيج المنخفضة $SNR \leq 4.5$ dB، مع تحسين يصل إلى 2dB في دقة التخمين مقارنة بالطرق الأخرى. إن القدرة على التغلب على ضجيج القناة واستقرار التقارب يجعل من ADMM حلاً مناسباً لتخمين القناة في أنظمة الاتصال المليمترية العملية للجيل الخامس والتي تتطلب تحقيق دقة تخمين عالية لزيادة فعالية تشكيل الحزمة الهجين وتحسين الأداء.

الكلمات المفتاحية: مصفوفة هوائي العدسة، نظام تعدد المداخل والمخارج المكثفة المليمترية، قناة الحزمة الفراغية، خوارزمية تمرير الرسائل التقريبي، خوارزمية ملاحقة التوافق المتعامد، خوارزمية كشف العناصر الأقوى، طريقة الاتجاه المتناوب للمضاعفات.

Beamspace Channel Estimation Using the Alternating Direction Method of Multipliers ADMM

Accurate channel estimation in millimeter-wave (mmWave) massive communication systems remains challenging due to high noise interference and limited pilot in sparse beamspace environments. The sparse nature of beamspace channels in lens antenna array systems motivates formulating channel estimation as sparse signal recovery. This paper proposes an approach to solve the beamspace channel estimation problem based on the Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM), which addresses this challenge through a Lagrangian multiplier-based optimization framework with controlled sparsity regularization adapted to noise levels. The performance of the proposed method is evaluated compared to established algorithms such as Approximate Message Passing (AMP), Orthogonal Matching Pursuit (OMP), and Support Detection (SD) using Saleh-Valenzuela and DEEP-MIMO channel models for Uniform Linear Array (ULA) and Uniform Planar Array (UPA) configurations. Spectral efficiency, Energy efficiency and Normalized Mean Square Error (NMSE) simulation results demonstrate that ADMM

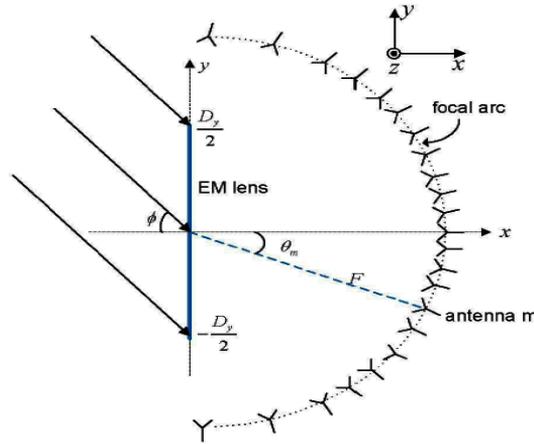
achieves superior estimation accuracy, particularly for low signal-to-noise ratios $SNR \leq 4.5$ dB, with improvements up to 2 dB compared to other methods. The ability to overcome channel noise and convergence stability makes ADMM a suitable solution for channel estimation in practical 5G millimeter-wave systems that require achieving high estimation accuracy to increase hybrid beamforming efficiency and improve performance.

Key words: Lens antenna array, Millimeter-wave Massive MIMO, Beamspace channel, Approximate Message Passing AMP, Orthogonal Matching Pursuit OMP, Support Detection SD, Alternating Direction Method of Multipliers ADMM.

1_المقدمة و الدراسات المرجعية :

مع الوصول للجيل الخامس 5G وزيادة الطلب على معدلات النقل العالية وخصوصاً مع وجود انترنت الأشياء IoT كان لابد من استخدام تقنيات تلبي هذه المتطلبات. لذلك تم التوجه لاستخدام الأمواج المليمترية mmWave [1] مما يتيح عرض مجال واسع من رتبة GHz وبالتالي معدل نقل بيانات عالي جداً، بالإضافة لإمكانية زيادة عدد هوائيات المحطة الأساسية BS لنظام تعدد المداخل والمخارج المكثفة المليمترية massive MIMO نتيجة أبعادها المنخفضة [2]. وبالرغم من التوجيه العالي وقدرات مسح الشعاع الفعالة لمصفوفة هوائيات MIMO المكثفة، فإن تنفيذها عند الترددات المليمترية يمثل تحديات كبيرة. ويرجع ذلك إلى زيادة استهلاك الطاقة والتعقيد

والتكلفة التي تنشأ عن الحاجة إلى عدداً كبيراً من مزيحات الطور [3]، [4]. لمعالجة هذه القيود، لجأ الباحثون مؤخراً إلى التصميم المبتكر لهوائي العدسة. يمتاز مفهوم هوائي العدسة بتاريخ غني، مع تركيز الأبحاث المبكرة على تصميمات العدسات الكروية ونصف الكروية لهوائيات الميكروويف [5]. ومع ذلك، انخفض الاهتمام بهوائيات العدسة لتطبيقات الاتصالات بسبب أبعادها الكبيرة. في الآونة الأخيرة، أدى التطور في تقنيات التصنيع القائمة على الطباعة ثلاثية الأبعاد إلى إمكانية تصغير الأبعاد وإعادة استخدام هوائيات العدسة في أنظمة الاتصالات 5G القائمة على الأمواج المليمترية mmWave [6] تتكون مصفوفة هوائي العدسة من مصفوفة هوائيات مع عدسة كهرطسية لتركيز الاشارات وتوجيهها حيث تتوضع الهوائيات على السطح المحرقى للعدسة [7] مما يلغي الحاجة لشبكة مزيحات الطور كما هو موضح بالشكل (1).



الشكل (1): مصفوفة هوائي عدسة مع موجة مستوية واردة

بزاوية وصول [7] \emptyset

حيث تعمل مصفوفة هوائي العدسة على تحويل مصفوفة القناة من المجال المكاني إلى مجال الحزمة الفراغية beamspace [8][9]. بالإضافة لتوجيه الحزم الإشعاعية من خلال تركيز

الإشارة باتجاهات مناسبة على هوائيات مختلفة من مصفوفة العدسة. وبالتالي يتشكل لدينا قناة حزمة فراغية متناثرة تحوي عدد قليل من العناصر الغير صفيرية التي تمثل الحزم الإشعاعية للمستخدمين. من خلال استغلال خصائص التناثر لقناة الحزمة الفراغية، يمكن صياغة تخمين القناة على أنها مسألة استعادة إشارة متناثرة [8][9] sparsity. لذلك تم التوجه لاستخدام طرق حديثة لتخمين القناة لكي يتم توجيه الإشارات المرسله واستعادة الإشارات المستقبلية بشكل صحيح. منها الاستدلال البايزي التبايني Variational Bayesian Inference [10] لتقدير القنوات المتناثرة في أنظمة mmWave MIMO المدعومة بأسطح عاكسة ذكية تعتمد على Sparse Bayesian Learning (SBL). والتي تستخدم إشارات التدريب الصاعدة فقط مما يقلل من التعقيد كما حسنت من دقة التخمين بنسبة 30% مقارنةً بالطرق التقليدية، مثل طريقة الحد الأدنى لمتوسط مربع الخطأ (MMSE (Minimum Mean Squared Error) [11] وأيضاً طريقة المربعات الأقل LS (Least Squares) [12] التي تعاني من ضعف في التعامل مع القناة المتناثرة. أيضاً تم اقتراح عدة خوارزميات لتخمين مصفوفة قناة الحزمة الفراغية المتناثرة حيث يتم استرجاع الإشارة المتناثرة عموماً باستخدام خوارزميات الكشف المضغوط (compressed sensing) [13] مثل خوارزمية ملاحقة التوافق المتعامد OMP (Orthogonal Matching Pursuit) [14] وخوارزمية تمرير الرسائل التقريبي AMP approximate message passing [15] وخوارزمية كشف العناصر الأقوى SD (support detection) [16][17] وهي خوارزميات تُستخدم لاسترجاع الإشارات المتناثرة و تستخدم بشكل كبير في استرجاع الصور وضغطها . ولكن بما أن استطاعة الإرسال للمستخدمين منخفضة تصبح مصفوفة القناة مغمورة بالضجيج وبالتالي فإن قيم نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR ستكون منخفضة مما يقلل من دقة تخمين شعاع القناة بشكل كبير و الذي يعتبر تحدياً هاماً لخوارزميات تخمين القناة المتناثرة في أنظمة Massive MIMO لذلك تم في هذا البحث استخدام خوارزمية طريقة الاتجاه المتناوب للمضاعفات ADMM [18][19] والتي تتميز بدقتها الكبيرة و خصوصاً في حالة قيم SNR منخفضة نتيجة قدرتها على ضبط درجة تناثر المتجه المراد تخمينه تبعاً لقيمة SNR.

2 - الهدف من البحث:

يهدف البحث إلى زيادة دقة تخمين القناة المتناثرة مع وجود نسبة إشارة إلى ضجيج منخفضة لتحسين أداء نظام الاتصال Massive MIMO المليمترى وذلك باستخدام طريقة الاتجاه المتناوب للمضاعفات ADMM .

3- مواد وطرق البحث :

في المرحلة الأولى تم محاكاة نموذج لنظام اتصال massive MIMO المليمترى بالاعتماد على نموذج [16] Saleh – Valenzuela لنوعين من مصفوفة الهوائيات الأولى خطية منتظمة ULA uniform linear array والثانية مستوية منتظمة UPA uniform planar array. في المرحلة الثانية تم محاكاة نظام الاتصال بالاعتماد على قاعدة بيانات لنموذج قناة واقعية DEEP-MIMO [20] أيضاً لنوعين من مصفوفة الهوائيات ULA و UPA. في كل مرحلة تم دراسة أداء خوارزمية ADMM في تخمين القناة والمقارنة مع خوارزميات AMP و OMP و SD وذلك باستخدام برنامج Matlab_2023a.

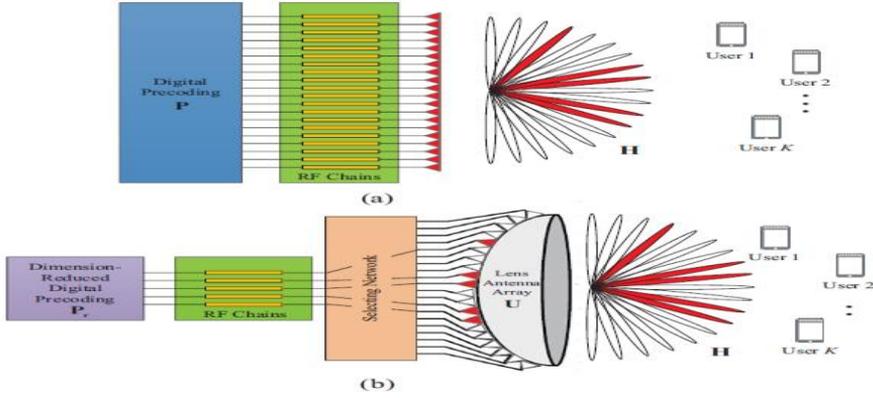
4_ نموذج نظام الاتصال:

نفترض أنه لدينا نظام اتصال لاسلكي مكون من BS تؤمن الخدمة إلى K مستخدم ذو هوائي وحيد كما هو مبين بالشكل (2). وتستخدم تقنية تعدد المدخل والمخارج المكثفة المليمترية mmWave massive MIMO مع ازدواج بتقسيم الزمن TDD حيث توظف المحطة الأساسية N هوائي و N_{RF} سلسلة راديوية. يمكن أن نكتب عبارة الإشارة المستقبلية من أجل الوصلة الهابطة بالعلاقة (1) [16]:

$$y^{DL} = H^H P s + n \quad (1)$$

حيث أن y^{DL} ($K \times 1$) متجه الإشارة المستقبلية و $H^H \in C^{K \times N}$ مصفوفة القناة للوصلة الهابطة و $H = [h_1, h_2, \dots, h_k]$ مصفوفة القناة للوصلة الصاعدة [16]. كما

أن $h_k(N \times 1)$ هو متجه القناة بين BS و المستخدم k . بينما يعبر الشعاع $K \times S$ (1) متجه الاشارات الأصلية المرسله لكل المستخدمين K . و لها استطاعة معيارية $\mathbb{E}(SS^H) = I_K$ مما يضمن توزيع طاقة متوازن بالإضافة الى أن الإشارات المرسله إلى المستخدمين تكون غير مرتبطة فيما بينها مما يقلل من التداخل أما $P(N \times K)$ مصفوفة تشكيل الحزمة المسبق لتحسين الارسال وتخفيض التداخل و التي تحقق شرط الاستطاعة المرسله $trace(PP^H) \leq \rho$ حيث ρ استطاعة الارسال للوصلة الهابطة .وأخيراً $n \sim CN(0, \sigma_{DL}^2 I_K)$ متجه الضجيج الأبيض الغوصي المضاف $AWGN$ له متوسط صفري و انحراف معياري $\sigma_{DL}^2 I_K$ حيث أن استطاعة الضجيج للوصلة الهابطة. من الواضح وحسب الشكل (2_a) أن نظام تعدد المداخل والمخارج المكثفة مع تشكيل حزمة رقمي تقليدي يحتاج لعدد كبير من السلاسل الراديوية مساوي لعدد الهوائيات أي أن $N = N_{RF} = 256$. بينما سيتناقص عددها بشكل كبير في حال تم استخدام العدسة الكهرطسية كما هو موضح بالشكل (2_b) حيث تعمل العدسة كمزيج طوري مما يلغي الحاجة لمزيجات الطور .



الشكل (2) : مقارنة بين بنيتين لنظام تعدد المداخل و المخرجات المكثفة الملمتيرية مع وجود مصفوفة هوائي العدسة (b) وبدونها (a) [16]

4_1_ حالة تمثيل القناة بمصفوفة خطية منتظمة ULA uniform linear array باستخدام نموذج قناة Saleh – Valenzuela المستخدم لتمثيل أنظمة الاتصال الملمتيرية يعطى h_k متجه القناة بين المستخدم ذو الترتيب k و هوائيات محطة القاعدة N بالعلاقة (2)[16]:

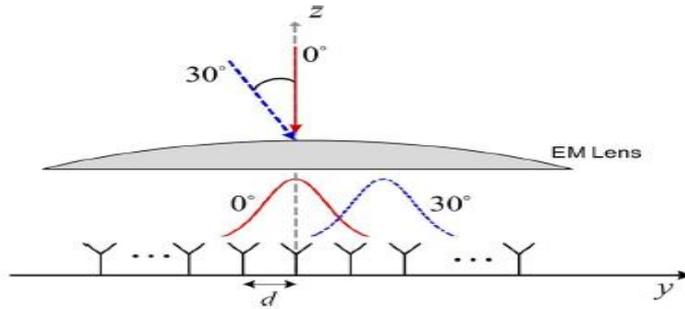
$$h_k = \sqrt{\frac{N}{L_k + 1}} \sum_{i=0}^{L_k} \beta_k^{(i)} a(\psi_k^{(i)}) = \sqrt{\frac{N}{L_k + 1}} \sum_{i=0}^{L_k} c_{k,i} \quad (2)$$

حيث $k = (1, 2, \dots, K)$ و L_k هو عدد المسارات الكلي للمستخدم k و $\beta_k^{(0)}$ و $c_{k,0} = \beta_k^{(0)} a(\psi_k^{(0)})$ هو مكون خط النظر LOS لمتجه القناة h_k مع ربح عقدي $\beta_k^{(0)}$ و اتجاه مكاني $a(\psi_k^{(0)})$ ومن أجل باقي مكونات متجه القناة $NLOS$ فإن $1 \leq i \leq L_k$ والتي نحصل عليها عادة من خلال قياسات القناة و $a(\psi)_{(N \times 1)}$ متجه التوجيه. ومن أجل مصفوفة خطية منتظمة ULA بعدد هوائيات N [16] نحصل على :

$$a(\psi) = \frac{1}{\sqrt{N}} [e^{j2\pi\psi m}]_{m \in I(N)} \quad (3)$$

حيث أن $I(N) = \{p - \frac{(N-1)}{2}, p = 0, 1, \dots, N-1\}$ هي عبارة عن مجموعة متناظرة من المداخل متمركزة حول الصفر و يعرف الاتجاه المكاني بالعلاقة $\psi = \frac{d}{\lambda} \sin \theta$ حيث d المسافة بين الهوائيات و λ طول موجة الحامل كما هو مبين بالشكل (3) و من أجل أنظمة الاتصالات الأمواج المليمترية فإن $d = \lambda/2$ و θ هي زاوية الورد الفيزيائية AOA [21] وبالتالي يمكن كتابة العلاقة (3) كما يلي :

$$a(\psi) = \frac{1}{\sqrt{N}} [e^{j2\pi d/\lambda \sin(\theta) m}]_{m \in I(N)} \quad (4)$$



الشكل (3): الإشارة الواردة بزوايا وصول $AOA = 0^\circ, 30^\circ$ [21]

مع استخدام مصفوفة هوائي العدسة يتم تحويل القناة من المجال المكاني الى مجال الحزم الفراغية ونحصل على قناة الحزمة الفراغية *beam space* حيث تلعب مصفوفة هوائي العدسة دور مصفوفة تحويل فورييه المنقطع DFT بحجم $(N \times N)$ والتي تحوي على أشعة التوجيه من أجل N اتجاه متعامد [16] تغطي كامل المجال وتعطى بالعلاقة:

$$U = [a(\bar{\psi}_1), a(\bar{\psi}_2), \dots, a(\bar{\psi}_N)] \quad (5)$$

حيث أن $\bar{\psi}_n = \frac{1}{N}(n - \frac{N+1}{2})$ من أجل $n = 1, 2, \dots, N$ هي الاتجاهات المكانية المحددة مسبقاً من قبل مصفوفة هوائي العدسة . ومنه تصيح الاشارة المستقبلية بعد استخدام مصفوفة هوائي العدسة [16] :

$$\tilde{y}^{DL} = H^H U^H P_S + n = \tilde{H}^H P_S + n \quad (6)$$

حيث أن \tilde{y}^{DL} متجه الاشارة المستقبلية في الوصلة الهابطة في قناة الحزمة الفراغية. وتعطى مصفوفة قناة الحزمة الفراغية بالعلاقة (7) [16] :

$$\tilde{H} = UH = [\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_k] = [Uh_1, Uh_2, \dots, Uh_k] \quad (7)$$

حيث \tilde{h}_k هي متجه قناة الحزمة الفراغية بين المستخدم k و BS. و هنا لابد من الإشارة إلى أن مصفوفة قناة الحزمة الفراغية $\tilde{H}(\tilde{h}_k)$ لها بنية متناثرة وذلك نتيجة عدد المبعثرات المحدود في بيئات انتشار الأمواج المليمترية وبالتالي يمكن اختيار عدد صغير من الحزم المناسبة من قناة الحزمة الفراغية المتناثرة لتقليل أبعاد نظام massive MIMO و تخفيض التعقيد في المعالجة ومنه تصيح الاشارة المستقبلية المبسطة :

$$\tilde{y}^{DL} = \tilde{H}_r^H P_r s + n \quad (8)$$

حيث \tilde{H}_r^H مصفوفة قناة الحزمة الفراغية ذات الأبعاد المنخفضة و P_r مصفوفة تشكيل الحزمة الرقمية المقابلة ذات الأبعاد المنخفضة والتي تحقق شرط استطاعة الارسال. وبالتالي ونتيجة خاصية التناثر لقناة الحزمة الفراغية سيتمكن نظام تعدد المداخل والمخارج المكثف المليمترية مع استخدام مصفوفة هوائي العدسة من تخفيض عدد السلاسل الراديوية المطلوبة بدون فقد كبير في الأداء. ولنضمن أرباح التعدد المكاني لجميع المستخدمين يجب أن يكون عدد السلاسل الراديوية لا يقل عن عدد المستخدمين

ضمن الخلية

تقوم BS بتخمين قناة الحزمة الفراغية بناء على الاشارات الدليلية المرسله مع اشارة المستخدمين المتواجدين في الخلية وبما أن أبعاد مصفوفة قناة الحزمة الفراغية كبيرة وعدد السلاسل الراديوية محدود فإن تخمين القناة سيعاني من عدم كفاية المعلومات الدليلية و تعقيد المعالجة لذلك يتم الاستفادة من أرباح مصفوفة هوائي العدسة في تخمين القناة وتعطى مصفوفة الاشارة المستقبلية $(N \times K)$ \tilde{Y}_m^{UL} في BS للوصلة الصاعدة ضمن الكتلة m بالعلاقة (9)[16] :

$$\tilde{Y}_m^{UL} = UH\Psi_m + N_m = \tilde{H}\Psi_m + N_m \quad (9)$$

حيث أن $U(N \times N)$ مصفوفة تحويل فورييه المتقطع DFT المكانية لمصفوفة هوائي العدسة و تحوي أشعة التوجيه من أجل N اتجاه متعامد. $N_m(N \times K)$ مصفوفة الضجيج على الكتلة ذات الترتيب m ولها عناصر مستقلة و موزعة بشكل غوسي مثالي لها متوسط صفري وانحراف معياري σ_{UL}^2 حيث $m = 1, 2, \dots, M$ و $H(N \times K)$ مصفوفة القناة للوصلة الصاعدة. $\Psi_m(K \times K)$ مصفوفة الإشارات الدليلية المرسله من قبل المستخدمين خلال Q فترة زمنية مقسمة إلى M كتلة كل منها يحوي K سلسلة دليلية متعامدة مرسله من قبل K مستخدم و بما أن قناة الحزمة الفراغية تبقى ثابتة خلال زمن تماسك القناة وبالتالي فإن عدد الرموز $Q = MK$. ويفترض أن تكون المصفوفة الدليلية محققة للشرط

$$\Psi_m^H \Psi_m = I_k \text{ و } \Psi_m \Psi_m^H = I_k$$

تكون واحدية. ومنه فإن نسبة الاشارة إلى الضجيج للوصلة الصاعدة

$$SNR = 1/\sigma_{UL}^2$$

تقوم محطة القاعدة بتجميع الاشارة المستقبلية حيث يتم ضرب

الإشارة المستقبلية \tilde{Y}_m^{UL} بمصفوفة القياس $W_m(K \times N)$ ويتم ذلك من خلال شبكة من المبدلات أو شبكة من مزيجات الطور 1bit وبالتالي سنحصل على $R_m(K \times K)$ والتي يتم اعتبارها إلى القسم الرقمي من خلال K سلسلة راديوية كما في العلاقة (10)[16]:

$$R_m = W_m \tilde{Y}_m^{UL} = W_m \tilde{H} \Psi_m + W_m N_m \quad (10)$$

نستخدم هنا مصفوفة برنولي العشوائية و عناصر مصفوفة القياس يتم اختيارها عشوائيا من المجموعة $\{+1, -1\}$ باحتمالية متساوية حيث Q عدد الرموز. ويضرب المصفوفة R_m بمصفوفة الرموز الدليلية Ψ_m^H المعلومة لدينا نحصل على مصفوفة القياسات Z_m المبينة بالعلاقة:

$$Z_m = W_m \tilde{H} + W_m N_m + N_m^{eff} \quad (11)$$

حيث أن N_m^{eff} مصفوفة الضجيج الفعال. سنركز هنا على تخمين قناة الحزمة الفراغية للمستخدم k ونحصل على \tilde{h}_k وبتكرار الطريقة ذاتها سنحصل على مصفوفة القناة لكافة المستخدمين في الخلية \tilde{H} . بعد M كتلة مرسلات من الرموز الدليلية سنحصل على متجه القياسات $\bar{Z}_k(Q \times 1)$ للمتجه $\tilde{h}_k(Q \times 1)$ الخاص بالمستخدم k :

$$\bar{Z}_k = \bar{W} \tilde{h}_k + \bar{n}_k \quad (12)$$

حيث $\bar{W}(Q \times N)$ مصفوفة القياس الكلية و \bar{n}_k هي الأعمدة k من المصفوفتين W_m و N_m^{eff} على الترتيب. هدفنا هو إيجاد \tilde{h}_k بالاعتماد على متجه القياسات \bar{Z}_k باستخدام أقل عدد ممكن من الرموز الدليلية. ومن الجدير بالذكر أن متجه القناة للمستخدم \tilde{h}_k هو متجه متناثر وذلك لأن عدد المبعثرات في بيئة انتشار الأمواج المليمترية محدود [16]. ومنه باستخدام مصفوفة القياس سنضمن أن متجه القياسات \bar{Z}_k يحوي معلومات كاملة عن \tilde{h}_k حتى

من أجل $Q < N$. بالنتيجة يمكن اعتبار عملية تخمين متجه القناة \tilde{h}_k عبارة عن مسألة استرجاع إشارة متناثرة نموذجية .

4_2_ حالة تمثيل القناة بمصفوفة مستوية منتظمة UPA uniform planar array:

أيضاً باستخدام نموذج قناة Saleh – Valenzuela حسب [22] المستخدم لتمثيل أنظمة الاتصال المليمترية يعطى $h_{k(N \times 1)}$ متجه القناة بين المستخدم ذو الترتيب k و هوائيات محطة القاعدة $N = N_1 \times N_2$ بالعلاقة (13)[22] :

$$h_k = \sqrt{\frac{N}{L_k}} \sum_{l=1}^{L_k} \beta_{k,l} \mathbf{a}(\theta_{k,l}^{\text{azi}}, \theta_{k,l}^{\text{ele}}) = \sqrt{\frac{N}{L_k}} \sum_{i=1}^{L_k} c_{k,l} \quad (13)$$

حيث L_k هو عدد المسارات الكلي للمستخدم k و $c_{k,l} = \beta_{k,l} \mathbf{a}(\theta_{k,l}^{\text{azi}}, \theta_{k,l}^{\text{ele}})$ هو مكوّن المسار l مع ربح عقدي $\beta_{k,l}$ و متجه توجيهه مكاني $\mathbf{a}(\theta_{k,l}^{\text{azi}}, \theta_{k,l}^{\text{ele}})_{(N \times 1)}$ حيث $\theta_{k,l}^{\text{azi}}$ و $\theta_{k,l}^{\text{ele}}$ هما زاويتا السمّت و الارتفاع على الترتيب. ومن أجل مصفوفة مستوية منتظمة نموذجية UPA بعدد هوائيات $N = N_1 \times N_2$ نحصل على :

$$\mathbf{a}(\theta_{k,l}^{\text{azi}}, \theta_{k,l}^{\text{ele}}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[e^{-j2\pi d \sin(\theta_{k,l}^{\text{azi}}) \sin(\theta_{k,l}^{\text{ele}}) \mathbf{n}_1 / \lambda} \right] \otimes \left[e^{-j2\pi d \cos(\theta_{k,l}^{\text{ele}}) \mathbf{n}_2 / \lambda} \right] \quad (14)$$

حيث $\mathbf{n}_2 = [0, 1, \dots, N_2 - 1]^T$ و $\mathbf{n}_1 = [0, 1, \dots, N_1 - 1]^T$ و طول موجة الحامل

و $d = \lambda/2$ المسافة بين الهوائيات ويمكن أن نعرّف الزاوية المكانية السمّية ψ^{azi}

و مع استخدام مصفوفة $\psi^{\text{ele}} = \frac{\cos(\theta_{k,l}^{\text{ele}})}{\lambda}$ والزاوية المكانية الشاقولية $\frac{d \sin(\theta_{k,l}^{\text{azi}}) \sin(\theta_{k,l}^{\text{ele}})}{\lambda}$

هوائي العدسة يتم تحويل القناة من المجال المكاني إلى مجال الحزمة الفراغية حيث تلعب مصفوفة

هوائي العدسة دور مصفوفة تحويل فورييه $U_{(N \times N)}$ المنقطع DFT والتي يعبر عنها بالعلاقة :

$$U = \left[\mathbf{a}(\psi_1^{\text{azi}}, \psi_1^{\text{ele}}), \dots, \mathbf{a}(\psi_1^{\text{azi}}, \psi_{N_2}^{\text{ele}}), \dots, \mathbf{a}(\psi_{N_1}^{\text{azi}}, \psi_{N_2}^{\text{ele}}) \right]^H \quad (15)$$

حيث $\psi_n^{\text{azi}} = \frac{1}{N_1} \left(n - \frac{N_1+1}{2} \right)$ هو الاتجاه المكاني السمتي المحدد بشكل مسبق عبر العدسة

وذلك من أجل $n = 1, 2, \dots, N_1$ و $\psi_n^{\text{ele}} = \frac{1}{N_2} \left(n - \frac{N_2+1}{2} \right)$ هو الاتجاه المكاني

الشاقولي المحدد بشكل مسبق عبر العدسة وذلك من أجل $n = 1, 2, \dots, N_2$ وبالتالي يمكن

كتابة العلاقة (14) بالشكل :

$$\mathbf{a}(\psi^{\text{azi}}, \psi^{\text{ele}}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[e^{-j2\pi\psi_n^{\text{azi}} n_1} \right] \otimes \left[e^{-j2\pi\psi_n^{\text{ele}} n_2} \right] \quad (16)$$

و منه فإن متجه قناة الحزمة الفراغية \tilde{h}_k بين المستخدم ذو الترتيب k و مصفوفة هوائيات BS المؤلفة من N هوائي يمكن أن نعبر عنه بالعلاقة :

$$\tilde{h}_k = U h_k = \sqrt{\frac{N}{L_k}} \sum_{l=0}^{L_k} \tilde{c}_{k,l} \quad (17)$$

حيث أن $\tilde{c}_{k,l} = U c_{k,l}$ هو مكون قناة الحزمة الفراغية l . و لتخمين قناة الاتصال لكامل المستخدمين K يتم تخمين شعاع قناة الحزمة الفراغية \tilde{h}_k لكل مستخدم على حدى .تقوم أجهزة المستخدمين بإرسال رموز دليلية مستقلة و متعامدة مع بعضها البعض و معلومة لدى BS خلال فترة زمنية و تبعاً لخاصية نظام TDD عند تخمين قناة الوصلة الصاعدة سنحصل مباشرة على قناة الوصلة الهابطة في الفترة q فإن متجه الإشارة المقاسة الأساسية $y_{k,q}$ في المعالج الرقمي بعد عملية اختيار الحزم للوصلة الصاعدة في BS يعبر عنه بالعلاقة :

$$y_{k,q} = \mathbf{W}_{k,q} \tilde{h}_k s_{k,q} + \bar{\mathbf{n}}_{k,q} , \quad q = 1, 2, \dots, Q \quad (18)$$

حيث $\mathbf{w}_{k,q}$ شبكة اختيار الحزم أبعادها $N_{RF} \times N$ و $s_{k,q}$ الرمز الدليلي المرسل و $\bar{\mathbf{n}}_{k,q} = \mathbf{W}_{k,q} \mathbf{n}_{k,q}$ شعاع الضجيج الفعال المضاف حيث $\mathbf{n}_{k,q} \sim CN(0, \sigma_n^2 I_N)$ بأبعاد $(N \times 1)$ حيث σ_n^2 استطاعة الضجيج و بعد Q فترة من الارسل الدليلي سنحصل إشارة القياسات الكلية y_k بأبعاد $(M = QN_{RF})$:

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} y_{k,1} \\ y_{k,2} \\ \vdots \\ y_{k,Q-1} \\ y_{k,Q} \end{bmatrix} = \mathbf{W}_k \tilde{\mathbf{h}}_k + \mathbf{n}_k \quad (19)$$

حيث نفترض $s_{k,q} = 1$ و $\mathbf{W}_k = [\mathbf{W}_{k,1}^T, \mathbf{W}_{k,2}^T, \dots, \mathbf{W}_{k,Q}^T]^T$ مصفوفة اختيار الحزم بأبعاد $(M \times N)$ و $\mathbf{n}_k = [\mathbf{n}_{k,1}^T, \mathbf{n}_{k,2}^T, \dots, \mathbf{n}_{k,Q}^T]^T$ شعاع الضجيج الفعال بأبعاد $(M \times 1)$ على فترة زمنية Q . وبما أن عملية التخمين ستكون نفسها لجميع قنوات أجهزة المستخدمين K وبالتالي يمكن كتابة العلاقة الأخيرة بشكل عام بالشكل:

$$\mathbf{y} = \mathbf{W} \tilde{\mathbf{h}} + \mathbf{n} \quad (20)$$

و نتيجة التبعثر المحدود للإشارات المليمترية فإن قناة الحزمة الفراغية ستتضمن عدد قليل من المسارات وبالتالي فإن العناصر القريبة من الزوايا المكانية للمسارات الفعلية ستكون ذات قيم كبيرة أما باقي العناصر ستكون صفرية تقريباً أي يمكن اعتبار $\tilde{\mathbf{h}}$ عبارة عن قناة حزمة فراغية متناثرة ومنه نجد أيضاً أن عملية تخمين القناة $\tilde{\mathbf{h}}$ عبارة عن مسألة استرجاع إشارة متناثرة.

5_ تخمين القناة بالاعتماد على خوارزمية ADMM:

يمكن اعتبار مسألة تخمين قناة الحزمة الفراغية من أجل كل من ULA المبينة بالعلاقة (12) و UPA المبينة في العلاقة (20) كمسألة استعادة إشارة متناثرة والتي يمكن صياغتها على شكل مسألة إيجاد الحل الأمثل optimization problem التالية [22]:

$$\min \|\tilde{\mathbf{h}}\|_0 \quad s.t \quad \|\mathbf{y} - \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}\|_2 \leq \varepsilon \quad (21)$$

حيث $\|\cdot\|_0$ هو التنظيم الصفري الذي يعبر عن عدد العناصر غير الصفرية في المتجه؛ هنا $\|\tilde{\mathbf{h}}\|_0$ عدد العناصر غير الصفرية في متجه قناة الحزمة الفراغية $\tilde{\mathbf{h}}$ ، و ε هو سماحية الخطأ الناتج عن الضجيج. $\|\cdot\|_2$ هو تنظيم الدرجة الثانية والذي يعبر عن طول المتجه في الفضاء الإقليدي؛ هنا $\|\mathbf{y} - \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}\|_2$ هو المسافة الاقليدية لمتجه الفرق بين متجه القياس \mathbf{y} والمتجه $\mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}$ الناتج عن جداء مصفوفة اختيار الحزم \mathbf{W} مع متجه القناة المخمن $\tilde{\mathbf{h}}$. في هذا النوع من المسائل يتوفر معلومات عن متجه القياس ومصفوفة اختيار الحزم و الهدف في حل مسألة ايجاد الحل الامثل المطروحة هو ايجاد متجه قناة الحزمة الفراغية $\tilde{\mathbf{h}}$ ذو الطبيعة المتناثرة [8][9] sparsity. بناءً على هذه الفرضية ونظراً لأن التنظيم الصفري ذو طبيعة غير محدبة non-convexity فإن المسألة تعتبر بالغة الصعوبة NP-hard لذلك يمكن إعادة صياغة مسألة ايجاد الحل الأمثل المعطاة بالعلاقة (21) باستبدال التنظيم الصفري في بالتنظيم من الدرجة الاولى $\|\cdot\|_1$ الذي يعبر عن درجة التناثر في المتجه، مما يؤدي إلى جعل المسألة مسألة ايجاد حل أمثل محدبة convexity أقل صعوبة. على الشكل التالي:

$$\min \|\tilde{\mathbf{h}}\|_1 \quad s.t \quad \|\mathbf{y} - \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}\|_2 \leq \varepsilon \quad (22)$$

في هذه العلاقة يتم اعتبار مسألة ايجاد الحل الامثل مقيدة حيث تعتبر المسألة الاساسية هي مسألة تخمين متجه القناة المتناثر $\tilde{\mathbf{h}}$ عن طريق تقليل قيمة تنظيم الدرجة الأولى والقيود المفروض هو استيفاء الدقة الكافية في البيانات data fidelity اي جعل الفرق أقل ما يمكن بين الاشارة المقاسة \mathbf{y} والاشارة $\mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}$ الناتجة عن جداء متجه القناة $\tilde{\mathbf{h}}$ ومصفوفة اختيار الحزم \mathbf{W} مع السماح بهامش خطأ محدد ε .

على الرغم من وجود العديد من الأساليب المتبعة لحل المسألة المطروحة في العلاقة (22) مثل SD و OMP و AMP ولكن هذه الخوارزميات لا تأخذ بعين الاعتبار الحاجة لإعادة ضبط درجة تناثر المتجه المراد تخمينه $\tilde{\mathbf{h}}$ تبعاً لمستوى الضجيج في الاشارة المقاسة. في هذا البحث نقدّم حل

للمسألة المطروحة في العلاقة (22) بالاعتماد على طريقة الاتجاه المتناوب للمضاعفات ADMM حيث يتم إعادة صياغتها بطريقة تسمح بضبط درجة التناثر في المتجه المستهدف بناء على مستوى الضجيج في البيانات المقاسة لتصبح بالشكل التالي :

$$\min_h \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}\|_2^2 + \lambda \|\tilde{\mathbf{h}}\|_1 \quad (23)$$

نجد هنا أن المسألة الأساسية هي مسألة استيفاء الدقة الكافية في البيانات لتقليل الفرق بين الإشارة المقاسة والإشارة المحسوبة بالاعتماد على متجه القناة المخمن $\tilde{\mathbf{h}}$ ، في حين أن القيد المفروض هو تحقق شرط درجة التناثر في المتجه $\tilde{\mathbf{h}}$. بعبارة أخرى قمنا بالتبديل بين المسألة الأساسية و القيد المفروض كل منهما مكان الآخر مع طرح بارامتر جديد λ ليساعد في التحكم بدرجة التناثر تبعاً لنسبة الإشارة الى الضجيج SNR [19][18] .

لحل المسألة المطروحة في العلاقة (23) وفقاً لطريقة الاتجاه المتناوب للمضاعفات ADMM نستخدم متغير ضمني مساعد \mathbf{z} يمكننا من إعادة صياغة المعادلة (23) كما في العلاقة (24).

$$\min_{h, \mathbf{z}} \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{z}\|_1 \quad \text{subject to: } \tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{z} \quad (24)$$

وفقاً للعلاقة (24) يتم اعتبار أن المسألة الأساسية هي مسألة إيجاد الحل الأمثل بالنسبة لمتجه القناة $\tilde{\mathbf{h}}$ الذي يحقق أقل خطأ ممكن بين إشارة القياس والإشارة المحسوبة من جداء المتجه المخمن ومصفوفة اختيار الحزم ، وكذلك الامر بالنسبة للمتجه المساعد \mathbf{z} المقيد بشرط التناثر مع افتراض قيد اضافي أن كلاً من متجه القناة $\tilde{\mathbf{h}}$ والمتجه المساعد المتناثر \mathbf{z} متطابقين. وبناء على هذه الصياغة يعمل المتغير المساعد على تسهيل حل المسألة دون أن يؤثر على طبيعة المسألة أو دقة الحل. بهذه الطريقة يتاح فصل الحد $\frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}\|_2^2$ data fidelity term والذي يعتبر تابع مستمر smooth عن الحد $\lambda \|\mathbf{z}\|_1$ الذي يعتبر غير مستمر non smooth l1 - norm .

لكي نتمكن من حل مسألة إيجاد الحل الأمثل المقيدة والموضحة في المعادلة (24). نستخدم تقنية لاغرانج الموسعة (the augmented Lagrangian scheme). إن تابع لاغرانج الموسع المرتبط بالمعادلة (23) يكتب وفق العلاقة التالية [19][18]:

$$\mathcal{L}_\rho(\tilde{\mathbf{h}}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\Omega}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{w}\tilde{\mathbf{h}}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{z}\|_1 + \frac{\rho}{2} \|\tilde{\mathbf{h}} - \mathbf{z}\|_2^2 + \boldsymbol{\Omega}^H(\tilde{\mathbf{h}} - \mathbf{z}) \quad (25)$$

حيث $\boldsymbol{\Omega} \in \mathcal{C}^{N \times N}$ تعبر عن معامل لاغرانج أو ما يعرف بالمتغير الضمني latent variable الذي يدخل خوارزمية الحل كمعامل يسهل مراحل التنفيذ وعند وصول الخوارزمية إلى الحل المطلوب وتحقق قيد المسألة (تطابق متجه القناة $\tilde{\mathbf{h}}$ والمتجه المساعد المتناثر \mathbf{z}) يأخذ هذا المتغير قيم صفرية فهو يؤدي دوره كوسيط يسهل الوصول إلى الحل مع ضمان تحقق قيد المسألة، و $\rho \in R^+$ هو معامل جزائي (penalty parameter). من أجل حساب معادلة التحديث الخاصة لكل من $\tilde{\mathbf{h}}$ و \mathbf{z} و $\boldsymbol{\Omega}$ نحتاج هنا إلى إيجاد النقاط الحدية لكل منها. أولاً يتم إيجاد تحديث المتغير المعبر عن متجه القناة $\tilde{\mathbf{h}}$ ، عن طريق اشتقاق حدود علاقة لاغرانج بالنسبة للمتغير المقصود $\tilde{\mathbf{h}}$ كما في العلاقة (26):

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\tilde{\mathbf{h}})}{\partial \tilde{\mathbf{h}}} = \frac{\partial}{\partial \tilde{\mathbf{h}}} \left(\frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{w}\tilde{\mathbf{h}}\|_2^2 + \frac{\rho}{2} \|\tilde{\mathbf{h}} - \mathbf{z}\|_2^2 + \boldsymbol{\Omega}^H(\tilde{\mathbf{h}} - \mathbf{z}) \right) \quad (26)$$

ويحل المعادلة $\frac{\partial \mathcal{L}(\tilde{\mathbf{h}})}{\partial \tilde{\mathbf{h}}} = 0$ ينتج علاقة التحديث الخاصة بمتجه القناة $\tilde{\mathbf{h}}$ وفق العلاقة (27):

$$\tilde{\mathbf{h}}^{k+1} = (\mathbf{w}^H \mathbf{w} + \rho \mathbf{I}_N)^{-1} (\mathbf{w}^H \mathbf{y} + \rho \mathbf{z}^k - \boldsymbol{\Omega}^k) \quad (27)$$

اما بالنسبة للمتجه المتناثر \mathbf{z} فإن نظيم الدرجة الأولى هو تابع ذو طبيعة غير مستمرة *non smooth l1 - norm* وبالتالي فهو تابع غير قابل للاشتقاق عند كل النقاط الخاصة به لذلك يتم تحديث \mathbf{z} في كل تكرار بالاعتماد على معامل تقريب proximal operator وفق العلاقة (28)[18]:

$$\mathbf{z}^{k+1} = f_{\frac{\lambda}{\rho}} \left(\tilde{\mathbf{h}}^{k+1} + \frac{\Omega^k}{\rho} \right) \quad (28)$$

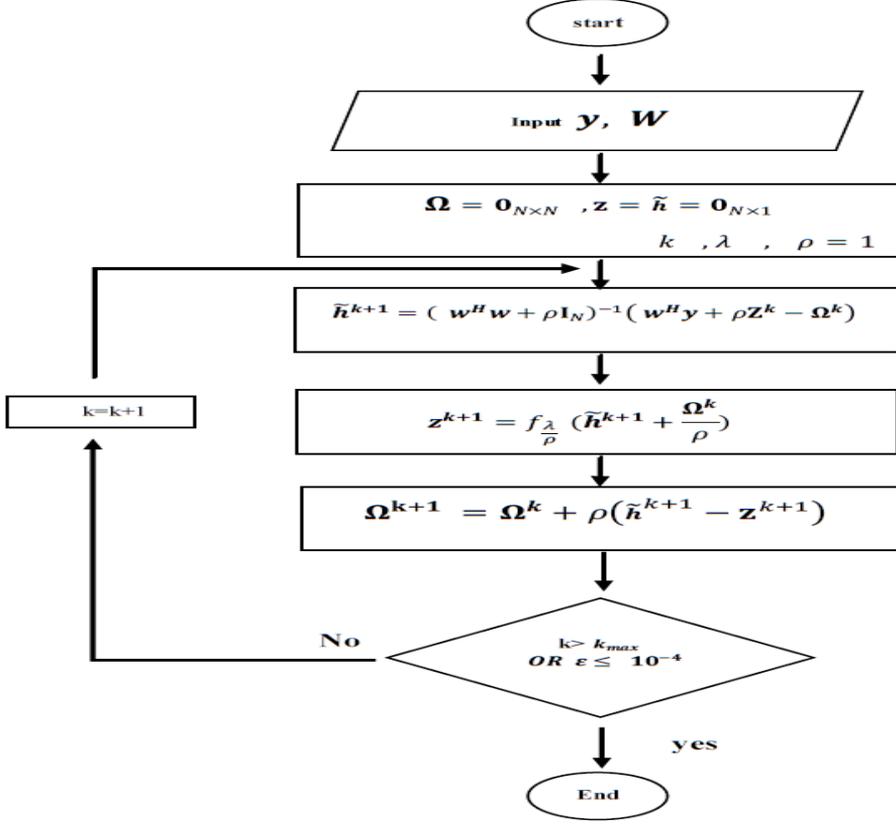
حيث f هي دالة الانكماش Shriking function تتعامل مع التوابع الغير مستمرة (non smooth functions) هنا $f(x) = \|x\|_1$ ، وتعرف بالعلاقة (29)[18]:

$$shrink_f(h) = \arg \min_{x \in \mathbb{R}^n} \left(f(x) + \frac{1}{2} \|x - h\|^2 \right) \quad (29)$$

أما متغير لاغرانج Ω فيتم تحديثه حسب العلاقة (30):

$$\Omega^{k+1} = \Omega^k + \rho(\tilde{\mathbf{h}}^{k+1} - \mathbf{z}^{k+1}) \quad (30)$$

وبالنهاية يتم تحديث المعاملات وفقاً للمعادلات (27)، و(28)، و(30) بالتناوب حتى يتحقق التقارب أو الى أن تتجاوز الخوارزمية الحد الاعظمي المسموح به من التكرارات. من الجدير بالذكر أن البارامتر الجزائي ρ يتم تثبيت قيمته عند القيمة الافتراضية 1 ويتم ضبط بارامتر التنظيم λ وفقاً لسناريو الضجيج كما سيتم ذكره بمزيد من التفصيل في قسم النتائج. يلخص المخطط الصندوقي التدفقي المبين بالشكل (4) خطوات طريقة الاتجاه المتناوب للمضاعفات المقترحة لحل مسألة ايجاد الحل الأمثل المعطاة في العلاقة (23).



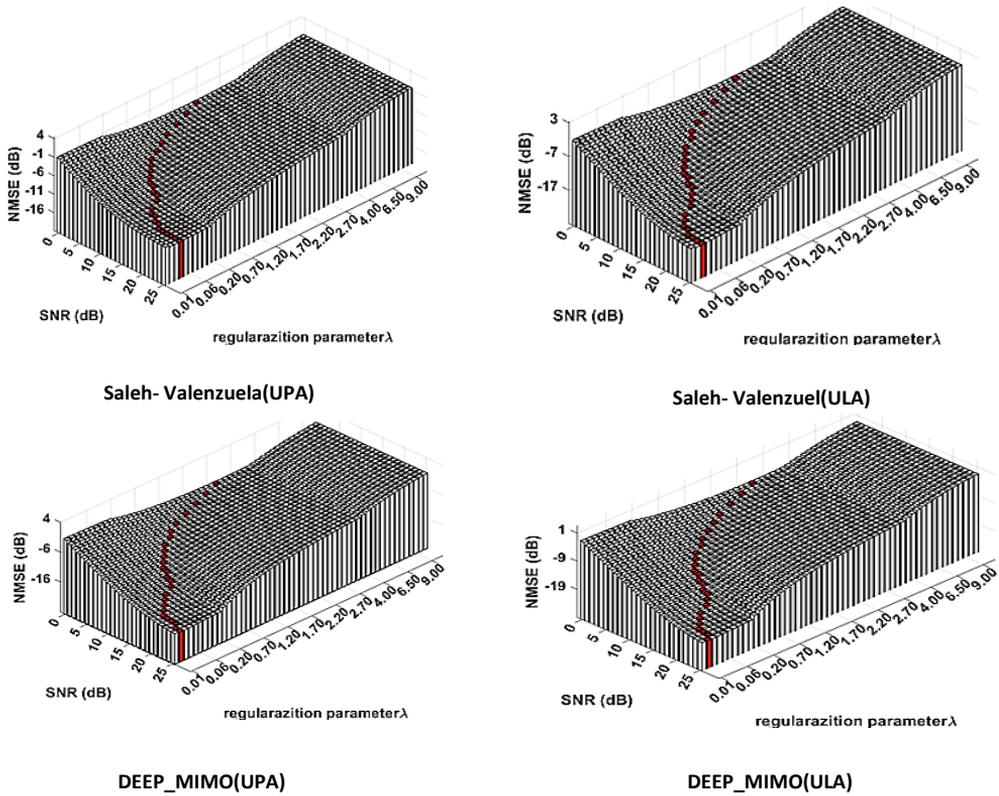
الشكل (4) : المخطط التدفقي لخوارزمية ADMM

6_ الجزء العملي ومناقشة النتائج:

تم دراسة أداء خوارزمية التخمين ADMM من خلال حساب الحد الأدنى المعياري لمتوسط الخطأ التربيعي NMSE بين متجه القناة المخمّنة \tilde{h}_k و متجه القناة الأصلية h_k حسب العلاقة (31) [23]:

$$NMSE = 10 \log \left(\mathbb{E}_k \left(\frac{\|h_k - \tilde{h}_k\|_2^2}{\|h_k\|_2^2} \right) \right) \quad (31)$$

وذلك بالاعتماد على نموذجين مختلفتين لنظام الاتصال الأول نموذج قناة Saleh – Valenzuela و نموذج قناة لبيئة حقيقة DEEP – MIMO. وبما أن دقة خوارزمية ADMM المقترحة لتخمين متجه القناة h_k تعتمد بشكل أساسي على قيمة عامل التنظيم λ والذي يحدد بدوره درجة التناثر لمتجه القناة تبعاً لقيمة SNR. يبين الشكل (5) أربعة مخططات ثلاثية الأبعاد يحدد كل منها العلاقة بين NMSE ومعامل التنظيم λ و SNR.



الشكل (5) العلاقة بين قيمة NMSE و λ و SNR وذلك من أجل نموذج قناة

DEEP – MIMO و نموذج قناة Saleh– Valenzuela

وذلك من أجل نموذجي قناة Saleh – Valenzuela (ULA/UPA) و نموذجي قناة DEEP – MIMO (ULA/UPA). عند كل قيمة SNR يتم اختيار قيمة معامل التنظيم λ التي تحقق أفضل قيمة NMSE حيث تبين النقاط الحمراء قيم NMSE المثلى الممكن تحقيقها عند كل قيمة SNR وذلك عند اختيار القيمة المناسبة لمعامل التنظيم λ .

6_1_1 محاكاة النظام بالاعتماد على نموذج قناة Saleh – Valenzuela :

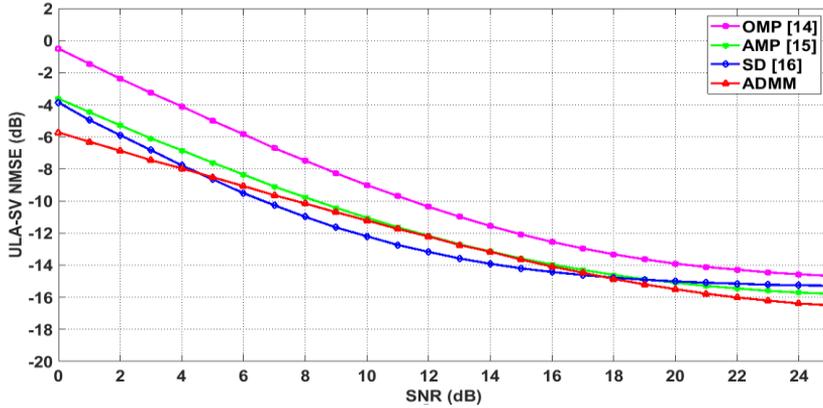
تم اجراء محاكاة لنظام الاتصال المليمترى بالاعتماد على المعاملات المذكورة بالجدول (1) لمقارنة أداء الخوارزميات OMP و AMP و SD مع الطريقة المقترحة بالاعتماد على خوارزمية ADMM في حالة ULA وحالة UPA باستخدام نموذج Saleh – Valenzuela لقناة الاتصال. يبين الشكل (6) مقارنة NMSE الخوارزميات AMP , OMP, SD مع الخوارزمية المقترحة ADMM في حالة ULA.

الجدول (1): المعاملات المستخدمة في محاكاة النظام

القيمة	المعامل
256	عدد الهوائيات في محطة القاعدة ULA
$16 * 16 =$ 256	عدد الهوائيات في محطة القاعدة UPA
32	عدد المستخدمين في الخلية K
$6 * K$	عدد الفترات الزمنية Q

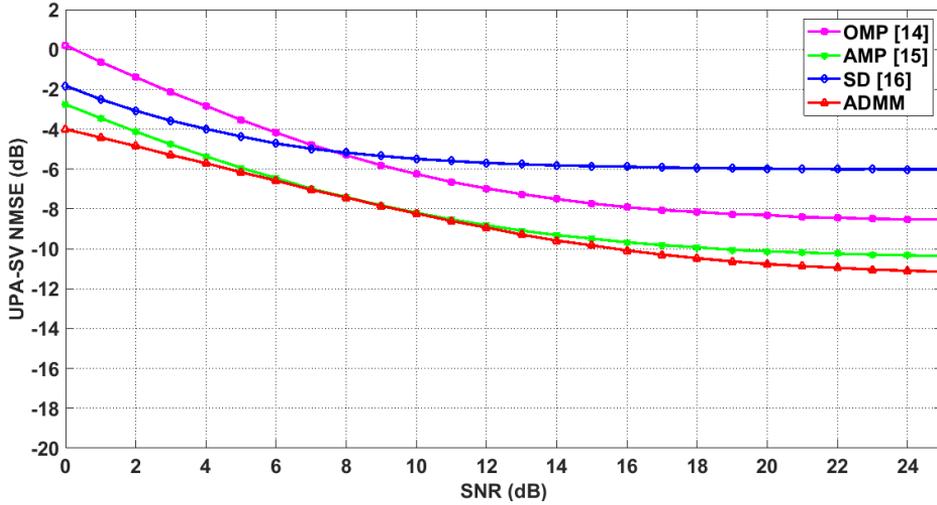
3	عدد المسارات لكل مستخدم L_k
[0, 25]	نسبة الإشارة للضجيج SNR_{dB}
1 w	استطاعة الإرسال P
300 mw	استطاعة السلسلة الراديوية P_{RF}
200 mw	استطاعة المعالج الرقمي P_{BB}

نلاحظ أنه من أجل قيم SNR منخفضة $SNR_{dB} \leq 4$ فإن معدل الخطأ بالاعتماد على $ADMM$ أفضل من معدلات الخطأ لباقي الخوارزميات.



الشكل (6): مقارنة NMSE للخوارزميات OMP, AMP, SD مع الخوارزمية المقترحة ADMM حالة ULA بالاعتماد على نموذج Saleh – Valenzuela لقناة الاتصال

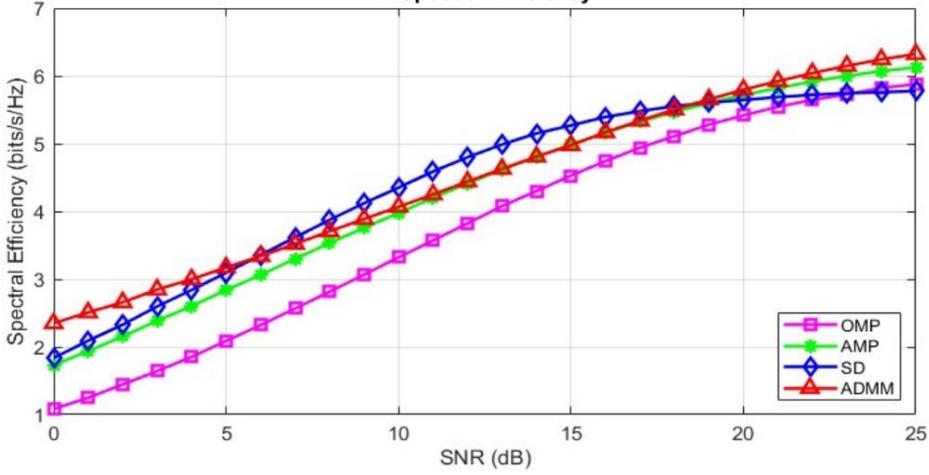
فمن أجل $SNR_{dB} = 0 dB$ نجد أن قيمة معدل الخطأ $NMSE$ لكل من ADMM و SD و AMP و OMP هي على الترتيب $-5.72dB$ و $-3.86dB$ و $-2.75dB$ و $-0.5 dB$ مما يبين مناعة ADMM للضجيج و قدرتها على التخمين بدقة في ظروف القناة الصعبة في حين تتفوق خوارزمية SD في حالة SNR الجيدة $SNR_{dB} > 5$ وذلك لأنها تعتمد على فكرة التكرار و التخمين التدريجي بحيث يتم كشف العنصر الأقوى ثم إعادة حل مسألة التخمين بغض النظر عن العنصر الذي تم تخمينه في الخطوة السابقة مما يحقق تخمين دقيق إلا أنها تحتاج زمن أكبر للبحث عن العنصر الأقوى في كل تكرار كما نلاحظ أيضاً تقارب في الأداء لكل من ADMM و SD و AMP من أجل نسبة إشارة الى الضجيج عالية $SNR_{dB} > 16$ وكلا منها تعطي أداء أفضل من OMP التقليدية . كما يبين الشكل (7) مقارنة الأداء في حالة مصفوفة الهوائيات في محطة القاعدة UPA من أجل نموذج قناة Saleh – Valenzuela . نجد هنا تفوق واضح لطريقة تخمين القناة بالاعتماد على ADMM بالمقارنة مع كل من الخوارزميات AMP و OMP و SD في حالة SNR المنخفضة حيث أعطت $NMSE = -4 dB$ بالمقابل أعطت كل من AMP و SD و OMP معدل خطأ $-2.75dB$ و $-1.82 dB$ و $-0.21 dB$ على الترتيب.



الشكل (7): مقارنة أداء الخوارزميات OMP , AMP , مع الخوارزمية المقترحة ADMM حالة UPA بالاعتماد على نموذج Saleh – Valenzuela لقناة الاتصال

وذلك من أجل $SNR_{dB} = 0 \text{ dB}$ كما نلاحظ تقارب في الأداء بين AMP و $ADMM$ من أجل SNR جيدة نسبياً وبالتالي فإن تخمين القناة بالاعتماد على $ADMM$ يحقق دقة و أداء عال من أجل أنظمة massive MIMO مع وجود مصفوفة هوائي العدسة في كلا الحالتين ULA و UPA وفق نموذج القناة Saleh – Valenzuela مما يساهم في زيادة فعالية تشكيل الحزمة الهجين.

وبين الشكل (8) الفعالية الطيفية المنجزة في حالة تخمين القناة باستخدام كل من الخوارزميات السابقة و نلاحظ أنه من أجل قيم SNR منخفضة $SNR_{dB} \leq 4.5 \text{ dB}$ و قيم SNR عالية $SNR_{dB} \geq 20 \text{ dB}$ فإن الفعالية الطيفية المنجزة باستخدام $ADMM$ أفضل من الفعالية الطيفية المنجزة لكل من SD و AMP و OMP مما يحقق معدلات نقل أعلى في حين تتفوق SD من أجل قيم SNR جيدة. و ذلك لأن $ADMM$ متكيفة مع قيم SNR فهي تحافظ على أداء ثابت تقريباً وهذا ما يميزها عن SD التي يتغير أداؤها مع تغير قيم SNR حيث تزداد فعاليتها فقط أجل قيم SNR جيدة ومناسبة لكشف العناصر الأقوى.



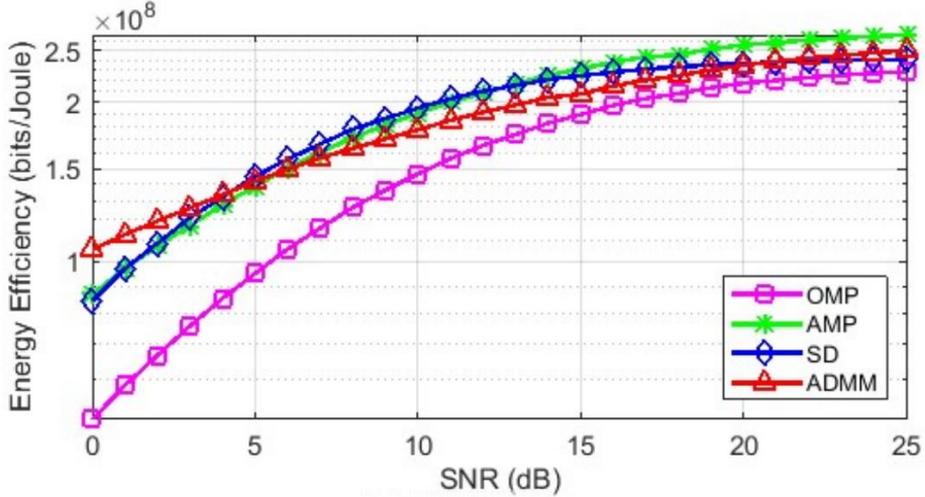
الشكل (8): مقارنة الفعالية الطيفية للخوارزميات AMP , OMP , SD , مع الخوارزمية المقترحة ADMM حالة ULA بالاعتماد على نموذج Saleh – Valenzuela لقناة الاتصال

كما يبين الشكل (9) قيم الفعالية الطاقية المنجزة و تعطى الفعالية الطاقية بالعلاقة (32) [24] :

$$EE = \frac{R_{sum}}{P_t + N_{RF}P_{RF} + N_{RF}P_{PS} + P_p} \left(\frac{bits}{joul} \right) \quad (32)$$

حيث أن P_t استطاعة الارسال الأعظمية و P_{RF} الاستطاعة المستهلكة في كل سلسلة راديوية و $P_p = P_{BB} + P_{processing}$ استطاعة المستخدمة لمعالجة الحزمة الأساسية في المعالج الرقمي والتي تتغير تبعا لخوارزمية التخمين المستخدمة . وحسب الشكل (9) نلاحظ أنه من أجل قيم SNR منخفضة $SNR_{dB} \leq 4.5 dB$ أن الفعالية الطاقية المنجزة باستخدام خوارزمية ADMM أفضل من الفعالية الطاقية لكل من SD و AMP و OMP

في حين تتخفض فعاليتها الطاقية قليلاً مع زيادة SNR . حيث تتطلب معالجة أكثر من SD و AMP.



الشكل (9): مقارنة الفعالية الطاقية للخوارزميات AMP, OMP, SD, مع الخوارزمية المقترحة ADMM حالة ULA بالاعتماد على نموذج Saleh – Valenzuela لقناة الاتصال

6_2_ محاكاة النظام بالاعتماد على نموذج قناة حقيقة DEEP-MIMO:

تمت اجراء محاكاة لنظام الاتصال المليميترى المقترح ضمن قاعدة البيانات DEEP – MIMO نموذج 'O1' The ray-tracing scenario كما موضح بالشكل (10) وهو بيئة خارجية (Outdoor) محاكاة بدقة لدراسة قنوات الاتصال في أنظمة mmWave massive MIMO وتتكون من:

- الشارع الرئيسي: الطول 600m و العرض 40m ، يحتوي على 12 محطة أساسية BS موزعة على جانبيه 6 محطات على كل جانب. المسافة بين المحطات الأساسية على نفس الجانب. 100 m

تخمين قناة الفراغية باستخدام طريقة الاتجاه المتناوب للمضاعفات ADMM

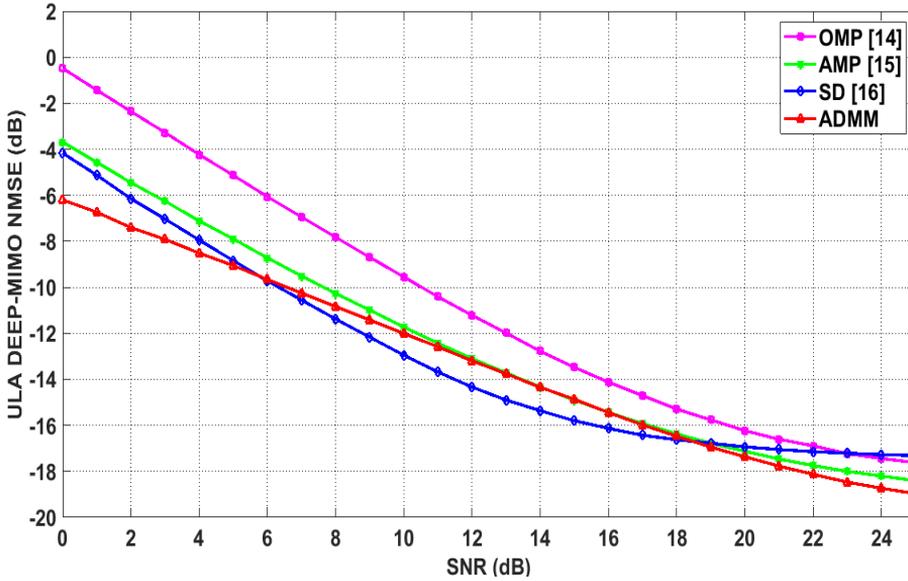
- الشارع الثانوي: الطول $440m$ و العرض $40m$ ، يحتوي على 6 محطة أساسية BS موزعة على جانبيه 6 محطات على كل جانب. المسافة بين المحطات الأساسية على نفس الجانب $150m$.
- التقاطع: نقطة التقاء الشارعين تشكل منطقة حرجة ذات كثافة عالية من الإشارات المنعكسة.
- المباني: مستطيلات صلبة ذات ارتفاعات متفاوتة في الشارع الرئيسي .
- المواد: الشوارع: مادة ITU Dry Earth للمحاكاة لانتشار الإشارات بتردد $60GHz$ أما المباني: مادة ITU Layered Drywall للمحاكية لامتناس وانعكاس الإشارات. و بالاعتماد على المعاملات ذاتها المذكورة بالجدول (1) تم إجراء المحاكاة



الشكل (10): مسقط أمامي وأفقي لبيئة خارجية

Outdoor لنموذج DEEP-MIMO

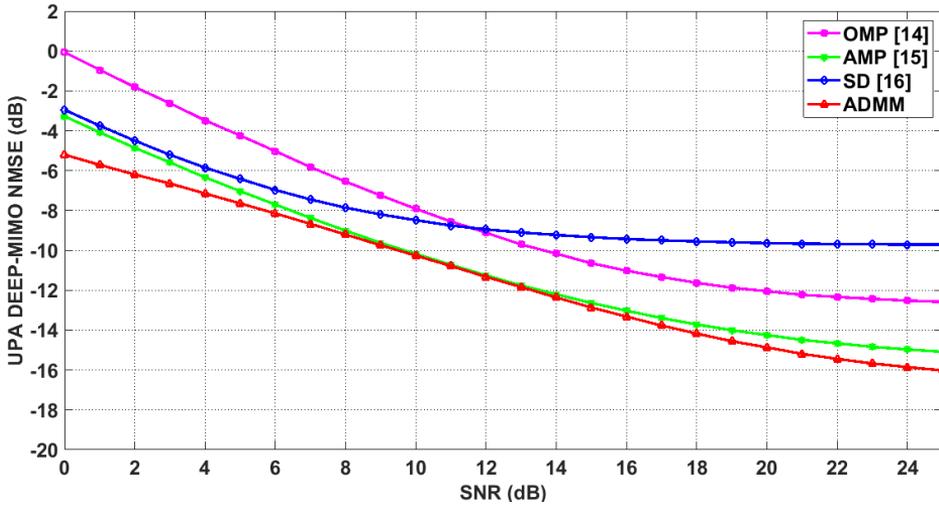
لمقارنة أداء الخوارزميات SD, OMP , AMP مع الطريقة المقترحة لتخمين القناة بالاعتماد على خوارزمية ADMM في حالة ULA و حالة UPA. حيث يبين الشكل (11) مقارنة أداء تخمين قناة نموذج DEEP – MIMO بالاعتماد على الخوارزميات ADMM



الشكل (11): مقارنة أداء الخوارزميات OMP, AMP, SD مع الخوارزمية المقترحة ADMM حالة ULA بالاعتماد على نموذج DEEP-MIMO لقناة الاتصال

و SD و AMP و OMP نلاحظ أنه من أجل قيم SNR منخفضة $SNR_{dB} \leq 4.5 dB$ فإن معدل الخطأ $NMSE$ بالاعتماد على ADMM أفضل من معدلات الخطأ لباقي الخوارزميات فمن أجل $SNR_{dB} = 0 dB$ نجد أن قيمة معدل الخطأ $NMSE$ لكل من ADMM و SD و AMP و OMP هي على الترتيب $-6.2dB$ و $-4.16dB$ و $-3.7dB$ و $-0.047 dB$ أيضاً نجد تفوق ADMM و قدرتها على التخمين بدقة أفضل كما نلاحظ تقارب في أداء ADMM و SD و AMP من أجل نسبة إشارة الى الضجيج عالية $SNR_{dB} > 20 dB$. وكلا منها تعطي أداء أفضل من OMP التقليدية أما من أجل قيم متوسطة تتفوق SD على ADMM. إلا أنها تتطلب عدد كبير من التكرارات وبالتالي تحتاج زمن معالجة أطول نتيجة التعقيد الحسابي. وبالتالي نستنتج أن تخمين القناة بالاعتماد على طريقة ADMM يؤدي لزيادة كبيرة في

جودة و دقة التخمين. كما يبين الشكل (12) مقارنة الأداء في حالة مصفوفة الهوائيات في محطة القاعدة UPA من أجل نموذج قناة DEEP – MIMO نجد هنا تفوق واضح لطريقة تخمين القناة بالاعتماد على ADMM بالمقارنة مع كل من الخوارزميات AMP و OMP و SD في حالة قيم SNR منخفضة $SNR_{dB} \leq 6 dB$ حيث أعطت $NMSE = -5.2 dB$. بالمقابل أعطت

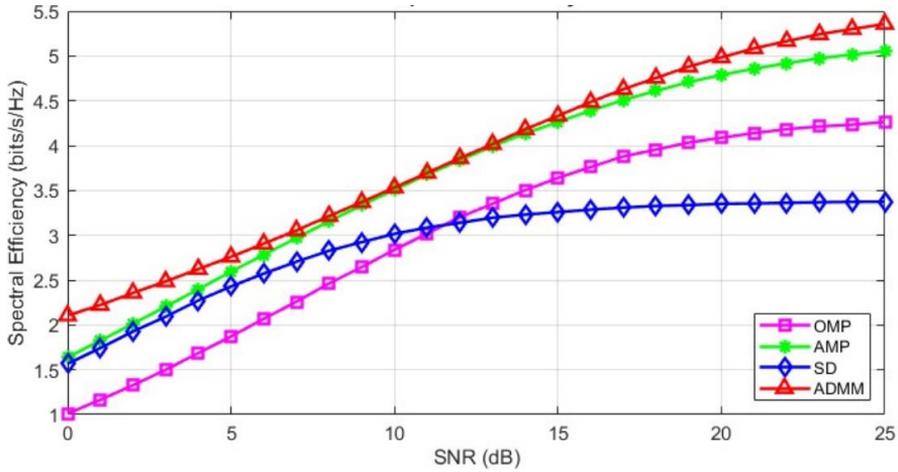


الشكل (12): مقارنة أداء الخوارزميات OMP, AMP, SD المقترحة مع الخوارزمية المقترحة

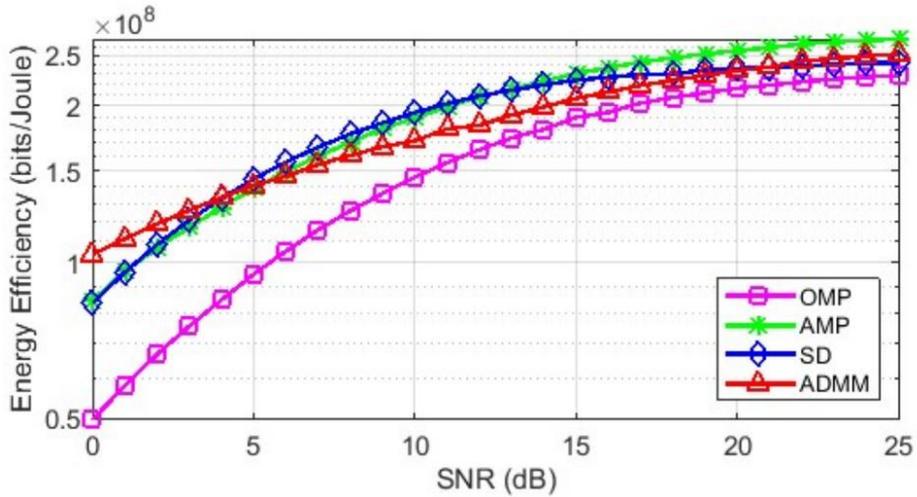
ADMM حالة UPA بالاعتماد على نموذج DEEP-MIMO لقناة الاتصال

كل من AMP و SD و OMP معدل خطأ $-3.27 dB$ و $-2.95 dB$ و $-0.07 dB$ على الترتيب وذلك من أجل $SNR_{dB} = 0 dB$ كما نلاحظ تقارب في الأداء بين AMP و ADMM من أجل SNR جيدة نسبياً.

وبين الشكلان (13) و (14) الفعالية الطيفية و الفعالية الطاقية المنجزة في حالة تخمين القناة باستخدام كل من الخوارزميات السابقة على الترتيب ونلاحظ أن الفعالية الطيفية المنجزة باستخدام ADMM أفضل من الفعالية الطيفية المنجزة لكل من SD و AMP و OMP.



الشكل (13): مقارنة الفعالية الطيفية للخوارزميات AMP , OMP, SD , مع الخوارزمية المقترحة ADMM حالة UPA بالاعتماد على نموذج DEEP-MIMO لقناة الاتصال



الشكل (14): مقارنة الفعالية الطاقية للخوارزميات AMP , OMP, SD , مع الخوارزمية المقترحة ADMM حالة UPA بالاعتماد على نموذج DEEP-MIMO لقناة الاتصال

أما الفعالية الطاقية لخوارزمية ADMM أفضل من الفعالية الطاقية لكل من SD و AMP و OMP فقط من أجل قيم SNR منخفضة وبالتالي فإن تخمين القناة بالاعتماد على ADMM يحقق أداء عالٍ من أجل أنظمة ULA و UPA وفق نموذج القناة DEEP – MIMO أيضاً مما يجعلها مناسبة للتطبيق ضمن نظام 5G و خصوصاً ضمن البيئات التي تعاني من الضجيج العالي.

7_ الخاتمة:

تم اقتراح استخدام طريقة الاتجاه المتناوب للمضاعفات ADMM لتخمين قناة الحزمة الفراغية لنظام massive MIMO يستخدم الأمواج المليمترية . و تم دراسة أداء ADMM و مقارنته مع أداء كل من خوارزمية تمرير الرسائل التقريبي AMP و خوارزمية ملاحقة التوافق المتعامد OMP و خوارزمية كشف العناصر الأقوى SD من خلال حساب الفعالية الطيفية والفعالية الطاقية و الحد الأدنى المعياري لمتوسط الخطأ التربيعي NMSE بين متجه القناة المخمئة \tilde{h}_k و متجه القناة الأصلية h_k باستخدام برنامج Matlab_2023a. حيث تم محاكاة نموذجين مختلفتين لقناة الاتصال الأول يعتمد على نموذج قناة Saleh – Valenzuela والثاني نموذج قناة لبيئة حقيقة DEEP – MIMO. في كل نموذج تم دراسة حالتين لمصفوفة هوائيات محطة القاعدة BS الحالة الأولى مصفوفة الهوائيات الخطية المنتظمة ULA أما الحالة الثانية مصفوفة الهوائيات المستوية المنتظمة UPA. بينت النتائج فعالية ADMM في حالة الضجيج العالية نسبياً حيث تكون قيم $SNR_{dB} \leq 4.5$ في حين يمكن لخوارزمية كشف العناصر الأقوى SD تحقيق أداء أفضل من أجل قيم $4.5 \leq SNR_{dB} \leq 16$ إلا أنها تحتاج لزمان معالجة أعلى و تحتاج لتعقيد حساب أكبر أما من أجل قيم $SNR_{dB} > 16$ يتقارب أداء ADMM مع SD و AMP حيث تعطي كل منها قيم NMSE منخفضة متقوفة بشكل كبير على أداء OMP التقليدية. يمكن أيضاً من خلال استخدام التعلّم العميق و شبكات الذكاء الصناعي تدريب الشبكة على إيجاد قيم معامل التنظيم لبحث تتلاءم مع ظروف القناة و تطبيقات الزمن الحقيقي مما يؤدي لزيادة دقة تخمين ADMM و تخفيض تعقيد المعالجة.

المراجع العلمية :

- [1] Roh, Wonil, et al. **2014** "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results." *IEEE communications magazine* **52.2: 106–113.**
- [2] Mumtaz, Shahid, , et al. **2016** "MmWave massive MIMO: a paradigm for 5G". **Academic Press**,.
- [3] J. Singh, et al. **2024**, "Energy-Efficient Hybrid Beamforming for Integrated Sensing and Communication Enabled mmWave MIMO Systems", *preprint arXiv:2406.03737*,.
- [4] R. W. Heath, et al., **2016**, "An overview of signal processing techniques for millimeter wave mimo systems" **IEEE journal of selected topics in signal processing** 10 436–453.
- [5] R. A. dos Santos et al. **2022** "A high-gain hemispherical dielectric lens antenna operating simultaneously in narrowband or wideband for X-band applications" **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, Volume 21, (Issue 4), Pages 616–622.
- [6] J. Wang, et al. **2024**, "Miniaturized lens antenna with enhanced gain and dual-focusing for millimeter-wave radar system", **Micromachines** 15 335.

- [7] Yong .Z et al. **2015**, "Millimeter Wave MIMO with Lens Antenna Array:A New Path Division Multiplexing Paradigm", **CS.IT** arXiv:1507.01699v1
- [8] Gao, X., Dai, , et al. **2016**. "Near-optimal beam selection for beamspace mmWave massive MIMO systems". **IEEE Communications Letters**, *20(5)*, 1054–1057.
- [9] Brady, John, , et al. **2013** "Beamspace MIMO for millimeter-wave communications: System architecture, modeling, analysis, and measurements" **IEEE Transactions on Antennas and Propagation** 61.7: 3814–3827
- [10] Li, Yunfei, et al. **2024** "Variational bayesian learning based localization and channel reconstruction in RIS-aided systems." **IEEE Transactions on Wireless Communications**.
- [11] Wang, Ximing, et al **2017**. "Beamspace channel estimation for 3D massive MIMO cellular system." **IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT)**..
- [12] Shin, Euiho, et al. **2023** "Broadband Beamforming Using the Least Square Method Improved via Adaptive Diagonal Loading." **Journal of Electromagnetic Engineering and Science** 23.4: 378–380.

- [13] Song, Yi, et al. **2024**"Compressed Sensing Inspired User Acquisition for Downlink Integrated Sensing and Communication Transmissions." **ICC 2024–IEEE International Conference on Communications..**
- [14] Mourad, Nasser, et al.. **2016** "Orthogonal matching pursuit with correction." **IEEE 12th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA).**
- [15] Rangan, S. , et al. **2019**. "Vector approximate message passing". **IEEE Transactions on Information Theory**, 65(10), 6664–6684.
- [16] Gao, Xinyu, et al. **2017** "Reliable beamspace channel estimation for millimeter–wave massive MIMO systems with lens antenna array." **IEEE Transactions on Wireless Communications** 16.9: 6010–6021.
- [17] Long, Xudong, et al. **2022** "Beamspace Channel Estimation Based on Block Support Detection for Millimeter–wave Massive MIMO Systems." **IEEE 24th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP).**
- [18] BOYD. S. , et al, **2011** "Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers", **Foundations and Trends® in Machine Learning** , vol. 3. 1–122

- [19] Bartz, Sedi, , et al **2022** "An adaptive alternating direction method of multipliers." *Journal of Optimization Theory and Applications* 195.3: 1019–1055.
- [20] Alkhateeb, Ahmed, et al. **2019** "DeepMIMO: A generic deep learning dataset for millimeter wave and massive MIMO applications." *arXiv preprint:1902.06435*.
- [21] Zeng, Yong, , et al **2014** "Electromagnetic lens–focusing antenna enabled massive MIMO: Performance improvement and cost reduction." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 32.6\ : 1194–1206.
- [22] Wei, Xiuhong , et al **2020** "Deep learning for beamspace channel estimation in millimeter–wave massive MIMO systems." *IEEE Transactions on Communications* 69.1: 182–193.
- [23] Mo, Jianhua, , et al **2017**"Channel estimation in broadband millimeter wave MIMO systems with few–bit ADCs." *IEEE Transactions on Signal Processing* 66.5:1141–1154.
- [24] Wang, B., , et al. **2017**. Spectrum and energy–efficient beamspace MIMO–NOMA for millimeter–wave communications

using lens antenna array. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(10), 2370–2382.

دراسة مقارنة خواص متانة التحطم لكرات طاحنة محلية ومستوردة مصنوعة من حديد صب عالي الكروم

د. عباد كاسوحة*

م. محمد رامي الجندي*

ملخص البحث:

اجريت دراسة مخبرية على كرات طاحنة محلية ومستوردة مصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم بمحتوى كروم حوالي % 16 وذلك بهدف مقارنة الخواص المتعلقة بمتانة التحطم من خلال اجراء عدد من الاختبارات على الكرات المحلية والمستوردة، وجد من خلال تحليل ومقارنة النتائج تفوق الكرات المستوردة على الكرات المحلية خصوصا في العمر الفني للكرات التي عملت لحوالي 14000 صدمة في اختبار السقوط الحر مقابل حوالي 2100 صدمة ما يفسر متانة التحطم المرتفعة المقترنة مع مقاومة الاهتراء الناتجة عن القساوة الناتجة المرتفعة HRC 62.7 مقابل HRC 54.4 للكرات المحلية كما عززت نتائج اختبار الصدم تفسير متانة التحطم المرتفعة للكرات الطاحنة المستوردة التي نتجت 4 Joule مقابل 2 Joule للكرات المحلية، كما وجد من خلال تحليل صور البنية المجهرية للكرات أن نسبة الكريبيدات المرتفعة في بنية الكرات الطاحنة المحلية % 18.23 تسبب زيادة في هشاشة الكرة وانخفاض في متانة التحطم إضافة الى دور عيوب السكب في تركيز الاجهادات الناتجة عن الصدمات المتكررة وعدم تجانس انتشار الشقوق التعبية بينما وجد أن نسبة الكريبيدات في بنية الكرات المستوردة % 14.9 حققت التوازن المطلوب بين متانة التحطم ومقاومة الاهتراء. تعتبر المعالجة الحرارية وتحسين تقنيات عملية السكب المؤدي الى تقليل عيوب السكب من اهم العوامل اللازمة لتحسين متانة الحطم للكرات الطاحنة المحلية المصنوعة من حديد الصب عالي الكروم.

كلمات مفتاحية:

كرات طاحنة، متانة، تحطم، قساوة، بنية مجهرية.

*طالب دكتوراه - هندسة التصميم والإنتاج - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة
الميكانيكية والكهربائية - جامعة حمص - حمص - سوريا
rami.al.jundi92@gmail.com

** أستاذ مساعد - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية -
جامعة حمص - حمص - سوريا.

Comparison Study for the Fracture Toughness Characteristics of Local and Imported High Chromium Cast Iron Grinding Balls]

*Engineer: Mohamad Rami Al Jundi Dr. Abbad Kassouha**

Abstract:

An experimental study was made to study the fracture toughness characteristics of local and imported high chromium white cast iron grinding balls with 16% Cr content, the analysis of the results were shown that the imported balls have better results as they work for 14000 impacts in the free fall test where the local ones worked for 2100 impacts, this was indicated a good fracture toughness and was matched with a good wear resistance was insured by hardness test results that

came 62.7 HRC for the imported and 54.4 HRC for the local, the Charpy impact test was resulted as 4 joules for the imported and corresponded 2 joules for the local the high percentage of the carbides content in the local balls 18.23% was caused a higher brittleness and reduced the fracture toughness , in addition to the rule of the casting defects that concentrate the repeated impact stresses, where the 14.9% carbides percentage in the imported balls was a reason for the balance between the fracture toughness and the wear resistance.

Heat treatment processes and better casting techniques can lead for improving the high chromium grinding balls fracture toughness.

Key Words:

Fracture, Toughness, Grinding, Impact, Hardness.

***PhD Student–Design and Production Engineering– Design and Production Engineering Department–Homs University–Homs–Syria.**

****Assistant professor– Design and Production Engineering Department–Homs University–Homs–Syria.**

-1 المقدمة:

تشكل الكرات الطاحنة الجزء الأكبر من تكاليف عملية طحن الاسمنت التي تنقسم بشكل رئيسي الى تكاليف الطاقة الكهربائية وبتانة المطحنة والكرات الطاحنة التي تشغل ما يقارب 45 % من اجمالي التكاليف وترتكز الدراسات والأبحاث بشكل كبير على تحسين خصائصها التكنولوجية والاستثمارية من أجل جعلها أكثر استدامة وربحية لكونها من أكثر المطالب

دراسة مقارنة خواص متانة التحطم لكرات طاحنة محلية ومستوردة مصنوعة من حديد صب عالي الكروم

الاستثمارية في الأسواق والتطبيقات الفنية في صناعة الاسمنت حيث تلعب الكرات الطاحنة دورا رئيسيا في تحقيق الاستقرار الفني والربحي لعملية طحن الاسمنت من خلال توفيرها الجودة والوفر الزمني والمالي معاً. (Moema، 2009)

تعتبر مشكلة تحطم الكرات الطاحنة أبرز المشاكل التي تواجه مطاحن الاسمنت والتي تؤدي الى توقفها بشكل متكرر خارج فترات الصيانة والاستبدال الدورية، تستعمل العديد من أنواع الكرات الطاحنة والتي تختلف من حيث التركيب الكيميائي الى كرات فولاذية وكرات حديدية من الحديد الصب وبسبائك مختلفة.

يتم اختيار الكرات الطاحنة وفق المواد المراد طحنها بحيث تحقق شروط مقاومة الاهتراء والتآكل مع التأكيد على تأمين متانة التحطم المثلى لضمان العمر الاستثماري الأمثل للكرات.

تتعدد أنواع الكرات الفولاذية الى كرات من فولاذ مطروق أو فولاذ مصبوب مع عناصر سبائكية مثل الكروم أو المنغنيز أو الكرات الطاحنة المصنوعة من حديد الصب عالي الكربون أو الحديد الصب مع العناصر السبائكية مثل الكروم والنيكل والموليبيديوم، تتغير الخصائص التكنولوجية للكرات الطاحنة بتغير نسب العناصر السبائكية.

يتم اختبار الكرات الطاحنة وفق عدة اختبارات لقياس القساوة مثل اختبار Rockwell و Brinell ومقاومة الاهتراء والتآكل مثل اختبار Pin On Drum ومتانة الصدم والتحطم مثل Ball On Block Test و Ball On Ball Test لتحديد مدى وملائمتها للتطبيقات الهندسية المطلوبة وتبعاً للموا المراد طحنها.

تعتبر الكرات الطاحنة المصنوعة من حديد الصب عالي الكروم أكثر الكرات الطاحنة شيوعاً لما تتمتع به من مقاومة للاهتراء ومتانة التحطم المرتفعة، تعتبر دراسة نسبة الكرييدات في البنية والقساوة نسبة الاوستنيت المتبقي في البنية الناتجة من أهم العوامل الواجب ضبطها والتحكم بها من أجل الحصول على أفضل استثمار للكرات الطاحنة المصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم.

بالرغم من الوصول الى الخصائص التكنولوجية الجيدة للكرات الطاحنة الى أنها لا تضمن الاستثمار مدى الحياة بسبب ظروف العمل التي تسبب التصادمات المتكررة للكرات بين بعضها البعض وبينها وبين بطانة المطحنة مرتفعة القساوة و بسبب التصادمات مع المواد المراد طحنها والتي تشكل ظروف تآكل و اهتراء احتكاكية مباشرة للكرات الطاحنة ، تسبب هذه التصادمات في النهاية انهيار وفشل الكرات الطاحنة وفق عدة اشكال تتراوح بين التشطي من الكرة بأجزاء صغيرة Mini spalling أو التشطي بأجزاء كبيرة Spalling أو التحطم الى نصفين أو أكثر Breakage ، يمكن أن تنتشوه الكرة نشوها لدنا Plastic Deformation نتيجة الصدمات التي تتلقاها ضمن المطحنة ما يسبب انخفاضا في فعاليتها وقدرتها على الطحن. (Blickensderfer، 1989)



الشكل 1- أشكال انهيار الكرات الطاحنة (على اليمين) Breakage و (على اليسار) Spalling

يتم تحديد الخصائص التكنولوجية للكرات الطاحنة مثل قساوتها ومنانتها على التحطم بالإضافة الى دراسة مقاومتها على الاهتراء والتآكل كما تلعب دراسة البنية المجهرية دورا هاما في تحديد سلوك الكرة لمقاومة التحطم الناتج عن الاجهادات الديناميكية التي تتعرض لها الكرة.

2- الهدف من البحث:

دراسة مقارنة خواص متانة التحطم لكرات طاحنة محلية ومستوردة مصنوعة من حديد صب عالي الكروم

دراسة وتحليل الخصائص التكنولوجية لكرات طاحنة مصنوعة من الحديد الصب عالي الكروم واجراء مقارنة بين كرات طاحنة من مصدر محلي وكرات طاحنة مستوردة بالوضع التجاري لهما نفس محتوى الكروم للوصول الى الخصائص الأمثل التي تخدم الصناعة المحلية.

3- المواد والأدوات ومنهجية البحث:

3-1- المواد والأدوات:

- أ- كرات طاحنة محلية الصنع عدد 5
- ب- كرات طاحنة مستوردة عدد 5
- ت- جهاز قص العينات بالسلك
- ث- جهاز شحذ العينات مع أوراق شحذ متعددة الدرجات ومعدات التنميش والصقل
- ج- جهاز التحليل الطيفي
- ح- جهاز اختبار القساوة
- خ- جهاز اختبار السقوط الحر
- د- مجهر ضوئي موصول مع برنامج تحليل الصور ونسب الأطوار

3-2- منهجية البحث:

- 1) اجراء التحليل الكيميائي لعينات من الكرات للتأكد من محتوى الكروم.
- 2) تحضير العينات واجراء اختبارات القساوة لعينات الكرات.
- 3) اجراء اختبار السقوط الحر للكرات.
- 4) مراقبة سلوك الكرات الطاحنة على التحطم خلال اختبار السقوط الحر.
- 5) اجراء اختبار الصدم لعينات من الكرات وفق Charpy.
- 6) اجراء كشف البنية المجهرية للعينات من الكرات بعد شحذها وتلميعها.
- 7) تحليل صور البنية المجهرية وتحديد نسبة الأطوار فيها.
- 8) تحليل وتفسير النتائج ومناقشتها.

4- النتائج ومناقشتها:

أجري اختبار التحليل الكيميائي للعينات المأخوذة من الكرات الطاحنة المصنوعة من حديد الصب عالي الكروم المحلية والمستوردة بعد تحضير العينات وجاءت النتائج كما يلي:

Mo %	Ni %	S %	P %	Mn %	Cr %	C %	Fe %	الكرة
0.7	0.17	0.056	0.026	0.404	15.23	2.3	80.8	المحلية
0.115	0.2	0.92	0.033	0.538	15.68	2.2	77	المستوردة

الجدول 1- نتائج التحليل الكيميائي للكرات المختبرة

ثم أجريت عملية تحضير للعينات من أجل اختبار القساوة على جهاز اختبار Rockwell C وتم اعتماد متوسط حسابي للقراءات المأخوذة من العينات الخمسة للنوعين المدروسين، يبين الجدول 2 قيم القساوة المختبرة:

المتوسط HRC	5	4	3	2	1	الكرة
54.4	53	53.5	56.2	55	54	المحلية
62.7	63	62.5	63	62	63	المستوردة

الجدول 2- نتائج اختبار القساوة للعينات المختبرة

أجري اختبار السقوط الحر للكرات الطاحنة المختبرة من أجل تحديد مقاومتها للصدم والتحطم حيث تم تعريضها للسقوط الحر بشكل متكرر حتى الفشل أو التحطم من خلال إسقاطها على بلاطة صدم من الفولاذ المقسى حتى HRC 63 من ارتفاع 6m بحيث يحاكي السقوط ظروف التصادمات التي تتعرض لها الكرات في المطحنة، تم تحديد عدد الصدمات التي تتحملها الكرة قبل الفشل أو التحطم من خلال رمي الكرات الخمسة لكل نوع بشكل منفرد ثم حساب المتوسط الحسابي للصدمات كما يبين الجدول 3:

دراسة مقارنة خواص متانة التحطم لكرات طاحنة محلية ومستوردة مصنوعة من حديد صب عالي الكروم

الكرة	1	2	3	4	5	المتوسط (صدمة)
المحلية	1855	2100	1940	2480	2125	2100
المستوردة	15800	13390	15100	13025	13300	14123

الجدول 3- نتائج اختبار السقوط الحر للعينات المختبرة

من خلال مراقبة سلوك الكرات على التحطم خلال اختبار السقوط الحر تبين تعرض الكرات لبعض أنواع التشوهات الناتجة عن التصادم مع بلاطة الصدم القاسية، حيث أبدت الكرة المحلية العديد من التشوهات على شكل تشطي أجزاء صغيرة من محيطها الخارجي بعد 800-1000 صدمة وخصوصا قرب قناة الصب الرئيسية للكرة ثم لوحظ الانفصال بالكرة الى جزأين وبشكل مفاجئ عند حوالي 2000 صدمة نتيجة التحطم الناتج عن انتشار الشق التعبي كما تبين الصور أدناه:



الشكل 2 - تشوهات الكرة المحلية قبل التحطم (على اليمين) ، تحطم الكرة الى جزأين (على اليسار)

بينما صدمت الكرات المستوردة حوالي 7500 صدمة قبل تسجيل أي تشوه على السطح الخارجي لها وبعد ذلك لوحظ نشوء شق تعبي رقيق جداً ثم تطور الشق مع تتالي الصدمات الى حتى الوصول الى التحطم بمعدل صدمات حوالي 14000 صدمة، تبين الصور في الشكل 3 مراقبة تطور نمو الشق التعبي في الكرة المستوردة حتى الانهيار والتحطم:



الشكل 3- نشوء الشق التعبي على سطح الكرة الخارجي مع تشظي قرب قناة الصب (الصورة 1) ، تطور الشق التعبي وانتشاره وزيادة عمقه (الصورة 2،3)، انفصال وتحطم الكرة الى جزأين (الصورة 4).

كما أجري اختبار الصدم لعينات قياسية من الكرات الطاحنة المحلية والمستوردة حيث تم أخذ ثلاث عينات من كل كرة من خلال القص بالسلك وفق عينة تشاربي - 10X10X55 mm
45°/ 2mm notch حيث أتت النتائج وفق ما يلي:



الشكل 4- عينة تشاربي على جهاز الصدم واجراء الاختبار

المتوسط Joules	Joules - 3	Joules - 2	Joules - 1	الكرة ١ العينة
1.93	2	1.8	2	المحلية 1
1.6	1.6	1.2	2	المحلية 2
1.83	2	2	1.5	المحلية 3
1.8	2	2	1.4	المحلية 4
2.06	2	2.2	2	المحلية 5
4	4	4	4	المستوردة 1
3.93	4	3.8	4	المستوردة 2
4.06	4.2	4	4	المستوردة 3

دراسة مقارنة خواص متانة التحطم لكرات طاحنة محلية ومستوردة مصنوعة من حديد صب عالي الكروم

4	4	4	4	المستوردة 4
3.93	3.8	4	4	المستوردة 5

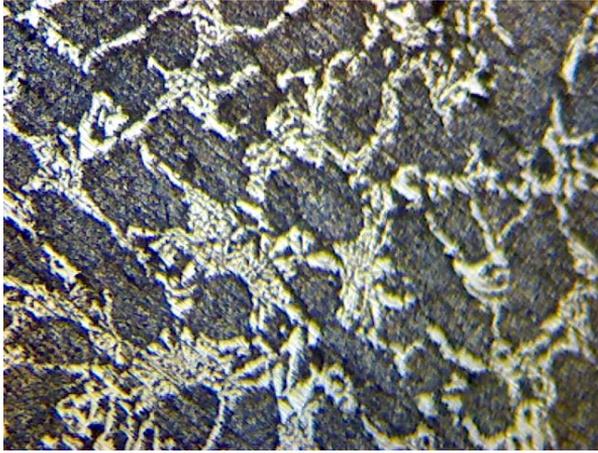
الجدول 4 - نتائج اختبار الصدم وفق عينات تشاربي للكرات المحلية والمستوردة

أجرى كشف للبنية المجهرية للعينات من الكرات الطاحنة باستخدام المجهر الضوئي بعد القيام بعمليات شحذ العينات بالتدرج ثم القيام بعملية التلميع باستخدام مسحوق الألومينا ثم اجراء التتميش باستخدام محلول النيتال حيث أظهر تحليل صورة البنية المجهرية للكرة المحلية باستخدام برنامج J Image ومن خلال تباين الألوان بالضبط الأبيض والأسود أن نسبة الكريبيدات في البنية وصلت الى 18.8% ونسبة من الاوستنيت المتبقي ضمن البنية المارتنسييتية



الشكل 5- صورة البنية المجهرية للكرة المحلية (X800)

بينما لوحظ من خلال تحليل صورة البنية المجهرية للكرة المستوردة أن نسبة الكريبيدات 14.9% بالإضافة الى نسبة من الاوستنيت المتبقي في بنية مارتنسييتية ناتجة عن المعالجة الحرارية للكرة الطاحنة.



الشكل 6- صورة البنية المجهرية للكرة المستوردة (X800)

5- الاستنتاجات والتوصيات:

أظهرت النتائج تحطم الكرة المحلية بعد 2060 صدمة بعد ظهور عدد من التشظيات في محيطها الخارجي مع تتالي الصدمات ما يفسر ضعف في متانتها على التحطم خصوصا بوجود عيوب السكب الداخلية التي لوحظت بعد انهيار الكرة حيث تعتبر المسامية والشقوق الداخلية في البنية سبباً رئيسياً في تركيز الاجهادات ما يساعد في انتشار الشق التعبي و انهيار الكرة بشكل أكبر وعدم القدرة على مقاومة الصدمات المتكررة، بينما تحطمت الكرة المستوردة بعد حوالي 14000 صدمة ما يعكس متانة التحطم المرتفعة فيها بظل وجود عيوب السكب المؤدي الى تجانس توزيع الاجهادات الناتجة عن الصدمات في البنية وانتشار الشق ضمن البنية كما لعبت نسبة الكريبيدات M7C3 في البنية دورا في ذلك ،حيث أن نسبة الكريبيدات المرتفعة في الكرات المحلية 18.23% سببت ارتفاع في مقاومة الاهتراء للكرة لكنها تنتج بنية أكثر مرونة و أقل قابلية لمقاومة انتشار الشقوق التعبية الناتجة عن تتالي الصدمات بينما النسبة الأقل من الكريبيدات في الكرات المستوردة حققت التوازن المطلوب بين متانة التحطم ومقاومة الاهتراء.

دراسة مقارنة خواص متانة التحطم لكرات طاحنة محلية ومستوردة مصنوعة من حديد صب عالي الكروم

كما تبين من خلال تحليل اختبار القساوة أن الكرات المحلية بمعدل HRC 54.4 مقابل 62.7HRC ، حيث أن القساوة تعبر من أهم العوامل في مقاومة التآكل و الاهتراء المرافقة لظروف عمل الكرة الطاحنة لكن الانهيار السريع للكرة المحلية على الرغم من ارتفاع نسبة الكريبيدات فيها الى 18.23 % لكن عيوب السكب سببت نقاط ضعف موضعية في النبة تركزت فيها اجهادات الصدم وسبب الانهيار المبكر، كما تبرز القساوة المرتفعة للكرة المستوردة انعكاساً للمعالجة الحرارية والوصول الى البنية المارتنسييتية المتوازنة مع الكريبيدات.

تبين نتائج اختبار الصدم تشاربي أن الكرة المحلية تحطمت عند 2 Joule بسبب النسبة المرتفعة من الكريبيدات في البنية التي ترفع هشاشة الكرة وتخفض قدرة الكرة على امتصاص الطاقة الناتجة عن الصدمات المتكررة بينما وجد أن الكرة المستوردة تحطمت عند 4 Joule بسبب البنية المارتنسييتية المتجانسة مع الكريبيدات وغياب العيوب في هيكل الكرة. ونتيجة لذلك يمكن استنتاج مايلي:

- 1- تتميز الكرات المستوردة بمتانة تحطم أعلى بالتوافق متانة الاهتراء وذلك بسبب تجانس البنية المارتنسييتية مع الكريبيدات وغياب عيوب السكب وبالتالي فإنها مناسبة للتطبيقات الخاصة بعمليات الطحن التي تتطلب ظروف تآكل مرتفعة.
- 2- تعتبر الكرات الطاحنة المحلية جيدة نسبياً لتطبيقات ذات ظروف تآكل و صدم أقل من المستوردة بسبب انخفاض متانة التحطم الناتجة عن الهشاشة المرافقة لنسبة الكريبيدات المرتفعة و عيوب السكب في البنية.
- 3- تبين نتائج اختبار السقوط الحر أن الكرات المستوردة التي عملت على عدد صمات اكبر تتميز ببنية متجانسة ومتوازنة أكبر.

- التوصيات:

- 1- اجراء المعالجة الحرارية بهدف تحسين بنية الكرات الطاحنة المحلية وتخفيض نسبة الكريبيدات فيها الى حدود نسبة الكريبيدات في الكرة المستوردة أو أقل.

- 2- دراسة عميقة لنسبة الأوستنيت المتبقي في البنية وتخفيضها مقابل زيادة نسبة البنية المارتنسيكية في البنية التي تسبب تحسين خصائص القساوة وممانعة التحطم للكرة الطاحنة.
- 3- العمل على تقليل عيوب السكب والمشاكل الناتجة عنها من خلال تطوير عمليات السكب المحلية للكرات الطاحنة واستعمال طرائق تنقية المعدن وإزالة الغازات من الكرة المسبوكة.

References

1. **MDPI**. 2023. *Development of High Chromium White Cast Irons (HCWCIs) for Wear–Corrosive Environments: A Critical Review*, Metals, Vol. 13, Issue 11, Article 1831. DOI: 10.3390/met13111831.
2. **Springer**. 2020. *Wear Mechanism of High Chromium White Cast Iron and Its Microstructural Evolutions During the Comminution Process*, Tribology Letters, Vol. 68, Article 17. DOI: 10.1007/s11249-020-01317-6.
3. **Ningguo Hexin**. 2023. *Heat Treatment Process for High Chromium Grinding Ball*.
4. **Blickensderfer, R., Tylczak, J. H., & Laird, G.** 1989. *Spalling of High–Chromium White Cast Iron Balls Subjected to Repetitive Impact*.
5. **Younes, R., Sadeddine, A., Bradai, M. A., Aissat, S., & Benabbas, A.** 2021. Investigation on the Influence of Tempering

- on Microstructure and Wear Properties of High Alloy Chromium Cast Iron, *Advances in Materials Science*, Vol. 21, 66–73.
6. **Moema, J. S., Papo, M. J., Slabbert, G. A., & Zimba, J.** 2009. Grinding Media Quality Assurance for the Comminution of Gold Ores, *World Gold Conference*, 27–31.
 7. **Wiengmoon, A.** 2010. Carbides in High Chromium Cast Irons, *Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University*.
 8. **Kootsookos, A., Gates, J. D., & Eaton, R. A.** 1995. "Development of a White Cast Iron of Fracture Toughness $40\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$." *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 7, 239–246.
 9. **Blickensderfer, R., & Tylczak, J. H.** 1989. "Evaluation of Commercial US Grinding Balls by Laboratory Impact and Abrasion Tests." *Minerals & Metallurgical Processing*, Vol. 6, 60–65.
 10. **Filipovic, M., Kamberovic, Z., Korac, M., & Gavrilovski, M.** 2013. Correlation of Microstructure with the Wear Resistance and Fracture Toughness of White Cast Iron Alloys. *Metals and Materials International*, Vol. 19, 473–481.
 11. **Gates, J. D., Bennet, P. J., McInnes, L. J., & Tunstall, B. R.** 2015. The Challenge of Accurate Prediction of Industrial Wear Performance from Laboratory Tests. *UQ Materials Performance*, The University of Queensland

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف

برمجياً باستخدام برنامج *GNU Radio*طالبة الدكتوراه: م. سعاد دوار⁽¹⁾الدكتور المشرف الأساسي: د. ياسر عملة⁽²⁾الدكتور المشرف المشارك: د. عبد الكريم السالم⁽³⁾

الملخص

يدرس هذا البحث تصميم ومحاكاة رادار موجة مستمرة مُعدّلة ترددياً FMCW مُعتمد على راديو مُعرّف برمجياً SDR باستخدام GNU Radio يمكن استخدامه كحل منخفض التكلفة لتحديد مواقع الأهداف. تم تصميم النظام باستخدام برنامج GNU Radio Companion، وبلاستفادة من إمكانيات معالجة الإشارات الرقمية DSP لمحاكاة توليد إشارة FMCW، وانعكاس الهدف، وفك التعديل. تم تحليل البارامترات الرئيسية مثل عرض المجال الترددي، وزمن المسح، ومسافة/سرعة الهدف. كما تم تقييم أشكال موجات سن المنشار والموجة المثلثية في ظروف متشابهة لتقييم مدى ملاءمتها لتطبيقات الرادار.

أجريت معالجة إشارة رادار FMCW باستخدام وحدات تم برمجتها بلغة Python للحصول على طيف الإشارة المستقبلية وبالتالي مسافة الهدف الثابت، ومسافة وسرعة الهدف المتحرك سواء المقترّب من الرادار أو المبتعد عنه. كما تم دراسة تأثير الضجيج على تحديد بارامترات الهدف.

أظهرت عمليات المحاكاة أن شكل موجة سن المنشار يوفر معالجة أبسط لتقدير المدى بفضل مسحه الخطي وتبسيط استخراج تردد النبض، بينما يتيح شكل موجة المثلثية قياس المدى وقياس دوبلر في وقت واحد من خلال استغلال المسح لأعلى ولأسفل، مع زيادة تكلفة المعالجة. يُفضّل

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

شكل موجة سن المنشار للأهداف الثابتة أو بطيئة الحركة، بينما تُفضّل أشكال الموجة المثلثية للسيناريوهات الديناميكية التي تتطلب بيانات السرعة.

الكلمات المفتاحية: الراديو المُعرّف برمجياً، الرادار، موجة مستمرة معدلة ترددياً، تردد النبض، إزاحة دوبلر، مدى الهدف، سرعة الهدف.

(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

Performance Analysis of FMCW Based SDR Radar: A GNU Radio Simulation Study

Abstract

This research investigates the design and simulation of a frequency-modulated continuous wave (FMCW) radar based on a software-defined radio (SDR) using GNU Radio. This radar can be used as a low-cost solution for target location. The system was designed using GNU Radio Companion, leveraging digital signal processing (DSP) capabilities to simulate FMCW signal generation, target reflection, and demodulation. Key parameters such as frequency domain width, sweep time, and target distance/velocity were analyzed. Sawtooth and triangular waveforms were evaluated under similar conditions to assess their suitability for radar applications.

The FMCW radar signal was processed using Python modules to obtain the spectrum of the received signal and, consequently, the distance of a stationary target, as well as the distance and velocity of a moving target approaching or receding from the radar. The effect of noise on target parameterization was also studied.

Simulations have shown that the sawtooth waveform offers simpler processing for range estimation due to its linear sweep and simplified pulse frequency extraction, while the triangular waveform enables simultaneous range and Doppler measurements by utilizing up-and-down sweeps, with increased processing cost. The sawtooth waveform is preferred for stationary or slow-moving targets, while the triangular waveform is preferred for dynamic scenarios requiring velocity data.

Keywords: Software defined radio, radar, frequency modulated continuous waveform, beat frequency, doppler shift, target range, target velocity.

1. المقدمة

ينطوي عمل الرادار على إرسال إشارة في مجال الموجات الميكروية فتعكس هذه الإشارة عن الهدف. جزء من هذا الانعكاس والمسمى بالصدى، يستقبله هوائي الرادار ويُرسله إلى جهاز الاستقبال لإجراء معالجة للإشارة وتحديد اتجاه ومسافة الهدف. يتم حساب مسافة الهدف عن الرادار باستخدام المعادلة [1]:

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

حيث يمثل τ التأخير الزمني بين الإشارة المرسلَة والإشارة المستقبلَة ويقدر بـ [S]. و C هي سرعة الضوء في الخلاء وتقدر بـ $[m/s]$.

العديد من أجهزة الرادار المنتشرة حالياً مكلفة ومعقّدة، مما يجعلها غير مناسبة للعديد من التطبيقات. في الآونة الأخيرة، تم تطوير أحد أهم التقنيات في عالم الاتصالات الراديوية وهي تقنية الراديو المُعرّف برمجياً (SDR) وهو نظام اتصالات راديوي يتم تنفيذ مكوناته مثل الموازج، المرشحات، المضخمات، المبدلات، وأجهزة الكشف، وما إلى ذلك، برمجياً على جهاز حاسب شخصي أو حاسب مُضمّن. يملك SDR بنية أبسط من أنظمة الراديو التقليدية حيث يقوم بمعظم عمليات التعديل وفك التعديل برمجياً [1][2].

توفر تقنية SDR مزايا مهمة مثل المرونة في التشغيل، والتكلفة الأقل، وكونه أسرع وأسهل في التشغيل، التصميم، والتنفيذ. ونظراً لأن تصميم الرادار يعتمد بشكلٍ أساسي على تقنيات الراديو، لذلك فإن تقنية SDR تملك إمكانية عالية لتنفيذها وتشغيلها كرادار [2].

تتناول هذه الدراسة تنفيذ رادار موجة مستمرة مُعدّلة ترددياً (FMCW) باستخدام SDR. والذي يختلف عن الرادار النبضي الشائع الذي يرسل نبضات قصيرة في نطاق زمني دوري. فلا يتطلب رادار FMCW استطاعة إرسال كبيرة للحصول على قيمة كافية لنسبة الإشارة إلى الضجيج لكشف الهدف [2][5].

هناك نوعان من رادار FMCW، هما LFM (تعديل التردد الخطي) و NLFM (تعديل التردد غير الخطي). NLFM سهل التنفيذ، باستخدام التعديل الجيبي على سبيل المثال، ولكن تردد النبض لكل كائن ليس فريداً. أي لا يمكن تمييز الكائنات على مسافات مختلفة، لذلك NLFM مناسب فقط لحالات الكائن المفرد. مع LFM لا تحدث هذه المشكلة لأن تردد النبض فريد لكل هدف. ويمكن استخدام موجة سن المنشار أو الموجة المثلثية في التعديل [3]، وهو النوع الذي سنبحث في بنيته وأدائه في هذه الدراسة.

تركز الدراسات الحديثة على مرونة الراديو المُعرّف برمجياً، كفاءة خوارزميات معالجة الإشارة، حالات الاستخدام في سيناريوهات الأهداف المتعددة، بالإضافة لتخفيف الضجيج. ويتم عرض بعضاً منها فيما يلي:

نفذ الباحث في المرجع [9] نظام رادار SDR-FMCW باستخدام GNU Radio و USRP X310. وحقق دقة مدى $\pm 0.2m$ للأهداف الثابتة. وأخطاء السرعة أقل من $0.5m/s$ للأهداف المتحركة باستخدام معالجة دوبلر القائمة على الطور. ويحد انخفاض الأداء في بيئات متعددة المسارات من استخدامه.

اقترح الباحث في المرجع [10] خوارزمية هجينة لتحويل فورييه السريع مع خوارزمية تصنيف الإشارات المتعددة (FFT-MUSIC) لكشف أهداف متحركة متعددة. أدى ذلك إلى تحسين دقة السرعة بنسبة 30% مقارنةً بتحويل فورييه السريع القياسي. كما أظهرت هذه الدراسة كشفاً لمركبتين على مسافة 100m بسرعة نسبية $10m/s$.

درس الباحث في المرجع [11] قيود SDR-FMCW في البيئات الكثيفة. ولاحظ ازدياد الإنذارات الكاذبة عند استخدام معدل الإنذارات الخاطئة الثابت CFAR (Constant false alarm rate) بنسبة 20%. لأكثر من 5 أهداف. واقترح مُصنفاً قائماً على الشبكات العصبية التلافيفية CNN (Convolutional neural networks) لتقليل الإنذارات الكاذبة.

قام الباحث في المرجع [12] بتحديد تأثير ضجيج طور مُذبذب SDR على أداء FMCW. ولاحظ أنه عندما يكون ضجيج الطور أكبر من $-80dB/Hz$ ، انخفضت نسبة SNR بمقدار $3dB$. وأوصى باستخدام مذبذبات خارجية منخفضة الضجيج للتطبيقات الحرجة.

2. هدف البحث

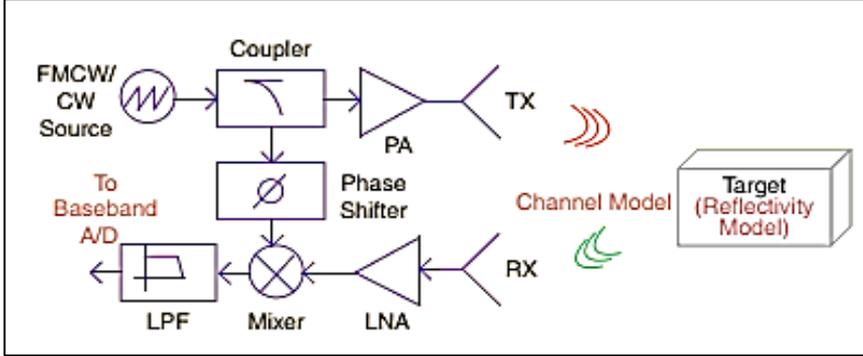
تبحث هذه الدراسة في إمكانية استخدام رادار FMCW المُعتمد على SDR باستخدام GNU Radio لاكتشاف الأهداف الساكنة والمتحركة من خلال مجموعة من عمليات المحاكاة. ويتم

تنظيم البحث بحيث يشرح القسم الثالث مفهوم رادار FMCW. بينما يقدم القسم الرابع عمليات المحاكاة ونتائجها. يعرض القسم الخامس أهم النتائج والأعمال المستقبلية.

3. رادار FMCW

رادار FMCW هو نوع من رادارات الموجة المستمرة CW بحيث تخضع الموجة الحاملة فيه لتعديل ترددي. وبخلاف رادار CW، يمكن لرادار FMCW قياس المسافة التي يقع عندها الهدف بالإضافة إلى السرعة كونه يملك علامة زمنية. فنظراً لأن مدى الهدف يتم الحصول عليه عادةً عن طريق قياس التأخير الزمني ثنائي الاتجاه لمسافة الهدف عن الرادار؛ فلا تستطيع رادارات CW ذات التردد الواحد غير المُعدّل قياس مدى الهدف [1] [4].

يوضح الشكل (1) المخطط الصندوقي لنظام رادار FMCW بشكلٍ مجرد عن آلية تنفيذه سواء باستخدام SDR أو باستخدام شريحة رادار تقليدية. والذي يتضمن مولد تغريدات (إشارة حامل مستمرة يتم تعديلها بواسطة تابع دوري) كإشارة مصدر لجهاز الإرسال وكذلك كدخل لدارة المزج في المستقبل إذا كان الرادار أحادي الثبات monostatic (أي يملك هوائي الإرسال والاستقبال نفس الموقع). يتم تعريف إشارة رادار FMCW بشكلٍ شائع كتغريدة يمكن أن تكون أحد الأشكال المختلفة لموجة الإشارة، وعادةً ما يُستخدم شكل موجة LFM. يتم إرسال إشارة رادار FMCW بواسطة هوائي مرسل باتجاه وجود الأهداف، ثم يتم استقبال الإشارة المنعكسة من بعض الأهداف عبر هوائي استقبال ليتم مزجها مع الإشارة المرسله للمزيد من المعالجة والعرض على الشاشة. يتم تضخيم الإشارة المستقبلية بواسطة مضخم منخفض الضجيج LNA، ثم تنفيذ عملية المزج بواسطة المازج الذي ينتج إشارتين لهما ترددات الجمع والطرح لإشارات الدخل. يسمى تردد الفرق بين الإشارتين إشارة النبض والذي تتناسب قيمته مع المسافة بين الرادار والهدف [2][1] [4][3].



الشكل (1) مخطط صندوقي لرادار FMCW [1][2][3][8].

3.1. رادار FMCW ذو موجة سن منشار

بفرض أن إشارة التعديل هي موجة سن منشار مثالية. بحالة الهدف الثابت، ستتوافق الإشارات المرسله والمستقبله مع الشكل (2). تُعطى الإشارة المرسله بالعلاقة التالية [1][13]:

$$x_t(t) = A_t \cdot \cos \left(2\pi \left(f_c + \frac{B}{2T_c} t \right) t \right) \quad (2)$$

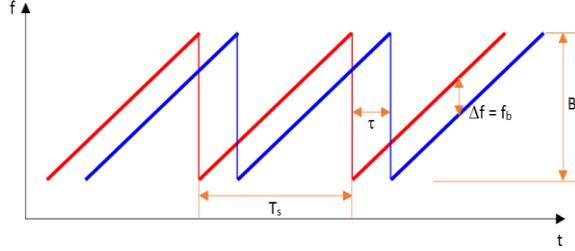
يمثل A_t مطال إشارة الإرسال، f_c التردد الأولي، و T_c دور التعديل (التغريد)، و B عرض المجال الترددي للمسح، و t الزمن داخل فترة مسح / تغريد واحدة.

بعد إرسال إشارة التغريد، ستنعكس عن الهدف، ويستقبلها الطرف الأمامي لجهاز الاستقبال (الهوائي):

$$x_r(t) = A_r \cdot \cos \left[2\pi \left(f_c + \frac{B}{2T_c} (t - \tau) \right) \right] (t - \tau) \quad (3)$$

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

حيث يمثل A_r مطال الإشارة المستقبلية، و τ التأخير الزمني بين إرسال واستقبال الإشارة (يتعلق بالمسافة R عن الرادار، وسرعة الضوء $c = 2.9979 \times 10^8$ [1][13]).



الشكل (2): إشارة تغريد FMCW، يُعبر الخط الأحمر عن سن المنشار المرسل ويُظهر الخط الأزرق سن المنشار المستقبل [1][13].

الإشارة المستقبلية ضعيفة جداً، لذا يتم تمريرها عبر مضخم LNA منخفض الضجيج.

بعد التضخيم، يتم مزج الإشارة الناتجة مع الإشارة المرجعية كما يلي:

$$\begin{aligned} x_t(t) \cdot x_r(r) \\ = A_t \cos(\Omega_t) \cdot A_r \cos(\Omega_r) \end{aligned} \quad (4)$$

بعد مزج الإشارة، تظهر إشارتان لهما الترددات الآتية:

$$\begin{aligned} \Omega_t + \Omega_r = 2\pi \left(2 \left(f_c + \frac{B}{2T_c} t \right) t - f_c \cdot \tau - \frac{B \cdot \tau}{2T_c} t \right. \\ \left. + \frac{B\tau^2}{2T_c} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Omega_t - \Omega_r = 2\pi \left(\frac{B}{T_c} \tau \cdot t + f_c \cdot \tau \right. \\ \left. - \frac{B\tau^2}{2T_c} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

يتم الحصول على تردد النبض من المعادلة (6). لاستخراج هذا التردد، تمر الإشارة الممزوجة عبر مرشح تمرير منخفض لإزالة التردد الأعلى (تردد الجمع). يتناسب تردد إشارة النبض مع المسافة عن الهدف:

$$f_b = \frac{B \cdot \tau}{T_c} \quad (7)$$

$$R = \frac{T_c \cdot C}{2B} f_b \quad (8)$$

➤ دقة تمييز المدى وأقصى مدى لا لبس فيه:

تشير دقة تمييز المدى إلى الحد الأدنى للمسافة بين هدفين والذي يسمح بتمييزهما على أنهما أهداف مختلفة، ويعبر عنه بالعلاقة [13]:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (9)$$

يشير المدى الأعظمي الذي لا لبس فيه إلى الحد الأقصى للمدى الذي يمكن اكتشاف الهدف الموجود عنده. عملياً، يكون المدى الأعظمي أقل من هذا الحد بكثير بسبب التخمد وقيود الاستطاعة [13].

$$R_{Max} = \frac{C \cdot T_c}{2} \quad (10)$$

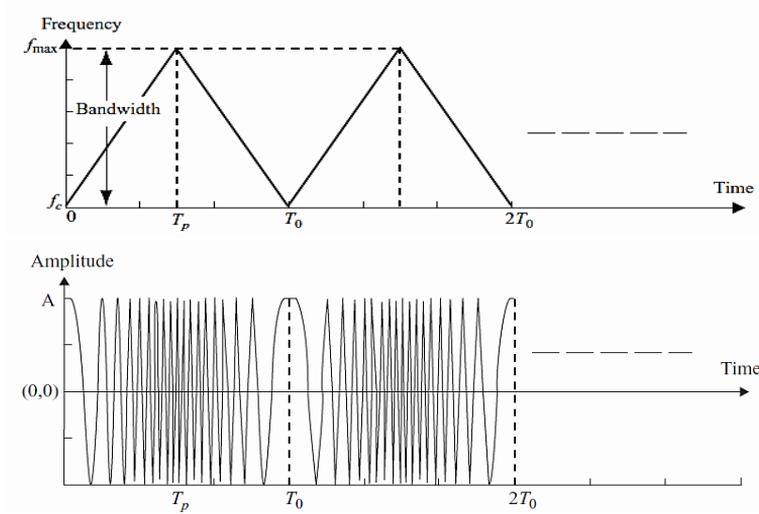
3.2 رادار FMCW ذو موجة مثلثية

بفرض أن إشارة التعديل هي موجة مثلثية مثالية كما هو موضح في الشكل (3). يُعبّر عن الإشارة أو التعريفة المرسل ذات المطال A_t وأدنى تردد لها f_c كما يلي [2] [5]:

$$S_t = A_t \cdot \cos(2\pi f_c t + \pi \mu t^2) \quad (11)$$

$$\mu = \frac{B}{T_p} \quad (12)$$

حيث μ هو معدل تغيير التردد أو معدل التغيريد. يمثل B عرض الحزمة الترددية أي الفرق بين الترددات الأعلى والأدنى. زمن المسح (T_p) هو دور التغيريد (للأعلى أو للأسفل)، و T_c دور الموجة المثلثية الكامل.



الشكل (3): الشكل الموجي المثلثي LFM لرادار FMCW؛ المجال الزمني (اليسار)؛ المجال الترددي (اليمين) [2].

عندما تصل الموجات المشعة من رادار FMCW في الوسط المحيط إلى الهدف، جزء منها سينعكس إلى الرادار. يمكن التعبير عن الموجة أو الإشارة المنعكسة في المجال الزمني بالمعادلة (13) حيث تشير A_r إلى مطال الإشارة المنعكسة [2].

$$S_r = A_r \cdot \cos(2\pi f_c(t - \tau) + \pi \cdot \mu(t - \tau)^2) \quad (13)$$

تملك الإشارة المنعكسة خصائص مشابهة للإشارة المرسله مع زمن تأخير إضافي يُعطى بالعلاقة التالية:

$$\tau = \Delta t = \frac{2R}{C} \quad (14)$$

حيث تشير R و C إلى المسافة بين الرادار والهدف [m]، وسرعة الضوء في الفراغ [m/s]، على التوالي.

بالإضافة لذلك، بما أن إشارة النبض التي ينتجها المازج تتكون من ترددات الجمع والطرح، يتم إضافة مرشح تمرير منخفض لإزالة تردد جمع الإشارتين. ومن ثم، يمكن كتابة إشارة النبض بمطال A_b بعد عملية الترشيح بالشكل [2]:

$$S_b = A_b \cdot \cos(2\pi f_c \tau + 2\pi \mu \tau t) \quad (15)$$

يمكن الحصول على تردد النبض (f_b) باشتقاق طور إشارة النبض كما يلي (تردد النبض مستقل عن الزمن ويتناسب مع مدى الهدف [21]):

$$f_b = \frac{1}{2\pi} \frac{d(2\pi f_c \tau + 2\pi \mu \tau t)}{dt} = \mu \tau \quad (16)$$

باستبدال μ الواردة في (12) و τ الواردة في (14) في تردد النبض المعادلة، نحصل على المدى R ، أي المسافة بين الرادار والهدف:

$$R = \frac{T_p \cdot C}{2B} f_b \quad (17)$$

ثم باستخدام FFT لتحويل إشارة النبض من المجال الزمني إلى مجال التردد، يمكن الحصول على ذروة الطيف الترددي لترجمتها بسهولة إلى المسافة بين الرادار والهدف [2].

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

عندما يكون الهدف ثابت (أي لا يوجد إزاحة دوبلرية في الإشارة المرسلية)، يقيس تردد النبض مدى الهدف، أي $f_b = f_r$. إذا كان تغير انحدار التردد في الإشارة المرسلية هو f' ، يمكن إعطاء تردد النبض بالمعادلة (18). ويوضح الشكل (4) تردد النبض عند استخدام شكل موجة LFM مثلثي للهدف الثابت [2].

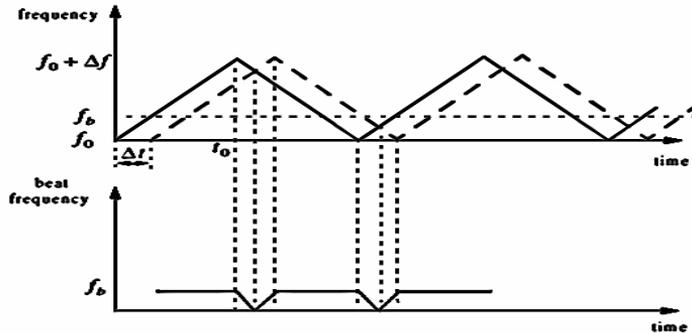
$$\begin{aligned} f_b &= f' \cdot \Delta t \\ &= f' \cdot \frac{2R}{c} \end{aligned} \quad (18)$$

عادةً ما يكون تردد التعديل المختار له الصيغة $f_m = 1/2t_0$ ، ومن هنا جاء معدل تغيير التردد (f') مع ذروة انحراف تردد Δf يمكن التعبير عنها بـ:

$$\begin{aligned} f' &= \frac{f \cdot \Delta t}{t_0} \\ &= 2f_m \cdot \Delta f \end{aligned} \quad (19)$$

بحيث يتم إنشاء تردد النبض على النحو التالي:

$$\begin{aligned} f_b &= f' \cdot \Delta t = \frac{4Rf_m \cdot \Delta f}{c} \\ &= \frac{4Rf_m B}{c} \end{aligned} \quad (20)$$



الشكل (4) شكل موجة LFM المثلثية وتردد النبض لهدف ثابت. [2]

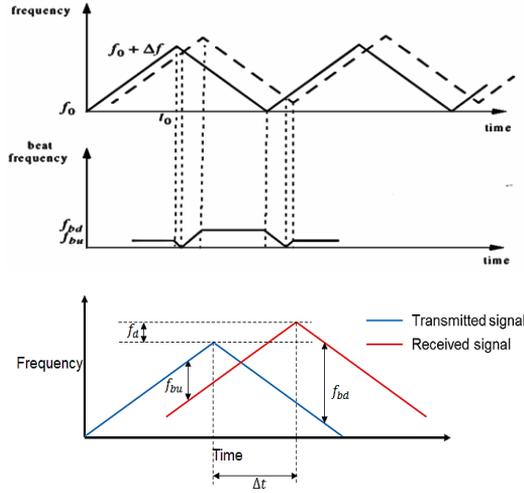
بحالة الهدف المتحرك باتجاه الرادار سيعاني تردد النبض من إزاحة ترددية يُطلق عليها اسم "إزاحة دوبلر". أي يتم إسقاط حركة الهدف إلى إزاحة ترددية "دوبلرية" ويجب أن يُؤخذ تردد النبض في الاعتبار في طرف المستقبل عند فك التعديل. سيؤثر تردد دوبلر على انحدار تردد النبض. فيزداد جزء واحد من تردد النبض وينخفض جزء آخر. هذا يعني أنه سيكون هناك نوعان مختلفان من الترددات النبضية؛ $f_{beat,up}$ لجزء المسح للأعلى و $f_{beat,down}$ لجزء المسح للأسفل. سيتم استخدام مجموع هذه الترددات النبضية للحصول على مدى الهدف وفرقها للحصول على سرعة الهدف. لهذا السبب، عندما يكون الهدف متحركاً، يُفضل استخدام شكل موجة مثلثياً بدلاً من شكل موجة سن منشار للإشارة المرسلة [1] [2].

يوضح الشكل (5) تأثير إزاحة دوبلر الناتجة عن هدف متحرك على الإشارة المستقبلية لشكل الموجة المثلي. وتكون ترددات النبض كما هو موضح بالمعادلات التالية [1]:

$$\begin{aligned} f_{beat,up} &= \frac{2BR}{cT} - f_d \\ &= f_b \\ &\quad - f_d \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} f_{beat,down} &= \frac{2BR}{cT} + f_d \\ &= f_b + f_d \end{aligned} \quad (22)$$

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio



الشكل (5): الشكل الموجي المثلثي LFM وتردد النبض لهدف متحرك [2]. تأثير إزاحة دوبلر على رادار FMCW [2].

يمكن تقدير المسافة والسرعة النسبية لهدف متحرك باستخدام تردد دوبلر في رادار FMCW حيث تُحسب السرعة النسبية (v_r) بالاعتماد على تردد دوبلر (f_d) كما يلي [2]:

$$f_d = \pm \frac{f_{beat,up} - f_{beat,down}}{2} = \pm \frac{2v_r}{\lambda} = \pm \frac{2v_r f_c}{C} \Rightarrow v_r = \frac{c}{4f_c} (f_{beat,up} - f_{beat,down}) \quad (23)$$

$$f_b = \frac{f_{bu} + f_{bd}}{2} = \frac{2B}{cT} \Rightarrow R = \frac{cT}{4B} (f_{beat,up} + f_{beat,down}) \quad (24)$$

v_r هي سرعة الهدف [m/s]، و λ هي الطول الموجي للرادار [m].

4. تصميم ومحاكاة نظام رادار FMCW

تُعدّ محاكاة رادارات FMCW ذات الموجة المثلثية وموجات سن المنشار في GNU Radio أمراً أساسياً لإجراء أبحاث شاملة في مجال الرادار القائم على SDR، وذلك لأنها:

- تُتيح مقارنة مباشرة للأداء في بيئات مُتحكم بها
- تُظهر مزايا كل شكل موجة حسب السيناريوهات الواقعية
- تُوفر أساساً لأنظمة الموجات التكميلية
- تُسهّل تطوير خوارزميات لفصل المدى عن السرعة
- تُولّد مقارنات كمية
- تُتيح إجراء الاختبارات في ظروف متطابقة لتقييم عادل

تم إجراء العديد من عمليات المحاكاة على برنامج GNU Radio من أجل التحقق ممّا إذا كانت منصة رادار FMCW المصممة باستخدام GNU Radio قادرة على اكتشاف الأهداف. ويتم تحديد مواصفات تصميم رادار FMCW قبل البدء بالمحاكاة. وتبعاً لمواصفات التصميم، يتم إنشاء مخطط لمنصة الرادار في برنامج GNU Radio [2].

4.1. الأدوات البرمجية المستخدمة في الدراسة

لبرمجة SDR ليعمل كواجهة أمامية للرادار، فإنه يحتاج إلى الإرسال والاستقبال في وقتٍ واحد عند تردد حامل معين. وبالتالي، يجب أن تكون طريقة برمجة SDR قادرة على تكوين SDR، التحكم في كل من تدفقات البيانات المرسل والمستقبل في وقتٍ واحد، وتوفير طريقة لتنفيذ عمليات معالجة الإشارة الرقمية DSP. والطريقة الأكثر شيوعاً لبرمجة والتحكم في SDRs هي من خلال GNU Radio Companion [5][14].

GNU Radio برنامج مجاني تم نشره لأول مرة في عام 2001م من قبل Eric Blossom. يتضمن مجموعة أدوات مفتوحة المصدر تُشكّل أحد الأطر لـ SDR. ويسمح للمستخدمين ببرمجة مجموعة متنوعة من أجهزة الراديو المُعرّفة برمجياً. وهو مستقل عن منصات الأجهزة ويمكن إعادة

استخدامه من خلال إضافة وحدات خاصة بالنظام يتم برمجتها باستخدام Python كمكون رئيسي وأداة للراديو المُعرّف برمجياً. يتم تحقيق ذلك بدرجة عالية من التجرد وربط الكتل التي تتجمع معاً لإنشاء برنامج متكامل. تعمل هذه الكتل على تمكين برمجة SDR دون الحاجة إلى معرفة الكود الأساسي. بهذه الطريقة، يمكن للمبرمج التركيز على التدفق الإجمالي للبيانات دون الحاجة إلى القلق بشأن مشكلات مستوى الكود. وعلى الرغم بأنه ليس مهيباً كأداة محاكاة، يمكن استخدامه بمفرده لتقديم نتائج محاكاة لأي نظام رادار [1][5][6][7][8].

يتكون GNURadio من وحدات تستخدم في معالجة الإشارة كوحدات FFT، الترميز/فك الترميز، التعديل/فك التعديل، المسويات equalizers ومرشحات الإشارة. هذه الوحدات متصلة بواسطة مسار البيانات لتشكيل مخطط تدفقي يشير إلى اتجاه تدفق البيانات. كما يحتوي GNU Radio على مكتبة وحدات معالجة الإشارة لتطبيق الراديو المُعرّف برمجياً على عتاد صلب RF خارجي [6][7].

4.2. بارامترات المحاكاة

1. **معدل أخذ العينات:** ستؤثر قيمة معدل أخذ العينات على عرض المجال الترددي وبالتالي دقة تمييز المدى (أصغر مسافة للتفريق بين هدفين متجاورين) وذلك بحسب المعادلة (9). فكلما زاد عرض الحزمة سيزيد معدل أخذ العينات المطلوب لتحقيق شرط نايكوست وبالتالي تقل قيمة دقة تمييز المدى (أي تزيد حساسية التفريق بين الأهداف). وعلى الرغم بأن القيمة الأعلى قد تقلل قيمة دقة تمييز المدى، لكنها ستزيد من العبء الحسابي [1].
2. **قيمة عرض المجال الترددي:** يجب أن تتوافق القيمة المستخدمة لعرض المجال الترددي مع نظرية نايكويست. وباستخدام عرض حزمة ترددية أكبر، سيتطلب ذلك قيمة أكبر لمعدل أخذ العينات، وبالتالي عبئاً حسابياً أكبر [1].

3. شكل الموجة: لمحاكاة الهدف الثابت، سيتم استخدام شكل موجة سن المنشار لأنه

أبسط، ولكن لعمليات محاكاة حركة الهدف، يُستخدم شكل الموجة المثلثية.

5. تصميم رادار FMCW ذو موجة سن منشار

تُجرى محاكاة رادار FMCW مُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio بدون تجهيزات مادية بهدف نمذجة نظام الرادار ومعالجة الإشارات لكشف أهداف متعددة وتقدير مداها وسرعتها.

يتضمن تصميم رادار FMCW على GNU Radio محاكاة إشارة الإرسال، وتوليد إشارة منعكسة اصطناعية، ومعالجتها لاستخلاص مدى الهدف وسرعته. وتُلخص خطوات بناء المحاكاة بما يلي:

- 1) توليد الإشارة: توليد إشارة تغريد FMCW بعرض حزمة ترددية ودور تغريد محددين.
- 2) محاكاة الهدف: محاكاة تأثير أهداف متعددة من خلال تطبيق تأخيرات مناسبة (للمدى) وإزاحات دوبلر (للسرعة) على الإشارة المرسله لإنشاء الإشارة المستقبلية.
- 3) المزج: مزج الإشارات المرسله والمستقبلية لإنتاج إشارة النبض (إشارة التردد المتوسط IF).
- 4) الترشيح: تطبيق مرشح تمرير منخفض LPF لإزالة مكونات التردد العالي وعزل ترددات النبض.
- 5) معالجة تحويل فورييه السريع FFT: تنفيذ تحويل فورييه السريع على إشارة النبض المرشحة LPF لتحويلها إلى المجال الترددي. وتتوافق القمم في الطيف مع ترددات نبض الأهداف.
- 6) كشف الذروة: تحديد القمم في طيف تحويل فورييه السريع لتحديد ترددات نبض الأهداف.
- 7) حساب المدى والسرعة: تحويل ترددات النبض إلى مدى وسرعة لكل هدف.
- 8) الإظهار: عرض طيف تحويل فورييه السريع وقيم المدى والسرعة المقدرين لكل هدف.

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

وتجدر الإشارة بأن القيم النموذجية لبارامترات الأهداف (المدى R ، السرعة V ، المقطع العرضي الراداري للهدف RCS) والتي تتوافق مع معايير الصناعة (SAE,ISO,ETSI) بحالة تطبيقات المركبات مثلاً، وبوجود الفوضى clutter وتعدد المسارات multipath [16][17]:

➤ سيارة: $R = 90m, v = 15m/s, RCS = 1.0$

➤ دراجة: $R = 120m, v = -5m/s, RCS = 0.5$

➤ هدف ثابت: $R = 200m, v = 0m/s, RCS = 0.1$

5.1. محاكاة هدف مفرد ثابت

يتم تحديد بارامترات تحاكي سلوك الرادار القائم على SDR في العالم الحقيقي كما هو مذكور في الجدول (1) من أجل هدف ثابت يبعد عن الرادار مسافة $R = 100m$ ، ويتحرك بسرعة $v = 0m/s$.

الجدول (1) بارامترات محاكاة رادار FMCW قائم على SDR.

2.4GHz	التردد المركزي f_c
100M Sample/s	معدل أخذ العينات
10μs	دور التفرقة T
50MHz	عرض الحزمة B
$\Delta R = \frac{c}{2B} = 3m$	دقة تمييز المدى
$R_{max} = \frac{cT}{2} = 1500m$	المدى الأقصى الذي لا لبس فيه

تتكون منصة الرادار التي تم تصميمها في GNU Radio من عدة وحدات كما هو مبين في الشكل (6). ونذكر فيما يلي وحدات المحاكاة الأساسية:

✓ مصدر الإشارة Signal Source: يُولّد شكل موجة سن المنشار التي تتحكم بكتلة VCO. بقيمة تردد: $1/T = 1KHz$ (معدل تكرار الذبذبة).

✓ VCO: يُنشئ إشارة التغيريد.

✓ التأخير Delay: يُحاكي زمن رحلة الإشارة لمسافة الهدف، ويُحسب عدد عينات التأخير الموافق لرحلة الإشارة بالعلاقة:

$$N = \text{round} \left(\frac{2R}{c} \cdot f_s \right) \quad (25)$$

وبالنسبة لـ $R = 90m$ ، يكون عدد عينات تأخير رحلة الإشارة $\times 100 = \frac{2 \times 90}{3 \times 10^8}$ و $60 \text{ samples} \approx 10^6$. ولإيجاد قيمة التأخير مقدراً بالثانية:

$$\tau = N \cdot \frac{1}{f_s} \quad (26)$$

وبالتالي من أجل المثال السابق يكون: $\tau = N \cdot \frac{1}{f_s} = 60 \cdot \frac{1}{100 \times 10^6} = 0.6 \mu s$

✓ مصدر الضجيج Noise Source: يُضفي واقعية على الإشارة المُستقبل.

✓ مُحوّل فورييه السريع FFT: يحسب طيف تردد النبض.

✓ مرشح الترددات المنخفضة Low-Pass Filter: وتردد القطع $B/2$.

✓ كاشف الذروة Peak Detector: يُحدد قطب تردد الذروة في تحويل فورييه السريع (أي

مُكوّن التردد المهيمن). ويتم ضبط العتبة Threshold بحيث نتجنب ذروات الضجيج.

ومنها يمكن حساب المدى باتباع الخطوتين:

• حساب تردد النبض (f_{beat}): $f_{beat} = \frac{\text{Peak Bin Index} \cdot f_s}{N}$. وتمثل N حجم

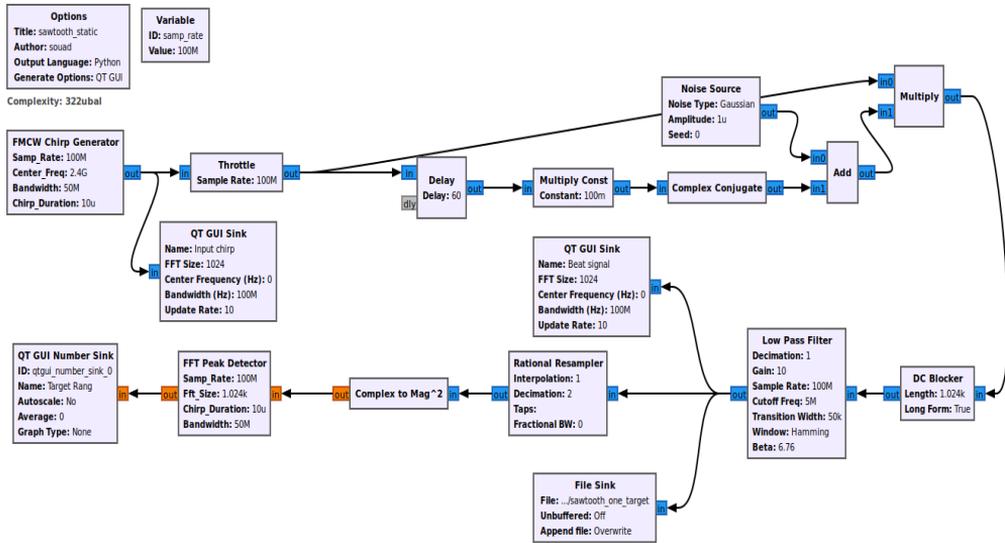
تحويل فورييه السريع [21][20].

• ثم يتم حساب المدى (R) وفقاً للمعادلة (8): $R = \frac{T_c \cdot c \cdot f_{beat}}{2B}$. فإذا كان

$$R = \frac{3 \times 10^8 \cdot 10 \times 10^{-6} \cdot 3 \times 10^6}{2.50 \times 10^6} = 90m, f_{beat} = 3MHz$$

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

يتم محاكاة فقدان المسار Attenuation باستخدام وحدة الضرب بثابت Multiply Const. وتستخدم وحدة الخانق throttle لتحديد سرعة المحاكاة بالزمن الحقيقي وكونها تتيح استخدام المعالج بكفاءة من خلال التحكم بتدفق عينات البيانات عبر المخطط التدفقي بأكمله. تمر الإشارات المرسل والمستقبل عبر وحدة ضرب Multiply والتي تعمل كمازج للإشارات المرسل والمُستقبل من أجل الحصول على إشارة بتردد النبض $f_{beat} = \frac{2BR}{cT} \pm f_a$. وبإجراء تحليل FFT لإشارة المزج، يتم الحصول على فرق التردد للإشارة المرسل والمستقبل.

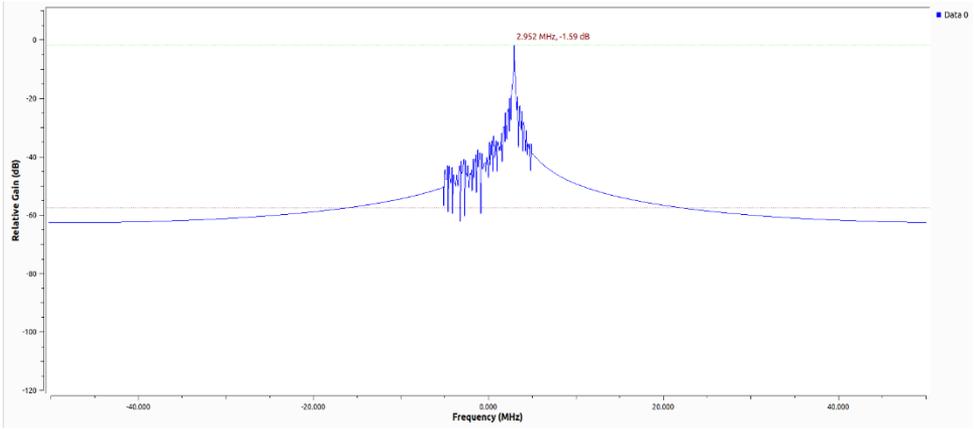
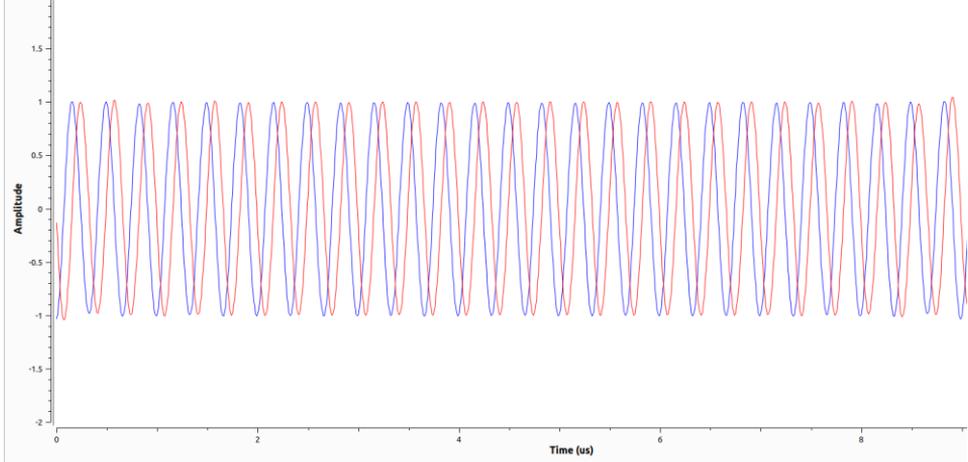


الشكل (6): المخطط الانسيابي GRC لرادار FMCW بحالة هدف ثابت واحد يقع عند مسافة

$$R = 90m \text{ وهذا يتوافق مع تأخير زمني } \tau = 60 \text{ sample}$$

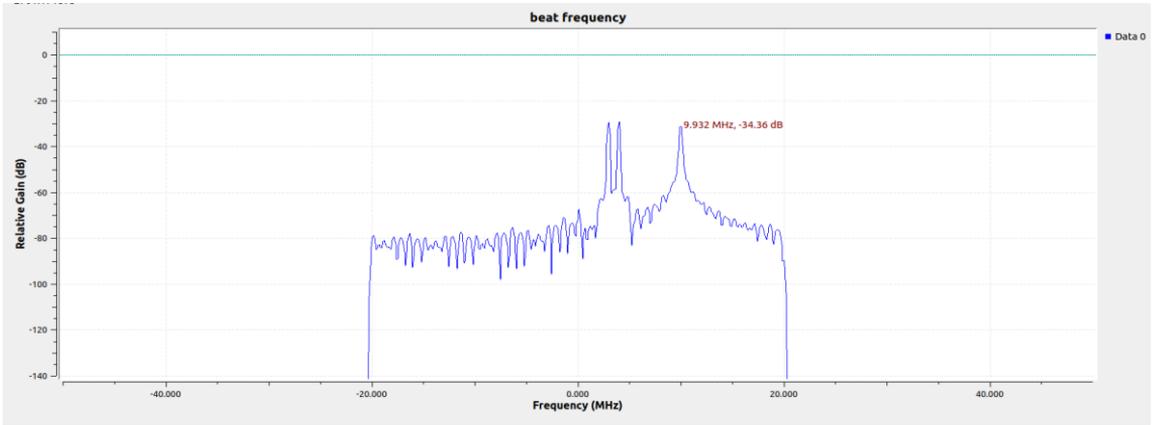
يوضح الشكل (7) نتيجة محاكاة رادار FMCW التي تم إجراؤها وفقاً للمخطط السابق (a) إشارة النبض لهدف واحد في المجال الزمني، و(b) طيف الإشارة في المجال الترددي حيث تمثل الذروة الفردية تردد النبض. وتجدد الإشارة بأن تردد النبض (2.952MHz) الذي تم الحصول عليه من خلال المحاكاة يتفق مع القيمة النظرية المحسوبة وفق العلاقة (7) (3MHz) وتكون قيمة الخطأ في قياس المدى نتيجة لتأثيرات الضجيج (= 90 - 88.56 = $R_{theoretical} - R_{simulated}$)

1.44m)، مما يؤكد قدرة المنصة المقترحة في المخطط الانسيابي (6) على الحصول على مدى الهدف.



الشكل (7): إشارة النبض لهدف ثابت واحد يقع عند مسافة $R = 90m$ (في الأعلى)، طيف التردد النبضي $f_{beat} = 2.952MHz$ (في الأسفل).

5.2. محاكاة أهداف ثابتة



الشكل (9): طيف إشارة النبض لثلاثة أهداف ثابتة تقع عند $R1 = 90m, R2 = 120m, R3 = 300m$

$$f_{1,beat} = 2.921MHz, f_{2,beat} = 3.996MHz, f_{beat} = 9.973MHz$$

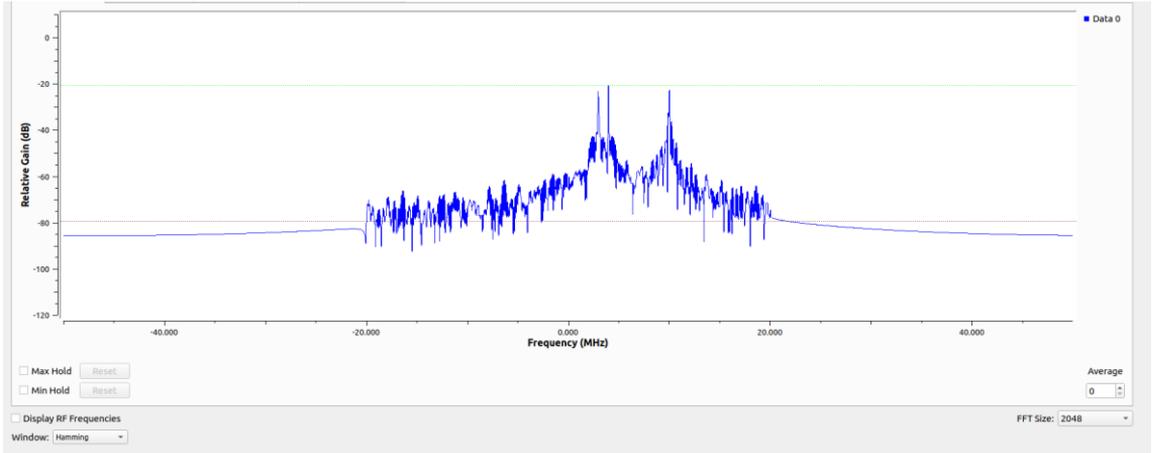
بالنسبة لثلاثة أهداف، سيكون إشارة النبض أكثر تعقيداً من الحالة السابقة. يوضح الشكل (9) طيف إشارة النبض لثلاثة أهداف تقع عند $R1 = 90m, R2 = 120m, R3 = 300m$ والتي تتوافق مع تأخيرات زمنية وفق العلاقاتين (25) و (26) $\tau1 = 60sample = 0.6\mu s, \tau2 = 80sample = 0.8\mu s, \tau3 = 200sample = 2\mu s$ وتظهر ترددات النبض الناتجة عن المحاكاة بالقمم الموافقة للقيم التالية: $f_{1,beat} = 2.921MHz, f_{2,beat} = 3.996MHz, f_{beat} = 9.973MHz$ ومن هذا الطيف يتم الحصول على معلومات المسافة للأهداف الثلاثة. من أجل التبسيط، سيكون للأهداف الثلاثة نفس المطال. وتجدر الإشارة بأن هذا المخطط الانسيابي قادر على الكشف عن أهداف مختلفة طالما أن الفاصل بينهما أكبر من دقة تمييز المدى.

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

الجدول (2) اختلافات قيم مدى الهدف بين القيم النظرية والقيم الناتجة عن المحاكاة.

مقدار الخطأ	القيمة الناتجة عن المحاكاة	قيمة المدى النظرية
$\Delta R1 = 2.37m$	$R1 = 87.63m$	$R1 = 90m$
$\Delta R2 = 0.12m$	$R2 = 119.88m$	$R2 = 120m$
$\Delta R3 = 0.81m$	$R3 = 299.19m$	$R3 = 300m$

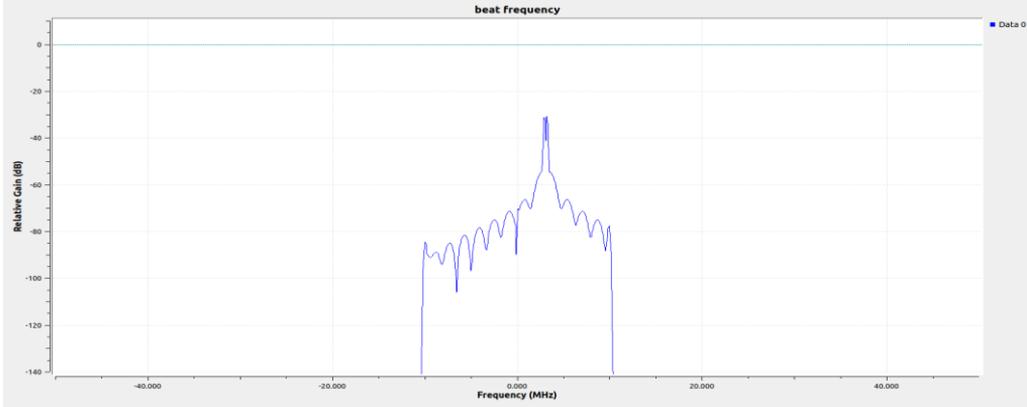
تجدر الإشارة بأن الحالات السابقة تم إجراء المحاكاة بالأخذ بالاعتبار أن حجم تحويل فورييه السريع FFT بالقيمة 1024، ومن أجل حجم FFT يبلغ 2048 وبما يتفق مع الحالة السابقة لثلاثة أهداف ثابتة سيكون بالشكل (10)، حيث تظهر القمم أكثر حدةً ووضوحاً.



الشكل (10) طيف إشارة النبض لثلاثة أهداف تقع عند $R1 = 90m, R2 = 120m, R3 = 300m$ عند حجم FFT يبلغ 2048.

يوضح الشكل (11) طيف تردد النبض بحالة هدفين متقاربين يقعان عند المسافة $R1 = 90m, R2 = 96m$ والتي تتوافق مع تأخيرات زمنية $\tau1 = 60sample = 0.6\mu s, \tau2 =$

96sample = 0.64μs، ويتضح من الشكل مدى تقارب القمم الموافقة للهدفين مما يعيق التفريق بينهما ويظهران كهدف مفرد.



الشكل (11) طيف تردد النبض بحالة وجود هدفين يقعان عند المسافات $R1 = 90m, R2 = 96m$.

6. تأثير الضجيج على تقدير بارامترات الهدف (المدى)

عندما يتم إرسال واستقبال إشارة في الزمن الحقيقي فإنها تعاني من التخامد في وسط الانتشار غير المثالي بسبب تأثيرات الضجيج، التي تجعل من الصعب اكتشاف الهدف. لمحاكاة تأثير الضجيج في رادار FMCW يعمل بتردد 2.4GHz ذي شكل موجة سن منشار وهدف ثابت باستخدام GNU Radio، كما هو موضح بالشكل (12) نستخدم البارامترات الواردة في الجدول (3). ستشمل المحاكاة توليد الإشارة، وانتشارها، وإضافة الضجيج، ومعالجة الإشارة لاستخراج مدى الهدف. الجدول (3) بارامترات محاكاة رادار FMCW ذو موجة سن منشار لدراسة تأثير الضجيج.

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

2.4GHz	تردد الموجة الحاملة
100MHz	عرض الحزمة الترددية B
1ms	مدة التفرقة T_c
15m	مسافة الهدف

باعتبار الإشارة المستقبلية $V_r = \alpha \cdot V_t$ حيث V_t هي الجهد المرسل (يقدر بالفولت) و α عامل التخميد. وتكون الاستطاعة متناسبة مع مربع الجهد: $P_s \propto |V_r|^2 = |\alpha|^2 \cdot |V_t|^2$. [18][19][20]

فإذا كان V_t موحد (normalized) (كما في المحاكاة $V_t = 1$)، سيكون: $P_s = |\alpha|^2$ بدون واحدة.

تُضبط استطاعة الضجيج كما يلي [18][19][20]:

- استطاعة الإشارة (بعد التخميد): $P_s = |\alpha|^2 = 0.01$
- استطاعة الضجيج ((ضجيج عقدي)) من أجل نسبة الإشارة إلى الضجيج المطلوبة:

$$\sigma = \sqrt{\frac{P_n}{2}}, \quad P_n = \frac{P_s}{10^{SNR/10}} \quad (27)$$

وأيضاً P_n بلا واحدة وكذلك σ .

- ومن أجل $SNR = 10dB \rightarrow P_n = 0.001 \rightarrow \sigma = \sqrt{0.0005} \approx 0.022$

يتم حساب تردد النبض لهدف يبعد عن الرادار مسافة 15m، بالمعادلة:

$$f_b = \frac{B \cdot 2R}{c \cdot T_c} \quad (28)$$

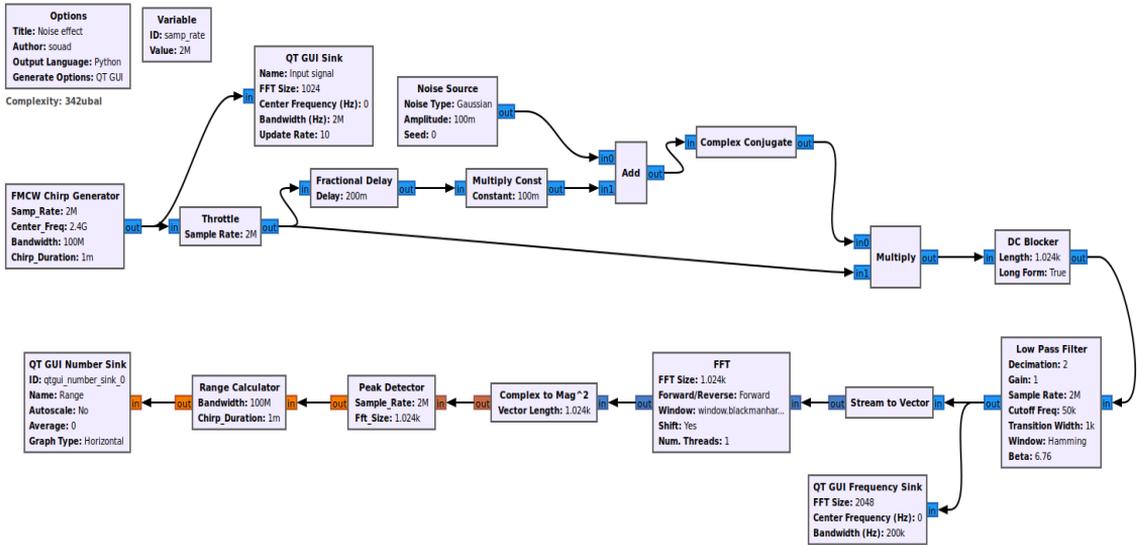
$$f_b = \frac{100e6 \cdot 30}{3e8 \cdot 0.001} = 10 \text{ kHz}$$

لقياس ذروة نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR في المجال الترددي نتبع العلاقة:

$$Peak \text{ SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{Peak \text{ Power}}{Mean \text{ Noise Power}} \right) \quad (29)$$

للتحقق من تأثير الضجيج نقارن القيمة النظرية للمدى مع القيمة الناتجة عن المحاكاة. ونحسب خطأ التقدير:

- المدى النظري: $d_{true} = 15m$
- المدى المقدر (نتيجة المحاكاة): $\hat{d} = \frac{c \cdot T_c \cdot f_b}{2B}$ ، ويمثل f_b تردد النبض المُقاس.
- الخطأ: $|\hat{d} - d_{true}|$



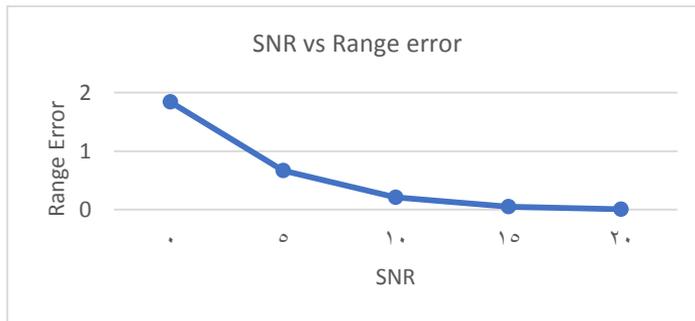
الشكل (12) المخطط الانسيابي لرادار FMCW بوجود الضجيج.

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

بمراقبة الذروة الناتجة عند تردد $10kHz$ في مخطط طيف الإشارة، يتضح أنه كلما زاد الضجيج انخفضت نسبة الإشارة إلى الضجيج، وزاد عرض الذروة التي يظهر عندها الهدف كما هو موضح بالشكل (13). وتجدر الإشارة أنه بالنسبة للإشارات الحقيقية، يُنتج تحويل فورييه ذروتين (ترددات موجبة وسالبة).

الجدول (4) نتائج محاكاة هدف ثابت وحيد من أجل نسبة $SNR = 10dB$.

القيمة	المعيار
15.02m	المدى المُقاس
0.02m	خطأ المدى
1.21KHz	عرض حزمة 3dB
9.8dB	ذروة SNR (المقاسة)

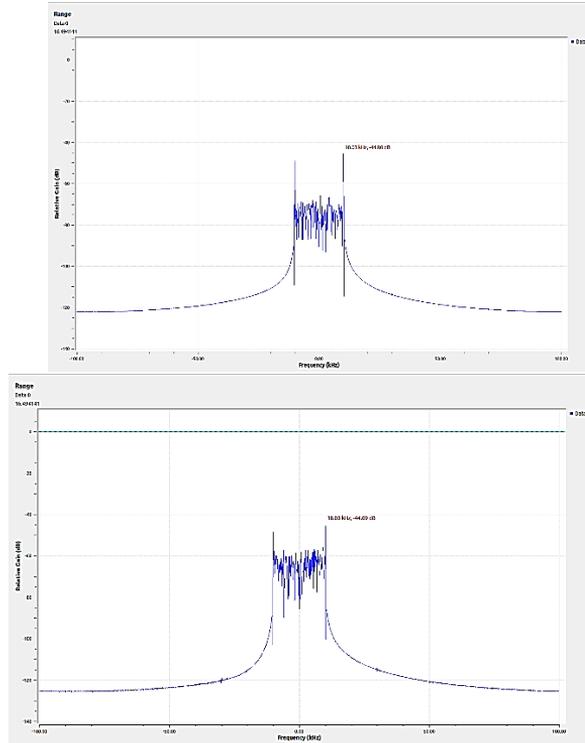


الشكل (13) تغير خطأ المدى باختلاف نسبة SNR.

وبإجراء تجارب محاكاة متعددة من أجل قيم مختلفة لـ SNR تكون قيم الخطأ وعرض القمة في طيف تردد النبض كما هو موضح بالجدول (5)، حيث تتناقص قيمة خطأ المدى بشكل أسي بزيادة نسبة SNR وتصبح القمم الموافقة لتردد النبض أضيّق.

الجدول (5) خطأ المدى وعرض قمم تردد النبض من أجل نسب SNR متعددة.

3dB	BW (kHz)	متوسط الخطأ	SNR (dB)
	4.73	1.84	0
	2.15	0.67	5
	1.21	0.21	10
	0.87	0.05	15
	0.81	0.01	20



الشكل (14) طيف تردد النبض: عند $SNR = 20dB$ (على اليمين)، وعند $SNR = 10dB$ (على اليسار).

7. محاكاة نظام رادار FMCW معتمد على SDR ذو موجة مثلثية

تتناوب في الموجة المثلثية عمليات مسح الترددات المتزايدة "التغريدة الصاعدة" والمنخفضة "التغريدة الهابطة". يُشتق قياس المدى من تردد النبض ضمن التغريدة الصاعدة/الهابطة المفردة. وتُحسب السرعة من انزياح دوبلر بين التغريدات الصاعدة/الهابطة.

7.1. محاكاة هدف متحرك مفرد

من أجل إعداد محاكاة هدف متحرك واحد يتم تطبيق البارامترات الواردة في الجدول (6) من أجل تحديد مواصفات الكتل في المخطط الانسيابي الذي تم تنفيذه في GNU Radio كما هو موضح بالشكل (15).

هناك نوعان من عمليات المحاكاة التي يمكن إجراؤها للكشف عن حركة الهدف؛ الأول هو محاكاة تحريك الهدف ليقترّب إلى الرادار والثاني هو محاكاة تحريك الهدف بعيداً من الرادار. تعتمد إزاحة دوبلر بشكلٍ مباشر على سرعة الهدف وتكون قطبية السرعة:

- سالبة إذا كان الهدف يقترّب من الرادار: $f_{up} > 0$
- سالبة إذا كان الهدف يقترّب من الرادار: $f_{beat,down} > f_{beat,up}$
- موجبة إذا كان الهدف يبتعد عن الرادار: $f_{beat,down} < f_{beat,up}$

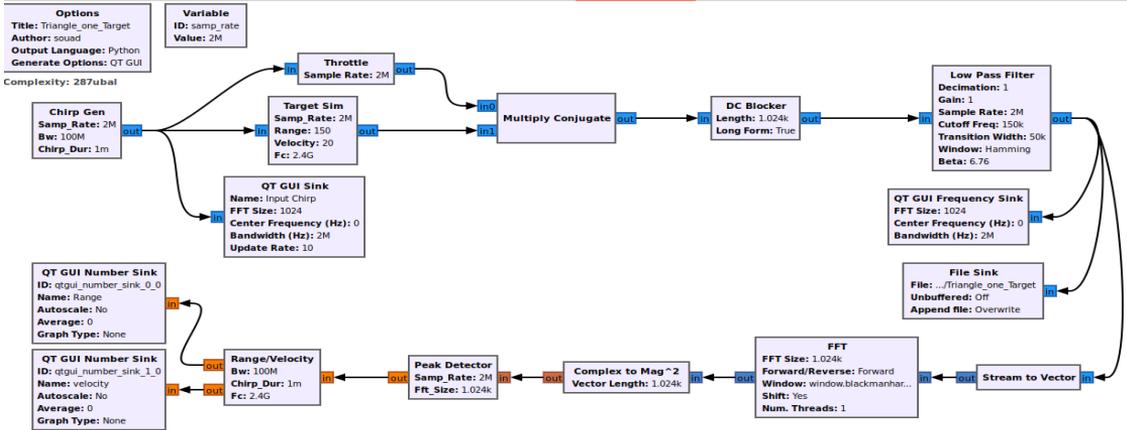
الجدول (6) مواصفات تصميم نظام رادار FMCW قائم على SDR.

2.4GHz ($\lambda = 0.125m$)	تردد الحامل f_c
1ms	دور التغريدة T
100 MHz	عرض الحزمة B
2M Sample/s	معدل أخذ العينات f_{sam}
1024	حجم FFT
$\Delta R = \frac{c}{2B} = 1.5m$	دقة تمييز المدى

$v_{max} = \frac{\lambda}{4T} = \pm 31.25m/s$	أقصى سرعة لا لبس فيها
$R_{max} = \frac{c \cdot T}{2} = 150km$	أقصى مدى لا لبس فيه

يولد مدى الهدف إزاحة ترددية ثابتة، في حين تولد سرعة الهدف (تأثير دوبلر) إزاحة ترددية إضافية تعتمد على اتجاه التغير في ما إذا كانت للأعلى (تردد متصاعد) أو للأسفل (تردد هابط). إذا كان الهدف يقترب من الرادار فإن تردد نبض التغيرية الصاعدة يزداد وتردد نبض التغيرية الهابطة يتناقص والعكس بحالة الهدف يبتعد عن الرادار.

يتضمن المخطط الانسيابي للمحاكاة مولد تغريد موجة مثلثية يتم إنشاؤها بكتلة Python مضمنة لتوليد إشارة تغريد عقديّة (IQ). ولمحاكاة سلوك الهدف نستخدم كتلة تأخير Delay للتعبير عن زمن رحلة الإشارة ذهاباً وإياباً ويمكن استبدالها بكون Python لمراعاة التأخير الديناميكي للهدف المتحرك: $\tau = \frac{2 \cdot R}{c}$. للأخذ بالاعتبار تخميد المسار تُضاف كتلة الضرب بثابت Multiply constant ويتم ضبط قيمة ثابت الضرب على 0.7 لمحاكاة تخميد الإشارة أثناء الانتشار.



الشكل (15): مخطط المحاكاة لرادار FMCW معتمد على SDR من أجل هدف يقع عند مسافة $R = 100m$ وسرعة $v = 30m/s$ (مقرباً من الرادار).

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

يُستخدم مرشح تمرير ترددات منخفضة ذو تردد قطع 250KHz ، تردد انتقال: 10KHz ، والنافذة: هامينغ Hamming، لاستخراج تردد النبض. ويمكن استخدام كتلة Rational Resampler لتخفيض معدل أخذ العينات إلى 500KHz . وفي هذه الدراسة تتم إضافة كتلة تم برمجتها بلغة Python لاكتشاف هدف متحرك وتقدير بارامترات (المدى والسرعة).

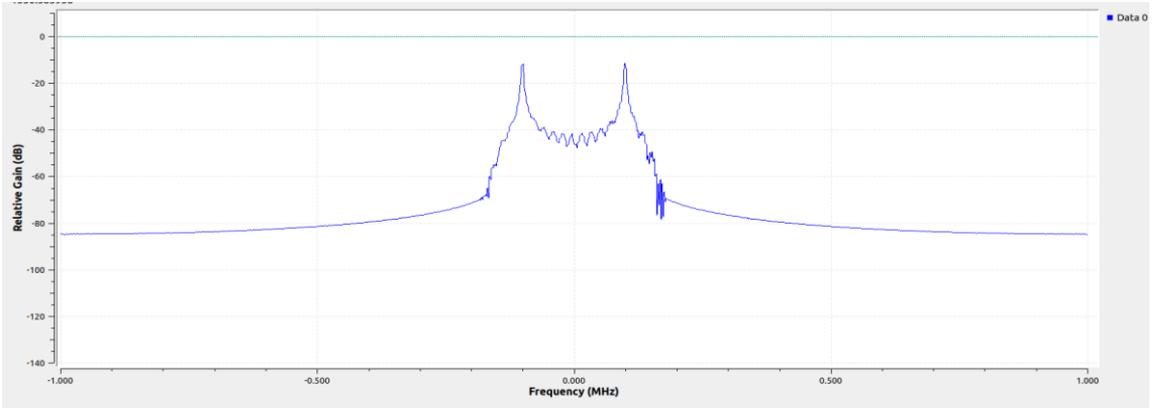
يحتوي التردد النبضي الناتج عن مزج الإشارة المرسله مع الإشارة المستقبله معلومات عن المدى ($\tau = \frac{2R}{c}$) والسرعة (إزاحة دوبلر) ($f_d = \frac{2v}{\lambda} = \frac{2vf_c}{c}$). ومن أجل هدف يقع عند مسافة 150m ويقترب من الرادار بسرعة 20m/s يتم حساب تردد النبض المتوقع بالنسبة لشكل الموجة المثلثة FMCW، وستتواجد قمتين:

$$\begin{aligned} f_{beat,up} &= \frac{2*B*R}{c.T_c} - \frac{2v}{\lambda} \quad \text{■} \quad \text{قمة توافق نبضة تصاعديّة:} \\ f_{beat,down} &= \frac{2*B*R}{c.T_c} + \frac{2v}{\lambda} \quad \text{■} \quad \text{قمة توافق نبضة تنازليّة:} \end{aligned}$$

ومن أجل البارامترات الواردة في الجدول (6) تكون ترددات النبض المتوقعة من أجل $B = 100\text{MHz}$ ، $T = 1\text{ms}$ ، $R = 150\text{m}$ ، $v = 20\text{m/s}$:

$$\begin{aligned} f_{beat,up} &= \frac{2BR}{cT} - \frac{2V}{\lambda} \approx 100 \times 10^3 - 320 = 100.32\text{KHz} \quad \text{■} \quad \text{تردد نبض التفرّيدة الصاعدة:} \\ f_{beat,down} &= \frac{2BR}{cT} + \frac{2V}{\lambda} \approx 100 \times 10^3 + 320 = 99.68\text{KHz} \quad \text{■} \quad \text{تردد نبض التفرّيدة الهابطة:} \end{aligned}$$

يتم حساب التأخير الزمني بناءً على مدى الهدف ($\tau = 2 * R/c = 2 * 150/3e8 = 1\mu\text{s}$) وهذا يتوافق مع عدد عينات ($N = \tau * f_{sam} = (1e - 6 * 2e6 = 2 \text{ samples})$).



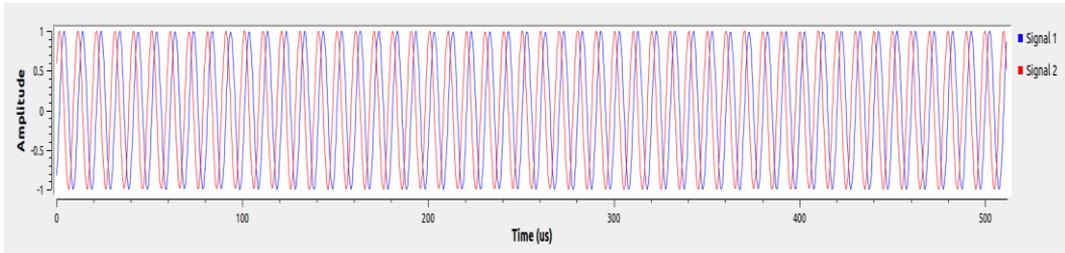
الشكل (16) الطيف الترددي لإشارة النبض لهدف يبعد مسافة $R = 150m$ عن الرادار
ويقترب منه بسرعة $v = 20m/s$.

ومن أجل البارامترات السابقة يوضح الشكل (16) الطيف الترددي للهدف بحيث يظهر التردد
النبضي عند $0.113MHz$ وهو ما يتوافق مع القيمة النظرية التي تم حسابها وفق المعادلة
 $(f_{beat} = \frac{B \cdot 2R}{T \cdot C} = 100KHz)$. ونتيجةً لتقارب قيم تردد النبض للتغريدة الصاعدة والهابطة
يظهران كقمة واحدة.

للتخلص من تقلبات المدى يمكن زيادة حجم FFT إلى 2048 وإضافة كتلة moving average
في خرج المدى. كما أن زيادة حجم تحويل فورييه السريع FFT أو استخدام دور تغريد أطول يحسن
من دقة تقدير بارامترات الهدف. ولتظهر قمة تردد النبض بوضوح بعد تطبيق FFT يجب التأكد
بأن تردد القطع لمرشح التميرير المنخفض $LPF\ cutoff > \max f_{beat}$. ولضمان قياس
صحيح للسرعة يجب التأكد من أن doppler FFT يستخدم عدد تغريدات كافٍ (يوصى بأكثر
من 10).

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

من أجل هدف ثابت نحصل على قيمة مدى ثابتة (مع تقلبات صغيرة ناتجة عن ضجيج وسط الانتشار) ومن أجل هدف يتحرك بسرعة (10m/s): يتغير المدى بحدود 0.1m لكل تغريدة. يظهر التمثيل الزمني لتردد النبض بعد مرشح LPF كإشارة جيبية كما هو موضح بالشكل (17) بتردد يكافئ تردد النبض.



الشكل (17) التمثيل الزمني لإشارة النبض بعد مرشح LPF.

7.2. محاكاة أهداف متحركة متعددة

نصمم رادار FMCW ذو موجة مثلثة كما في الشكل (18) وبحيث نراعي البارامترات الواردة في الجدول (8). لمحاكاة الأهداف نستخدم كتلة تم برمجتها بـ Python يتم فيها تحديد بارامترات الأهداف بالصيغة:

```
target_list  
= [(range1, velocity1, RCS1), (range2, velocity2, RCS2), ...]
```

نستخدم مرشح تمرير منخفض ذو تردد قطع 500kHz، وتردد الانتقال 30kHz. ونستخدم تحويل فورييه السريع FFT بحجم 2048، ونافذة Blackman-hares.

ولكشف الذروة نستخدم كتلة تم برمجتها باستخدام Python بعدد أهداف أعظمي يبلغ 4 أهداف، وعتبة كشف ثابتة 0.1. ونقوم بحساب المدى/السرعة باستخدام كتلة Python مدمجة. وبحالة وجود هدفين نتوقع النتائج الواردة في الجدول (4) وذلك تبعاً للصيغ الأساسية التالية:

الصيغ الأساسية:

- تردد النبض: $f_{beat} = \frac{2*B*R}{c*T} \pm \frac{2*v}{\lambda}$
- خطأ المدى: $\pm \frac{c}{2*B} = \pm 1.0m$
- خطأ السرعة: $\pm \frac{\lambda}{2T} = \pm 12.5m/s$

الجدول (7) قيم بارامترات الأهداف المستقبلية تبعاً لإعدادات المحاكاة لنظام الرادار.

تردد النبض kHz	سرعة الهدف m/s	مدى الهدف m
150 ± 0.98	10 ± 6.25	75 ± 1.0
300 ± 0.98	-5 ± 6.25	150 ± 1.0

ونتيجة لوجود قمم زائفة يمكن ضبط العتبة في PeakDetector (0.05-0.2 من أقصى مطال) أو إضافة كتلة Python مدمجة لكشف معدل الإنذار الخاطئ الثابت CFAR بدلاً من كشف العتبة الثابتة.

ويظهر في خرج كتلة حساب المدى/السرعة القيم التالية للمدى $[0.0, 0.0, 155, 74]m$ ، وقيم السرعة $[0.0, 0.0, -4.7, 10.3]m/s$. حيث تم تصميم النموذج لمحاكاة 4 أهداف ولتبسيط المثال تم الأخذ بالاعتبار وجود هدفين فقط واعتبار البقية بقيم بارامترات صفرية.

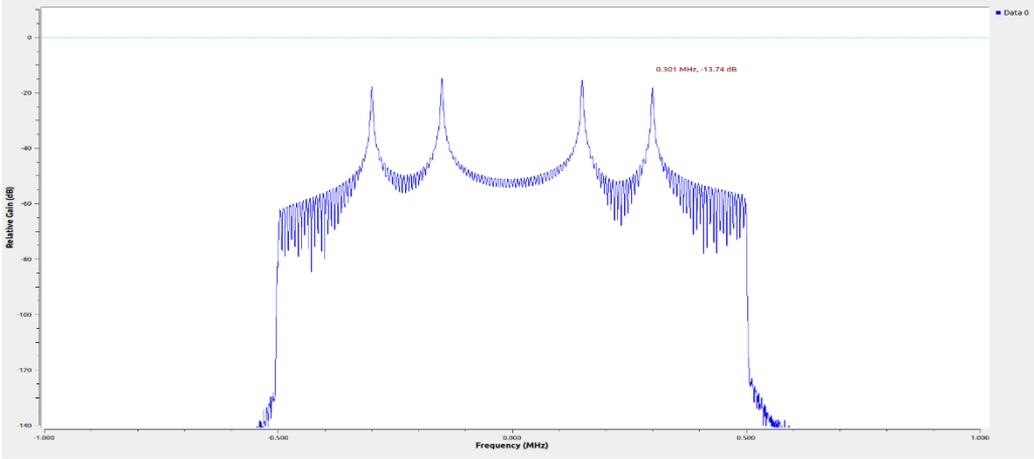
الجدول (8) بارامترات محاكاة رادار FMCW_SDR ذو موجة مثلثية لكشف أهداف متعددة.

2.4GHz	تردد الحامل f_c
$\lambda = 0.125m$	طول الموجة
0.5ms	دور التعريفة T
150 MHz	عرض الحزمة B
2M Sample/s	معدل أخذ العينات f_{sam}
2048 (دقة تمييز التردد 976.56Hz/bin)	حجم FFT

تظهر قمماً متعددة (4 قمم لتعدد النبض قمتين لكل هدف، واحدة من أجل التفرقة الصاعدة وواحدة من أجل التفرقة الهابطة) في طيف خرج تحويل فورييه السريع FFT. وتقوم كتلة Python التي تم برمجتها لكشف الذروة بتحويل ترددات النبض إلى أزواج من المدى/السرعة وفق الصيغ التالية: $v = \frac{f_{beat} * \lambda}{2}$ ، $R = \frac{f_{beat} * C * T}{2 * B}$ كما يلي:

$$\left(75 \text{ m}, 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 1.0\right) \rightarrow 0.148 \text{ MHz} \text{ تردد النبض}$$

$$\left(150 \text{ m}, -5 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 0.7\right) \rightarrow 0.31 \text{ MHz} \text{ تردد النبض}$$



الشكل (19) الطيف الترددي لترددات النبض بعد LPF من أجل هدفين، الأول:

$$\left(75 \text{ m}, 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 1.0\right), \text{ والثاني: } \left(150 \text{ m}, -5 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 0.7\right).$$

يوضح الشكل (19) الطيف الترددي الموافق لترددات النبض لهدفين يملكان البارامترات $\left(75 \text{ m}, 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 1.0\right)$ و $\left(150 \text{ m}, -5 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 0.7\right)$. وتظهر ترددات النبض عند 0.148 MHz و 0.31 MHz .

يمكن تحسين الدقة بزيادة حجم تحويل فورييه السريع لفصل الأهداف القريبة وإطالة دور التغيريد لتحسين دقة السرعة. ويمكن معالجة بيانات تردد النبض الناتجة عن محاكاة رادار FMCW في GNU Radio في بيئة MATLAB من خلال حفظ إشارة النبض في GNU Radio بإضافة كتلة File Sink بعد مرشح الترددات المنخفضة (أو بعد كتلة Multiply إذا لم يتم استخدام أي ترشيح).

8. نتائج البحث

أثبت نهج SDR باستخدام GNU Radio جدوى إنشاء نماذج أولية لأنظمة رادار FMCW بأشكال موجية قابلة للتخصيص، مما يُقلل من الاعتماد على الأجهزة، ويوفر أساساً لاختيار أشكال الموجات بناءً على متطلبات التطبيق.

اتضح من عمليات المحاكاة ومعالجة الإشارة كفاءة شكل موجة سن المنشار في اكتشاف مسافة أهداف متعددة عن الرادار. كما أن رادار FMCW ذو موجة مثلثية الذي تم تحقيقه وباستخدام برمجة Python لمعالجة الإشارة نجح بالحصول على بارامترات مسافة أهداف فردية ومتعددة من الطيف الترددي لإشارة النبض. أثناء الكشف عن الهدف المتحرك، أظهر رادار FMCW القدرة على اكتشاف مسافة الهدف باستخدام إزاحة تردد النبض ولحساب السرعة النسبية للهدف المتحرك المقرب إلى الرادار أو المبتعد عنه استناداً إلى إزاحة دوبلر.

يقدم الجدول (8) مقارنة لبعض الدراسات المرجعية حول أنظمة الرادار منخفضة التكلفة القائمة على SDR، مع تسليط الضوء على اختلافاتها وأوجه التشابه الرئيسية بينها.

الجدول (8) مقارنة الدراسة الحالية مع بعض الدراسات المرجعية.

الدراسة التي تم إجراؤها	المرجع [5]	المرجع [1]	
كشف مواقع وتحديد بارامترات المركبات	جدوى استخدام SDR كرادارات في تطبيقات السيارات الأمامية	كشف وتحديد مواقع الطائرات بدون طيار	الهدف
الحزمة S (2.4GHz)	الحزمة Ku (15GHz)	الحزمة C (5.8GHz)	مجال التردد
معالجة دوبلر_المدى، معالجة FMCW لموجة سن المنشار والموجة المثلثية	معالجة FMCW الأساسية، قياس دوبلر	معالجة دوبلر_المدى، كشف CFAR	معالجة الإشارات
بناء نموذج رادار FMCW لكشف وتحديد بارامترات الأهداف باستخدام برنامج GNU Radio Python	منهجية منخفضة التكلفة للنماذج الأولية للرادار SDR مقابل الرادار التقليدي	بنية نظام ونموذج أولي عملي لتتبع الطائرات بدون طيار في الزمن الحقيقي	المساهمة الرئيسية
دقة محدودة في حساب المدى	مجال ترددي محدود، مشاكل في ضجيج الطور	دقة مدى محدودة، حساسية للتشويش	القيود

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

والسرعة، غياب تحديد زاوية الهدف			
---------------------------------	--	--	--

9. مقترحات البحث

يمكن تقييم البرنامج المصمم باستخدام أجهزة SDR مختلفة. بحيث يتحقق قياس واقعي، وليس محاكاة فقط، عن طريق ربط وحدات SDR لإرسال واستقبال الإشارة المُولدة. ومن أجل الانتقال من محاكاة برمجية بحتة إلى منصة اختبار واقعية، نستبدل:

- توليد إشارة الإرسال بجهاز إرسال SDR فعلي.
- نموذج القناة مع الانتشار الكهرومغناطيسي الحقيقي والأهداف الحقيقية.
- النقاط إشارة الاستقبال بجهاز استقبال SDR.

مع ذلك، تبقى وحدات المعالجة (المزج، الترشيح، تحويل فورييه السريع، الكشف، ... إلخ) كما هي إلى حد كبير.

تُبرز التطورات الحديثة إمكانات SDR في إنشاء نماذج أولية لرادارات FMCW، لكن الأداء يعتمد على كفاءة الخوارزمية واستقرار الأجهزة. يمكن مستقبلاً تحسين معالجة الإشارة من خلال أخذ العينات بشكلٍ منهجي بدلاً من الاعتماد على ميزات GNU Radio. كما يمكن أيضاً دراسة أشكال موجات التعديل الأخرى مثل MFCW و SFCW.

10. المراجع

- [1] Diogo Santos , Pedro Sebastião , Nuno Souto ,“Low-cost SDR based FMCW radar for UAV localization” , WPMC, 2019.
- [2] Siska Aulia, Andriyan Bayu Suksmono, Achmad Muni “Stationary and Moving Targets Detection on FMCW Radar Using GNU Radio-Based software Defined Radio”, 2015 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS) , Indonesia, 2015.
- [3] Z. Qizhao and W. Yaqi, “FMCW radar implemented with GNU Radio Companion.” Master Thesis, Linnaeus University ,Sweden,2016.
- [4] H. Deng and Z. Geng, “Radar Networks.” First edition ,2020. [Online]. Available: <http://taylorandfrancis.com>
- [5] A. M. Monk, “Exploration into the Use of a Software Defined Radio as a Low-Cost Radar Front-End,” 2020. [Online]. Available: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/8742>
- [6] M. M. Hill, “Developing a Generic Software-Defined Radar Transmitter using GNU Radio,” 2012.
- [7] A. Bello, “Radio Frequency Toolbox for Drone Detection and Classification”, MASTER OF SCIENCE,.OLD DOMINION UNIVERSITY, Spring 2019.
- [8] 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.

- [9] J. Smith et al., "Low-Cost SDR-Based FMCW Radar for Automotive Applications," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022.
- [10] H. Lee and S. Kim, "High-Resolution Doppler Estimation for SDR-FMCW Radar," IEEE Radar Conference, 2023.
- [11] R. Gupta et al., "Deep Learning for Multi-Target Detection in SDR Radars," IET Radar, Sonar & Navigation, 2023.
- [12] L. Wang et al., "Phase Noise in SDR-Based FMCW Radars: Measurement and Mitigation," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2023.
- [13] S.Dawar et al., "FMCW–Radar Based Vital Signs Monitoring", Homs University Journal, Volume 42, Issue 6,2020.
- [14] H. Nasr et al. " Design of a Custom DSP-Core for an SDR Radio Receiver Using Matlab and ISE Design Environments", Homs University Journal, Volume 42, Issue 6, 2020.
- [15] Cai, V., Kraft, J. "Channel Leakage Cancellation for Software Defined Radio (SDR) Narrowband Radar Interferometry Using GNU Radio". 2021.
- [16] Patole et al. "Automotive Radars: A review of signal processing techniques", IEEE Signal Processing Magazine 34(2), 22-35,2017.
- [17] Rambach et al. "Detection of Vulnerable Road Users in Dense Traffic Using 77 GHz FMCW Radar",IEEE Radar Conference, 1450-1455*2018.
- [18] Richards, M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing (3rd ed.). McGraw-Hill,(2014)
- [19] Lyons, R. G. Understanding Digital Signal Processing (2nd ed.). Prentice Hall,(2004)

-
- [20] Mahafza, B. R. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB (4th ed.). CRC Press,(2018).
- [21] Skolnik, M. I. Radar Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill.Chapter 8.3 (FMCW Radar),2008.