

# مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية  
والكهربائية والمعلوماتية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 2

1447 هـ - 2026 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](http://www.homs-univ.edu.sy)

. البريد الإلكتروني : [journal.homs-univ.edu.sy](http://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 وورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

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

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

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

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

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

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

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

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

## رسوم النشر في مجلة جامعة 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
36-11	د. رضوان المحمد	" نمذجة الخصائص الإلكترونية والمغناطيسية لبعض المعادن الأرضية النادرة ودورها في صناعة الرقائق المتقدمة عالية الأداء "
68-37	د. م. أنس قرمو	دراسة تحسين العزل الحراري للصبية الاسمنتية باستخدام ألياف بوليميرية نانوية من البوليسترين PS و ABS باستخدام تقنية النفخ
108-69	د. م. أحمد العلي	دراسة أثر خوارزميات الجدولة على أداء بروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية VANET
138-109	هلال احمد تكروني	تصميم وتحليل دائرة جامع كامل منخفضة الاستطاعة والمساحة باستخدام تقنية 45 CMOS nm



## " نمذجة الخصائص الإلكترونية والمغناطيسية لبعض المعادن الأرضية النادرة ودورها في صناعة الرقائق المتقدمة عالية الأداء "

اعداد : د. رضوان المحمد

### الملخص:

مع ظهور طفرة الذكاء الاصطناعي باتت الحاجة ملحة لمعالجات سريعة وذات كفاءة عالية جدا لمعالجة البيانات وتوليد الإجابات، وهذا استدعى تطوير البنية الالكترونية للرقائق المتقدمة من خلال ادخال المعادن النادرة في تكوين السيليكون للوصول إلى الأداء المطلوب. تعتبر الخواص المغناطيسية العالية التي تتمتع بها المعادن النادرة من أبرز الميزات التي ساعدت على استقرار عمل الرقائق الالكترونية المتقدمة ولا سيما عند الوصول إلى الأبعاد النانوية المنخفضة.

يُقدم هذا البحث شرحاً مفصلاً لأهم العناصر النادرة ذات الخواص المغناطيسية التي يمكن استخدامها في الرقائق المتقدمة وتم بناء نموذج يحدد درجة المغناطيسية لهذه العناصر بشكل يسمح بالتنبؤ بأفضلية اختيار العنصر النادر وفق الأداء المطلوب للرقائق المراد تصميمها. تُقدم هذه الورقة إطاراً تحليلياً يُسهم في فهم السلوكيات الفيزيائية للعناصر الأرضية النادرة، ويدعم الجهود الهندسية نحو إدماجها الفعال في بنية الرقائق المتقدمة.

**الكلمات المفتاحية:** الذكاء الاصطناعي، المعادن الأرضية النادرة، الرقائق الالكترونية المتقدمة، تحسين الأداء.

## **Modeling Electronic and Magnetic Properties of Rare Earth Elements for High-Performance Advanced**

### **Abstract:**

With the advent of the Artificial Intelligence (AI) boom, there is an urgent demand for ultra-fast, high-efficiency processors capable of handling complex data processing and generation tasks. This has necessitated the evolution of advanced chip electronic architectures through the integration of Rare Earth Elements (REEs) into the silicon matrix to achieve the requisite performance standards. The superior magnetic properties inherent to REEs are identified as critical factors enhancing the operational stability of advanced electronic chips, particularly as device scaling approaches the lower nanometer regime.

This study provides a comprehensive analysis of key magnetic REEs viable for integration into advanced semiconductor devices. Furthermore, an analytical model has been developed to quantify the magnetic magnitude of these elements, enabling the predictive selection of the optimal REE based on the specific performance metrics required for the target chip design. Consequently, this research provides an analytical framework that contributes to understanding the physical behaviors of REEs, thereby supporting engineering efforts toward their effective integration into advanced chip architectures.

**Key words:** Artificial Intelligence (AI), Rare Earth Elements (REEs), Advanced Electronic Chips, Performance Optimization.

## 1- المقدمة:

يشهد العالم اليوم تحولاً جذرياً في مشهد التكنولوجيا الرقمية، مدفوعاً بالطفرة الهائلة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي (AI) والبيانات الضخمة (Big Data). هذا التطور المتسارع فرض تحديات غير مسبوقة على صناعة أشباه الموصلات، حيث باتت الحاجة ملحة لمعالجات قادرة على التعامل مع كميات هائلة من البيانات بسرعة فائقة وكفاءة طاقة عالية. ومع اقتراب تقنية السيليكون التقليدية (CMOS) من حدودها الفيزيائية القصوى - فيما يعرف بنهاية قانون مور (Moore's Law) - أصبح البحث عن مواد بديلة أو مكملة للسيليكون ضرورة حتمية لاستمرار التطور التقني. في هذا السياق، تبرز العناصر الأرضية النادرة (Rare Earth Elements - REEs) كمرشح استراتيجي لإحداث نقلة نوعية في هندسة الرقائق المتقدمة. تتميز هذه العناصر بخصائص إلكترونية ومغناطيسية فريدة، نابعة من مداراتها الإلكترونية الداخلية (4f) المحمية، مما يمنحها عزماً مغناطيسياً عالياً واستقراراً كمومياً لا يتوفر في مواد أشباه الموصلات التقليدية. إن دمج هذه العناصر في مصفوفة السيليكون (Silicon Matrix) يفتح الباب أمام جيل جديد من الأجهزة الإلكترونية التي تعتمد على "السبينترونيك (Spintronics)"، حيث يتم استغلال العزم المغزلي للإلكترون (Spin) بجانب شحنته، مما يضاعف سرعة المعالجة ويقلل استهلاك الطاقة بشكل كبير.

يركز هذا البحث على دراسة ونمذجة الخصائص الفيزيائية لثلاثة عناصر مختارة بعناية: الجادولينيوم (Gd)، الديسبروسيوم (Dy)، والنيوديميوم (Nd) تم اختيار هذه العناصر لتمثيل طيف واسع من الخصائص المغناطيسية، بدءاً من العزم المغناطيسي الهائل للديسبروسيوم، مروراً بالاستقرار الحراري للجادولينيوم، وصولاً إلى التحديات الهيكلية للنيوديميوم.

يهدف البحث إلى بناء نموذج تحليلي متكامل (Analytical Model) قادر على التنبؤ بسلوك هذه العناصر عند دمجها في السيليكون، وتقييم صلاحيتها للتطبيقات الصناعية بناءً على معايير

دقيقة تشمل: قوة الإشارة المغناطيسية، الاستقرار الحراري عند درجات حرارة التشغيل، والتوافق الهيكلي مع شبكة السيليكون. من خلال هذا النموذج، يسعى البحث لتقديم خارطة طريق هندسية تساعد مصممي الرقائق على اختيار العنصر الأمثل للتطبيق المطلوب، مما يساهم في ردم الفجوة بين الفيزياء النظرية والتطبيق الصناعي في عصر ما بعد السيليكون.

## 2- مشكلة البحث:

تتمحور مشكلة البحث حول التحديات التالية:

1. قصور تقنية السيليكون التقليدية (CMOS) : وصول الترانزستورات الحالية إلى حدودها الفيزيائية والحرارية، مما يعيق تلبية متطلبات السرعة الفائقة لتطبيقات الذكاء الاصطناعي.
2. افتقار السيليكون للمغناطيسية الذاتية :عجز مادة السيليكون عن دعم تقنيات "السبينترونيك (Spintronics) "التي تدمج المعالجة والتخزين، مما يستوجب دمج عناصر خارجية.
3. عقبات الدمج الفيزيائي :صعوبة تحقيق استقرار حراري وتوافق هيكلي عند دمج العناصر الأرضية النادرة (REEs) داخل شبكة السيليكون دون التسبب بعيوب بلورية.
4. غياب نموذج الاختيار الأمثل :عدم وجود إطار تحليلي دقيق يوجه المصممين لاختيار العنصر النادر الأنسب (Gd, Dy, Nd) بناءً على الأداء المطلوب للرقاقة.

## 3- هدف البحث:

يهدف البحث إلى تحقيق ما يلي:

1. نمذجة السلوك الفيزيائي للعناصر النادرة :بناء إطار تحليلي دقيق يربط الخصائص الذرية للعناصر (Gd, Dy, Nd) بأدائها داخل السيليكون.

2. تقييم الكفاءة المغناطيسية والحرارية: تحديد مدى صلاحية كل عنصر لتطبيقات الرقائق المتقدمة بناءً على عزمه المغناطيسي واستقراره الحراري.
3. تحليل التوافق الهيكلي: دراسة تأثير دمج العناصر النادرة على استقرار شبكة السيليكون البلورية وتقليل عيوب التصنيع.
4. تطوير معيار المفاضلة الهندسي (ICE – Integrated Chip Efficiency) : صياغة أداة قرار رياضية توجه المصممين لاختيار العنصر الأمثل وفق متطلبات الأداء المحددة.

#### 4- الدراسات المرجعية:

تنوعت الدراسات الحديثة حول العناصر الأرضية النادرة (REEs) لتشمل مجالات الاستدامة، الفيزياء النظرية، والتطبيقات الصناعية والطبية. في البداية، ركز البحث [1] على الجانب البيئي والاقتصادي من خلال تطوير طرق مبتكرة لإعادة تدوير مغناطيسات NdFeB، مما يضمن استدامة الموارد اللازمة للصناعات المتقدمة. ومن منظور الفيزياء الحاسوبية، قدم [2] حسابات دقيقة للمبادئ الأولى (First-principles) لفهم عمليات التمغنط في المغناطيسات الدائمة، بينما بحث [3] تأثير ضبط موقع أيون  $(RE^{+3})$  وطاقة الارتباط (U) على الخصائص الإلكترونية والميكانيكية، مقدماً رؤية عميقة حول تفاعلات المدارات (4f). وفي سياق التطبيقات العملية، استعرض [4] استخدام أكاسيد المعادن النادرة في المستشعرات الكهروكيميائية لتعزيز نقل الإلكترونات، وناقش [5] تحسين البنية المجهرية لمغناطيسات Nd-Fe-B الملبدة لزيادة القوة القسرية. كما توسعت الأبحاث لتشمل تحسين السبائك المعدنية، حيث درس [6] تأثير انتشار حدود الحبيبات باستخدام سبائك (Tb-Cu) و (Nd-Cu) لتعزيز الخصائص المغناطيسية غير المتناحية. ولم تقتصر التطبيقات على الإلكترونات والمغناطيسات، بل امتدت لتشمل حماية المواد، حيث أوضح [7] دور العناصر النادرة في تحسين مقاومة التآكل للطلاءات، وتناول [8] استخدام المواد النانوية المعتمدة على العناصر النادرة في التطبيقات الطبية لعلاج الأورام. أخيراً، قدم [9] دراسة حول تخليق وخصائص المعقدات الجزيئية للعناصر النادرة، مركزاً على البنية الكيميائية وتأثيرها على الخصائص الفيزيائية.

" نمذجة الخصائص الإلكترونية والمغناطيسية لبعض المعادن الأرضية النادرة ودورها في صناعة الرقائق المتقدمة عالية الأداء "

رغم التغطية الواسعة لهذه الدراسات [1-9] لمجالات المغناطيسات الدائمة، المستشعرات، والتطبيقات الطبية، إلا أنها أغفلت بشكل ملحوظ دراسة الدمج المباشر لعناصر (Gd, Dy, Nd) داخل مصفوفة السيليكون (Silicon Matrix) لتطوير رقائق حاسوبية فائقة الأداء. تفنقر الأدبيات الحالية إلى نموذج تحليلي هندسي (Engineering Analytical Model) يربط بين الخصائص الذرية للعنصر النادر ومتطلبات تصنيع الرقائق (الاستقرار الحراري والتوافق الشبكي) في أن واحد، وهو ما يهدف هذا البحث لسده من خلال تقديم "معامل كفاءة الرقاقة المتكامل (ICEI) " .

### 5- تعريف المعادن الأرضية النادرة وخصائصها:

تُعرّف العناصر الأرضية النادرة (Rare Earth Elements - REEs) وفقاً للاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية (IUPAC) بأنها مجموعة مكونة من سبعة عشر عنصراً تشمل: السكندنيوم (Sc, Z=21) ، واليتريوم (Y, Z=39) ، إضافةً إلى سلسلة اللانثانيدات (Lanthanides) الخمسة عشر من اللانثانوم (La, Z=57) حتى اللوتيتيوم (Lu, Z=71) [10] .

على الرغم من تسميتها "نادرة"، فإن معظمها يتوفر بوفرة معقولة في القشرة الأرضية، غير أن ندرتها تعود إلى تشتتها الجغرافي وصعوبة استخراجها بصورة منفردة نظراً لتشابه خصائصها الكيميائية [11] .

تُقسّم هذه العناصر تقليدياً إلى مجموعتين رئيسيتين حسب العدد الذري كما يظهر في الجدول (1):

### الجدول (1): تصنيف المعادن الأرضية النادرة.

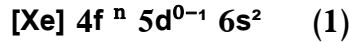
المجموعة	العناصر	نطاق العدد الذري
العناصر الأرضية النادرة الخفيفة (Light REEs)	La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd + Sc	Z = 57 ~ 64

العناصر الأرضية النادرة الثقيلة (Heavy REEs)	Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu + Y	Z = 65 ~ 71
---	-----------------------------------	-------------

**ملاحظة:** تم إضافة العنصرين (السكانديوم واليتريوم) إلى مجموعة العناصر النادرة على الرغم من اختلاف العدد الذري لها عن عنصر اللانثانيدات بسبب السلوك الجيوكيميائي وتشابه الخصائص الأيونية معها هذا من ناحية ومن ناحية أخرى تم تصنيف السكانديوم مع مجموعة العناصر النادرة الخفيفة بسبب تواجده في نفس رواسبها وبالمقابل يصنف اليتريوم على أنه عنصر ثقيل بسبب تواجده مع رواسب العناصر الأرضية النادرة الثقيلة [12].

- التركيب الإلكتروني :

تتميز اللانثانيدات بامتلاكها مدار ( 4f ) غير المُكتمل، وهو ما يُشكّل الأساس الجوهري لخصائصها الإلكترونية والمغناطيسية الفريدة، يمكن كتابة التركيب الإلكتروني العام لهذه العناصر على النحو التالي:



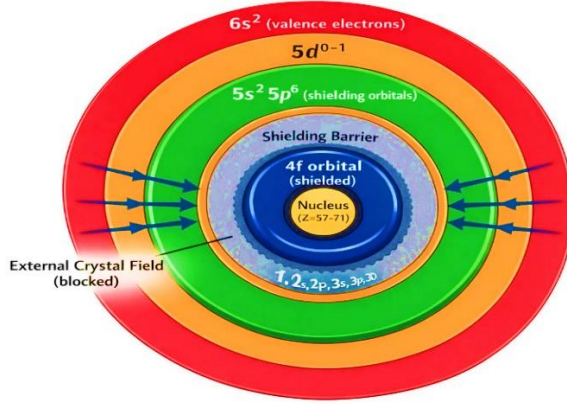
حيث أن:

- [Xe] نواة الزينون (Xenon Core): التي يبلغ عددها الذري (54) يتم وضعها في صيغ التركيب الإلكتروني للمعادن النادرة من أجل الاختصار.
- المدار 4f : هو المدار المسؤول عن كل الخصائص المغناطيسية والبصرية الاستثنائية لللانثانيدات و يتسع لـ (n = 1~14) الكترونات.
- المدار 5d: قد يحتوى هذا المدار على الكترون في التركيب الإلكتروني لبعض العناصر النادرة من أجل الوصول لحالة الاستقرار.
- المدار 6s: هذا المدار يحتوي على الكترون التكافؤ في عناصر اللانثانيدات التي تفقدها أولاً عندما تتأين.

الجدير بالذكر يقع المدار 4f في عناصر اللانثانيدات داخلياً محاطاً بمجموعة من المدارات الأخرى كما في الشكل (1) وهذا ما يعرف بـ (Shielding Effect) ويمنح العناصر الأرضية النادرة

" نمذجة الخصائص الإلكترونية والمغناطيسية لبعض المعادن الأرضية النادرة ودورها في صناعة الرقائق المتقدمة عالية الأداء "

مجموعة من العناصر الفريدة أبرزها ثبات الخصائص المغناطيسية مما يمنحها أداء مستقر في الرقائق.



الشكل(1): المدارات الإلكترونية للعناصر الأرضية النادرة (REEs).

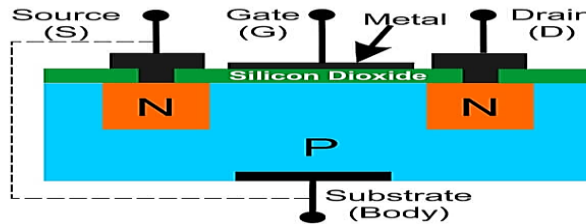
#### 6- الخواص المغناطيسية المدروسة عند إدخال العنصر في بلورة السيليكون:

نظراً للعيوب التي تعاني منها أكاسيد السيليكون في العزل مما يسبب ظهور النفق الكمومي وتشكل تيارات التسريب التي تؤثر بشكل كبير على أداء الرقائق المتقدمة التي تتطلب تصغير في حجم ترانستورات البنية إلى أبعاد أصغر من (2) نانو ، مما سبب إختلال في قانون مور الذي يفترض أن أداء المعالجات سيتضاعف كل سنتين نتيجة زيادة عدد الترنستورات إلى الضعف بتصغير أبعادها.

مع ظهور حاجة ملحة لزيادة أداء و سرعة المعالجات نظرا لظهور تطبيقات الذكاء الاصطناعي بدأ التفكير بشكل جدي للتخلص من عيوب تيارات التسريب التي سببت في استهلاك أكبر للطاقة و أظهرت أثر حراري عالي سبب تلف الرقائق، جاءت المعادن النادرة حلاً لهذه المشكلة لما تتمتع من خصائص مغناطيسية و عازلية جعلت من الترنستورات أكثر ثباتاً و مناعة للتيارات التسريب التي تظهر بشكل كبير عند إنخفاض الأبعاد من خلال إدخالها في بنية السيليكون بدلاً من المواد التقليدية المستخدمة، بعبارة مختصرة استطاعت الرقائق المتقدمة عالية الأداء من خلال إدخال العناصر النادرة في بنية السيلكون المُصنَّع لترنستوراتها أن تجعل من العيوب الكمومية

التي تظهر في الابعاد النانوية الصغيرة أمراً عديم التأثير بل و استفادت من الخصائص المغناطيسية الفريدة لها بجعل هذه الكمومية منفعة و سلوك جديد في تصنيع معالجات الحواسيب الكمومية ذات الكفاءة العالية.

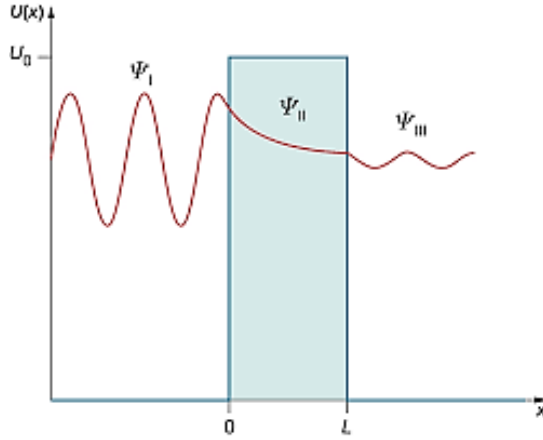
لفهم الموضوع بشكل أعمق، نوضح المشكلة والحل بتسلسل منهجي ومباشر، لتجاوز التعقيدات المعتادة في الأدبيات المرتبطة بهذا الشأن. حيث يوضح الشكل(2) ترانزستور من النوع (MOSFET) وهو المُستخدم في تصنيع المعالجات والرقائق المنتشرة ويعتمد في بنيته على السيلكون النقي والمُشاب لتشكل الأقطاب الثالثة المنبع (S) والمصرف (D) والقاعدة (G)، ولدينا طبقة العازل اكسيد السيليكون ( $SiO_2$ ) التي تشكل عزل البوابة، مبدأ العمل ببساطة عند تطبيق جهد موجب اعلى من الصفر على البوابة تتشكل قناة سالبة ناتجة عن الالكترونات تُشكّل قناة تربط بين المنبع والمصرف مما يسمح بانتقال الشحنات ومرور تيار أي التحكم بالبوابة من خلال الجهد ومرور التيار أو عدمه يمثل المنطق الرقمي الذي تُبنى عليه جميع المعالجات في العالم، استمر العمل على هذا النوع من الترانستورات إلى أن وصلنا إلى ابعاد نانوية بسماكة عازل صغيرة جداً والذي يقع تحت معدن البوابة لدرجة سمحت بتشكّل ما يدعى بالنفق الكمومي أو (تيار التسريب) الذي سبب أثراً سلبياً كبيراً على الأداء.



الشكل(2): البنية الداخلية لترانزستور (MOSFET).

يمكن فهم ظاهر النفق الكمومي بشكل واضح من خلال الشكل (3) الذي يُظهر الدالة الموجية للالكترونات التي تضرب بحاجز (عازل) وتؤدي هذه الظاهرة الكمومية إلى نفاذ جزء من الموجة الإلكترونية عبر الحاجز العازل، مما يُولّد (تيار تسريب) يُعد من أبرز العيوب التشغيلية لكونه يزيد من استهلاك الطاقة ويرفع العبء الحراري للرقائق. ويُعزى حدوث ذلك إلى تصرف الإلكترون وفقاً لخصائصه الموجية، متجاوزاً بذلك سلوكه الكلاسيكي المعتاد كجسيم مشحون. حقيقة هذه

الظاهرة لا تزال لغزاً فيزيائياً يُدرس إلى وقتنا الراهن، لا يهمننا تفسير الظاهرة و إنما أثرها وهو النفق الكمومي وتيار التسريب الذي سبب مشكلة في أداء الترانستور وبالتالي ظهور عيوب في الرقائق عند الأبعاد النانوية الصغيرة تستوجب حلاً ما .



الشكل(3): السلوك الموجي للإلكترون و تشكّل ظاهرة النفق الكمومي.

المعضلة الهندسية تكمن بفيزياء الكم حيث أن زيادة سرعة الترانستور تتطلب زيادة سعة البوابة المعطاة في العلاقة (2):

$$C = \frac{A \cdot \epsilon \cdot k}{t} \quad (2)$$

حيث أن العلاقة عكسية بين السعة الكهربائية وسماكة العازل (t) فعندما تقل السماكة عن (2) نانومتر تظهر مشكلة النفق الكمي وتيار التسريب، في حين أن العلاقة طردية مع ثابت العزل (k) الذي يأخذ قيمة تساوي (3.9) للسيلكون .

عند استخدام أحد أنواع أكسيد المعادن الأرضية النادرة يمكن أن تتضاعف هذه القيمة لثابت العزل إلى سبعة أضعاف لتصل تقريبا إلى (30) بالنسبة لأكسيد اللانثانوم وهذا يسمح بزيادة السعة بشكل أكبر عند سماكات عزل منخفضة جداً مقارنة مع الأكاسيد التقليدية ومن هنا نفهم أهمية و دور المعادن النادرة في تغيير خواص الترانستورات بشكل يزيد من سرعتها عند تقليل حجمها وهذا ما يسمح بزيادة أداء الرقائق الداخلة في تركيبها .

بالمناسبة لا تدخل المواد النادرة فقط في تصنيع عوازل البوابات فقط وإنما تدخل أيضاً في معادن الأقطاب وسطوح تلامسها مع الطبقة الأساسية و داخل تجويف المصدر/المصرف مما يسمح بمرور تيارات أكبر و كذلك حركية أكبر لزيادة سرعة الكترونات القناة و كل ذلك سمح بأداء أكبر ب(1000) مرة على أداء الترانستورات التقليدية التي بنفس الحجم مع استهلاك طاقة أقل.  
بعبارة مختصرة : السيليكون هو "الجسد (The Body) "، لكن العناصر الأرضية النادرة أصبحت هي "الروح (The Soul) " للإلكترونيات الحديثة والرقائق المتقدمة.

#### 7- أهم الخواص المغناطيسية والفيزيائية للمعادن الأرضية النادرة:

يوجد لدينا العديد من الخصائص المغناطيسية والفيزيائية للمعادن النادرة التي تؤثر في أداء الرقائق المتقدمة عند ادخالها في بلورة السيليكون سنذكر ثلاثة منها لتبرير اختيار العناصر ( Gd, Dy, Nd) المُختارة في دراسة البحث.

#### - العزم المغناطيسي الفعال (Effective Magnetic Moment):

حدد هذا العامل "قوة الإشارة" المغناطيسية. كلما زادت القيمة، زادت قدرة العنصر على تخزين المعلومات (High Density Storage) وزادت كفاءة التبديل المغناطيسي في أجهزة السبينترونيك، وهنا تم اختيار العنصر النادر الجادولينيوم (Gd) الذي يقع في منتصف السلسلة كما يظهر في الشكل (4) ويمتلك سبع الكترونات غير متزاوجة ( $4f^7$ ) وهذا يمنحه أعلى عزم مغناطيسي نقي.

#### - التباين المغناطيسي (Magnetic Anisotropy):

يحدد "استقرار البت (Bit Stability)" التباين العالي يعني أن المغناطيسية "مثبتة" في اتجاه معين ولا تتأثر بالحرارة، وهو أساس الذاكرات غير المتطايرة (MRAM)، و هنا تم اختيار العنصر النادر الديسبروسيوم (Dy) ويقع في منتصف النصف الأيمن تقريباً من سلسلة المعادن النادرة ( $4f^{10}$ ) كما يظهر في الشكل (4) ويكون شكل السحابة الالكترونية مفلطحاً مما يجعل من الصعب جداً قلب مغناطيسيته.

#### - إجهاد عدم التوافق الشبكي (Lattice Misfit Strain):

" نمذجة الخصائص الإلكترونية والمغناطيسية لبعض المعادن الأرضية النادرة ودورها في صناعة الرقائق  
المتقدمة عالية الأداء "

فهناك اختلاف بين حجم ذرات السيليكون وذرات المعادن النادرة فعند إدخال عنصر نادر بحجم ذري كبير يُسبب ذلك إجهاد في البنية البلورية تضغط فيه الذرة الداخلة على الذرات المجاورة مما يُسبب تغير قيم فجوة الطاقة للسيلكون (جهد العتبة) و التي تساوي (1.12 eV) في السيليكون النقي، و هنا ندرس معدن النيوديميوم (Nd) و الذي يقع في منتصف الجزء الأيسر من سلسلة المعادن النادرة (4f<sup>3</sup>) كما يظهر في الشكل(4) حيث يكون نصف القطر الأيوني أكبر مقارنة بالعناصر الأخرى.

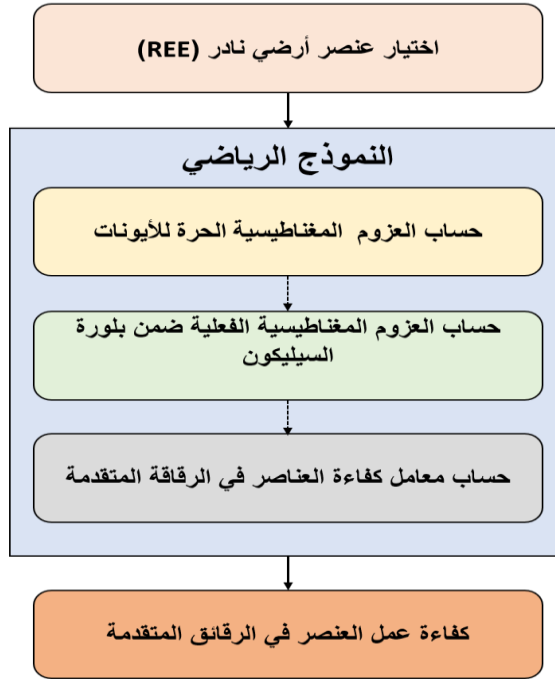
Lanthanide Series	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

الشكل(4): سلسلة عناصر اللانثانيدات في الجدول الدوري للعناصر الكيميائية.

سبب اختيار العناصر الثلاثة (Gd, Dy, Nd) أنها تمثل ثلاث حالات حدية (Extreme Cases) ومتميزة في سلسلة اللانثانيدات من خلال مواقعها في السلسلة، مما يسمح بمسح شامل لتأثيرات البنية الإلكترونية على خصائص السيليكون، هذا الاختيار لا يقلل من أهمية باقي العناصر، حيث يمكن تعميم النتائج المُستخلصة منها للتنبؤ بسلوك باقي العناصر دون الحاجة لدراستها جميعاً بشكل فردي فعلى سبيل المثال يمكن التنبؤ بسلوك العنصر (Ho) والذي يملك (4f<sup>11</sup>) أنه سيكون ذو خصائص قريبة من عنصر الديسبروسيوم (Dy) المدروس نتيجة قرابه منه.

8- النموذج الرياضي المقترح:

ينقسم النموذج المقترح إلى ثلاث مراحل مترابطة تسلسلياً كما يظهر في المخطط الصندوقي:



المرحلة الأولى ( حساب العزم المغناطيسية الحرة للأيونات):

تهدف هذه المرحلة لحساب العزم المغناطيسي الحر للعناصر الأرضية النادرة المختارة ( Gd, Dy, Nd) قبل إدخالها في بلورة السيليكون، حيث يمكن حسابها من خلال العلاقة الرياضية(3):

$$\mu_{\text{free}} = g \cdot \sqrt{J(J+1)} \quad (3)$$

حيث أن:

- (J) اقتران راسل-سوندرز: تحديد الزخم الزاوي الكلي بناءً على نسبة امتلاء المدار . (4F)

- (g) معامل لانديه : يمثل نسبة العزم المغناطيسي إلى الزخم الزاوي و يُحسب بالعلاقة الرياضية (4):

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (4)$$

حيث أن:

- (S) العزم المغزلي: لتقليل طاقة التناثر الكولومي بين الإلكترونات.
- (L) العزم المداري: لتقليل التداخل المداري.

نتائج المرحلة الأولى:

بتطبيق والمعادلات (3) و (4) الجدول (2):

الجدول(2): العزوم المغناطيسية للأيونات الحرة.

العنصر (Element)	(4f <sup>n</sup> )	S	L	J	g	$\mu_{free}$
الجادولينيوم (Gd)	4f <sup>7</sup>	7/2	0	7/2	2.0	<b>7.94</b>
الديسبروسيوم (Dy)	4f <sup>9</sup>	5/2	5	15/2	1.33	<b>10.63</b>
النيوديميوم (Nd)	4f <sup>3</sup>	3/2	6	9/2	0.72	<b>3.62</b>

المرحلة الثانية (حساب العزوم المغناطيسية الفعلية ضمن بلورة السيكون):

عند إقحام أيون عنصر المعدن النادر في بلورة السيليكون ، يخضع العزم المغناطيسي الحر لسلسلة من الاضطرابات الناتجة عن البيئة البلورية المحيطة وتفاعلات حاملات الشحنة، يتم نمذجة هذه التأثيرات عبر ثلاثة عوامل تصحيحية رئيسية هي ظواهر فيزيائية موجودة و مثبتة سيتم تحويلها لثلاث صيغ هندسية رياضية قابلة للحساب المباشر دون الحاجة لمحاكاة كمومية معقدة.

- انشطار المجال البلوري (CF – Crystal Field Splitting) :

يُعرف انشطار المجال البلوري بأنه ظاهرة كسر المدارات الإلكترونية للأيون الحر نتيجة تعرضه لمجال كهربائي ساكن غير متناظر، ناتج عن توزيع الشحنات للأيونات المجاورة في الشبكة البلورية. حيث يُحدث انقسام في مستويات الطاقة الفرعية يؤدي هذا الانقسام إلى إعادة توزيع الإلكترونات في حالات طاقة جديدة، مما قد يسبب انخفاضاً في العزم المغناطيسي المداري الكلي للأيون [13] [14] .

نقترح صياغة هذه الظاهرة عبر نموذج رياضي ظاهري يُمثل بالصيغة الرياضية (5)، حيث يُفترض أن النقصان في العزم المغناطيسي يتناسب طردياً مع نسبة طاقة الاضطراب إلى طاقة الربط الأساسية، وقد تم التعبير عن هذا النقصان بالطرح من قيمة (1) المرجعية للحالة المستقرة.

$$F_{CF} = \left( \frac{\Delta_{CF}}{E_{4f}} * \alpha - 1 \right) \quad (5)$$

حيث أن :

- $(\Delta_{CF})$ : طاقة الاضطراب الناتجة عن الانشطار.
- $(E_{4f})$ : قوة تماسك الإلكترون في مداره الأصلي.
- $(\alpha)$ : معامل انشطار المجال وتكون قيمتها (0.2).

حيث أن  $(\alpha)$  يمثل "معامل انشطار المجال البلوري". وقد فرضنا له قيمة تقريبية تجريبية تبلغ (0.2) ويُعلل سبب أن هذه القيمة المنخفضة بالاستناد إلى تأثير الحجب الفريد الذي تتمتع به العناصر الأرضية النادرة إذ إن إلكترونات المدار (4f) محجوبة بقوة بواسطة إلكترونات المدارين (5p,5s) مما يجعل تأثيرها بالمجال البلوري الخارجي للسيليكون المضيف تأثيراً ضعيفاً ، و يعكس المعامل (0.2) هذه المقاومة الضعيفة للاضطراب.

#### -التهجين المداري (Hybridization) :

يُشير التهجين المداري إلى التداخل الكمومي بين الدوال الموجية للإلكترونات الموضعية في مدارات 4f للعنصر النادر، وبين إلكترونات التوصيل غير المتمركزة في مدارات (sp<sup>3</sup>) للسيليكون المضيف.

وفقاً لنموذج أندرسون للشوائب (Anderson Impurity Model)، يؤدي هذا التداخل إلى توسيع مستويات الطاقة الموضعية وتحويلها إلى "رنين (Resonance) "ذي عرض طيفي محدد . ويمثل هذا العرض احتمالية نفق الإلكترون (Tunneling Probability) من المدار الموضعي إلى نطاق التوصيل، مما يؤدي إلى تقليل زمن بقاء الإلكترون في الحالة المغناطيسية، وبالتالي انخفاض القيمة المتوسطة للعزم المغناطيسي الفعّال [15] [16].

نقترح تمثيل أثر التهجين المداري من خلال الصيغة الرياضية (6)، والتي تصف احتمالية هروب الإلكترون من مداره الموضعي (4f) نحو بحر إلكترونات التوصيل في السيليكون. فكلما زادت احتمالية هذا الهروب، قلت مساهمة الإلكترون في دعم العزم المغناطيسي الموضعي الأساسي.

$$F_{hyb} = \left( \frac{E_{hyb}}{E_{4f}} * \beta - 1 \right) \quad (6)$$

حيث أن:

- $(E_{hyb})$ : قوة الجذب التي تسحب الإلكترون للخارج.
- $(\beta)$ : معامل التهجين المداري وتكون قيمتها (0.1).

حيث أن  $(\beta)$  تمثل "معامل التهجين المداري". وقد افترضنا لها قيمة تمثيلية تبلغ (0.1). ويأتي لتعليل هذه القيمة المنخفضة جداً بسبب الطبيعة الموضعية العميقة لمدارات (4f) داخل ذرة العنصر النادر، إذ يكون التداخل المكاني بين الدوال الموجية لهذه المدارات العميقة ومدارات التوصيل للسليكون في حده الأدنى، مما يعني أن احتمالية النفق الكمومي وعملية تفاعل التهجين تكون ضئيلة وهامشية للغاية، وهو ما يعكسه المعامل المقترح لمعادلة الاستقرار.

-تفاعل التبادل غير المباشر (Indirect Exchange Interaction):

نظراً لأن المدارات المغناطيسية (4f) تكون عميقة ومحمية، فإن التداخل المباشر بين أيونات العناصر النادرة المتباعدة في الشبكة يكون مهملًا. حيث يقوم العزم المغناطيسي للأيون الأول باستقطاب غيمة إلكترونات التوصيل المحيطة به (Spin Polarization)، وتنتقل هذه التذبذبات في كثافة العزم المغزلي (Spin Density Oscillations) عبر الشبكة لتؤثر على اتجاه العزم المغناطيسي للأيون الثاني مما يؤثر على قيمة العزم المغناطيسي [17] [18].

نقترح تمثيل تفاعل التبادل الغير مباشر بالصيغة (7) وهذا العامل يختلف عن السابقين هو عامل تعزيز وليس تقليل، لأنه يمثل الاصطفاف الجماعي للعزوم.

$$F_{ex} = \left( \frac{J_{ex} * S}{K_B * T} * \gamma + 1 \right) \quad (7)$$

حيث أن:

- $(J_{ex} * S)$ : طاقة المغناطيسية تعتمد دائماً على جداء (قوة الاقتران \* مقدار العزم).
- $(K_B * T)$ : الطاقة الحرارية التي تحاول بعثرة العزوم المغناطيسية.
- $(\gamma)$ : معامل تعزيز التبادل وتأخذ قيمة (1.5).

- كتبويج للنماذج التصحيحية الثلاثة السابقة، نقتري الصيغة العامة التجميعية التالية العلاقة (8) لاستنباط العزم المغناطيسي الفعال للعنصر النادر داخل شبكة السيليكون، وذلك كحاصل ضرب العوامل المقترحة آنفاً في قيمة العزم المغناطيسي للأيون الحر :

$$(F_{CF} * F_{hyb} * F_{ex}) * \mu_{free} = \mu_{eff} \quad (8)$$

بتطبيق المعادلات (5) و(6) و(7) و(8) على العناصر المختارة ينتج لدينا الجدول (3):

الجدول(3): العزوم المغناطيسية الفعلية للعناصر النادرة ضمن شبكة السيليكون.

العنصر	$F_{CF}$	$F_{hyb}$	$F_{ex}$	$\mu_{fee}$	$\mu_{eff}$
Gd	0.99	0.99	1.28	7.94	10.1
Dy	0.97	0.99	1.18	10.63	12.05
Nd	0.976	0.988	1.05	3.62	3.66

- المرحلة الثالثة (حساب معامل كفاءة العناصر في الرقاقة المتقدمة):

في هذه المرحلة النهائية، يتم تقييم صلاحية العنصر الأرضي النادر للتطبيق في الرقائق المتقدمة بناءً على ثلاثة محاور رئيسية تشكل "مثلث الأداء":

✓ القوة المغناطيسية ( $\mu_{eff}$ ): تحدد قوة الإشارة وسعة تخزين البيانات.

✓ الاستقرار الحراري ( $T_C$ ): تحدد نطاق تشغيل الجهاز دون تبريد.

✓ التوافق الشبكي ( $\epsilon$ ): يحدد سهولة التصنيع وقلة العيوب البلورية (Defects).

يتم صياغة معامل كفاءة الرقاقة (ICE) كحاصل ضرب لهذه العوامل الثلاثة (لأن فشل أي واحد منها يعني فشل الرقاقة بالكامل) كما في الصيغة (9):

$$ICE = \left(\frac{\mu_{eff}}{\mu_{Gd}}\right) * \left(\frac{T_C}{300 K}\right) * (1 - |\epsilon|) \quad (9)$$

- الحد الأول  $(\frac{\mu_{eff}}{\mu_{Gd}})$  قوة الإشارة المغناطيسية :

حيث أن:

- $(\mu_{eff})$ : العزم المغناطيسي الفعال للعنصر النادر.
- $(\mu_{Gd})$ : العزم المغناطيسي لعنصر الجادولينيوم.

الظاهرة الفيزيائية: في رقائق الذاكرة (MRAM) أو المعالجات المنطقية تعتمد دقة القراءة والكتابة على "نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR)" كلما كان العزم المغناطيسي للأيون  $(\mu_{eff})$  أكبر، كانت الإشارة أوضح وأقوى، مما يقلل من أخطاء البيانات.

رياضياً: إذا كانت (النسبة < 1) : العنصر ممتاز و الإشارة قوية في حين إذا كانت (النسبة > 0.5) : العنصر ضعيف و الإشارة مشوشة.

ملاحظة: في مقام النسبة لا بدّ من وضع عنصر ذو عزم مغناطيسي فعال قوي ومستقر كعنصر مرجعي و هذا ما يتحقق في العنصر (Gd).

- الحد الثاني  $(\frac{T_C}{300k})$  الاستقرار الحراري:

حيث أن:

- $(T_C)$ : درجة حرارة كوري للعنصر الأرضي النادر.
- $(300k)$ : درجة حرارة الغرفة التشغيلية.

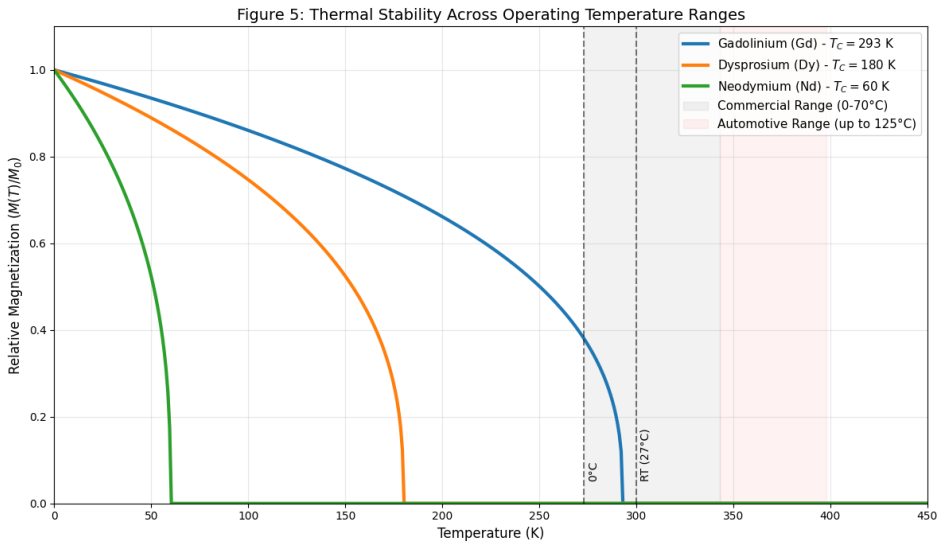
الظاهرة الفيزيائية: المغناطيسية هي ظاهرة تعاونية تنهار بفعل الاهتزازات الحرارية، لكي تعمل الرقاقة يجب أن تكون الطاقة المغناطيسية أكبر من الطاقة الحرارية للبيئة .

رياضياً: إذا كانت (النسبة < 1) المادة مغناطيسية و مستقرة في حين إذا كانت (النسبة > 1) المادة بارامغناطيسية و غير مستقرة.

ملاحظة: درجة حرارة كوري  $(T_C)$  هي نقطة التحول الحرجة بين حالتين للمادة، فعندما تكون تحت  $(T_C)$  تكون حالتها "فيرومغناطيسية (Ferromagnetic)" العزوم المغناطيسية للذرات مصطفة بانتظام (مثل الجنود)، ولها مغناطيسية قوية ودائمة، في حين عندما تكون فوق  $(T_C)$

تكون حالتها "بارامغناطيسية (Paramagnetic) " الحرارة تتغلب على قوى الترتيب، وتصبح العزوم عشوائية تماماً و المغناطيسية تختفي.

بالاعتماد على هذا الحد يمكن دراسة الاستقرار الحراري للعناصر الارضية النادرة بناءً على تغير درجات حرارة التشغيل للرقائق النادرة في ظروف العمل المختلفة (تجاري، مصانع، سيارات، عسكري و غيرها) و الذي يمكن تحديده من (200k ~ 400k) حيث يمكن رصد تغير قيمة المغناطيسية الفعلية للعنصر مع تغير درجة حرارة التشغيل للرقاقة كما يظهر في الشكل(5):



الشكل(5):تغير قيمة المغناطيسية الفعلية للعنصر مع تغير درجة حرارة التشغيل للرقاقة

حيث يظهر الشكل (5) التالي:

تفوق عنصر (Gd) على عنصري (Dy) و (Nd) اللذان لا يصلحان في العمل بالظروف التشغيلية للرقائق المتقدمة.

بالمجمل نلاحظ عجز في فعالية المغناطيسية للعناصر النادرة في الظروف التشغيلية للعناصر النادرة وهذا يفسر لنا استخدام المبردات السائلة في الحواسيب الكمومية التي تعتمد في بنيتها على المعادن النادرة و كذلك استخدام مبدأ التهجين للعناصر النادرة مع المواد الانتقالية مثل (Gd-

(Fe-Co) للحصول على سبائك ذات معامل درجة كوري عالي يسمح باستقرار حراري للمغناطيسية في الظروف التشغيلية لعمل الرقائق المتقدمة.

-الحد الثالث ( $1 - |\epsilon|$ ) التكامل الهيكلي :

حيث أن :

- ( $\epsilon$ ) : قيمة الانفعال المرتبطة التي ترتبط بالفرق بين نصف قطر ذرة العنصر الارضي النادر و نصف قطر ذرة السيليكون.

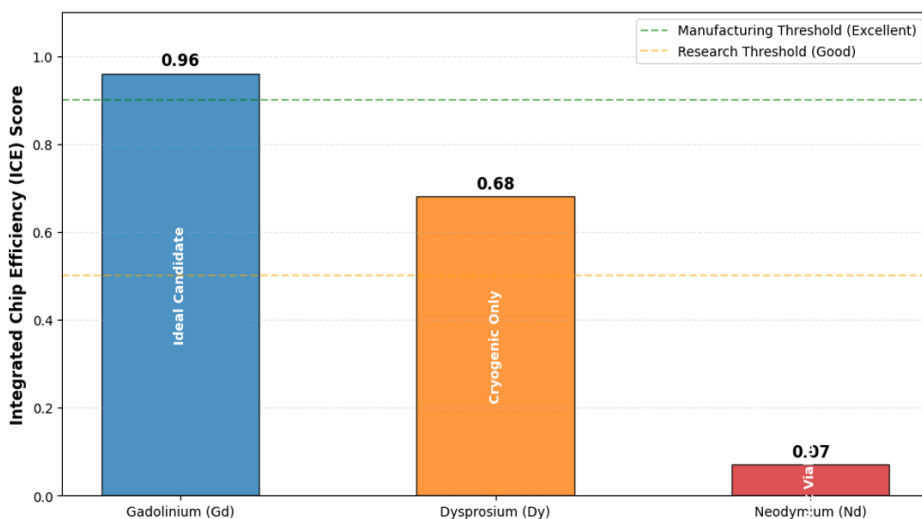
ملاحظة: إذا كان ( $\epsilon < 0$ ) : يعني أن الأيون الدخيل أصغر من ذرة السيليكون التي يحل محلها و هذا يسبب "إجهاد شد" وبالمقابل اذا كان ( $\epsilon > 0$ ) عني أن الأيون الدخيل أكبر من ذرة السيليكون و هذا يسبب "إجهاد ضغط" .

الظاهرة الفيزيائية: إدخال ذرة غريبة (REE) في شبكة السيليكون يسبب "إجهاداً ميكانيكياً". رياضياً: اذا كانت قيمة ( $\epsilon = 0$ ) يعني تطابق تام و جودة ممتازة، و اذا زادت القيمة تقل الجودة حيث يعكس هذا الحد "قابلية التصنيع (Manufacturability)" لا فائدة من مادة مغناطيسية قوية إذا كانت تدمر بلورة السيليكون وتجعل الرقاقة غير قابلة للعمل كهربائياً. بتطبيق المعادلة (9) نحصل على الجدول(4):

الجدول(4): نتائج تطبيق معادلة الكفاءة للرقائق المتقدمة.

العنصر	قوة الإشارة المغناطيسية	الاستقرار الحراري	التكامل الهيكلي	النتيجة النهائية	التقييم النهائي
الجادولينيوم (Gd)	1.00	0.98	0.98	0.96	كفاءة شبه مثالية (صالح لتصنيع الرقائق المتقدمة)

الديسبروسيوم (Dy)	1.19	0.60	0.96	0.68	جيد ولكن محدود (يخسر بسبب الحرارة)
النيوديميوم (Nd)	0.36	0.20	0.99	0.07	أداء ضعيف جداً (غير صالح لتصنيع الرقائق المتقدمة)



الشكل (6): المقارنة بين نسب كفاءة العناصر الأرضية المختارة في تصنيع الرقائق المتقدمة.

ملاحظة : تمثل العتبة الفاصلة في المخطط أعلاه عتبة الجدوى الصناعية الآمنة المقترحة في هذا البحث. ونظراً لأن استنتاج قيمة (ICE) يعتمد على عملية الضرب التراكمي للمحاور الثلاثة، فإن هذه العتبة وُضعت هندسياً لضمان أن العنصر المرشح لا يعاني من قصور شديد في أي محور أساسي. فعلى سبيل المثال، سقوط تقييم عنصر تحت هذه العتبة (مثل الديسبروسيوم) لا يعني انعدام فوائده، بل يعني أنه يتطلب بيئات تشغيلية شديدة التقييد (كالتبريد المستمر) مما يُسقطه من سباق تصنيع الرقائق المتقدمة التجارية للعمل في درجات حرارة الغرفة.

يُوضح الشكل (6): كفاءة عنصر (Gd) في تصنيع الرقائق المتقدمة بالمقارنة مع باقي العناصر (Dy) و (Nd) وذلك لتفوقه المغناطيسي واستقراره الحراري واندماجه المثالي ضمن بلورة السيليكون. يُلاحظ أيضاً على الرغم من العزم المغناطيسي العالي لعنصر (Dy) في حالته الحرة إلا أن ذلك لم يمنحه تفوق نظراً لضجيج الحراري الذي يعنيه و يؤثر على عزمه عند العمل بدرجة حرارة الغرفة.

يُلاحظ أيضاً على الرغم من التكامل الهيكلي المثالي لعنصر (Nd) ضمن بلورة السيليكون لكن ذلك لم يمنحه أيضاً تفوقاً نظراً لانحدار عزمه المغناطيسي بشدة كبيرة عند عمله بدرجة حرارة الغرفة وهذا ما ظهر جلياً بمستوى استقراره الحراري الهش.

بالمجمل لا يعني تفوق عنصر من العناصر الأرضية النادرة في أحد العوامل مثاليته في تصنيع الرقاقة الإلكترونية المتقدمة لكن يجب أن يكون أداءه مقبول في جميع العوامل المؤثرة في الأداء العالي لعمل الرقائق المتقدمة وهذا ما دفعنا إلى استخدام عملية الضرب بين الحدود الثلاثة لعلاقة (ICE) بدلاً من الجمع ليكون الاشرط متزامناً بين العوامل الثلاثة ففشل إحداها يعني فشل العنصر عن تحقيق الاداء المطلوب في بناء الرقاقة المتقدمة ذات الأداء العالي.

## 9- الاستنتاجات:

خلص البحث من خلال النمذجة التحليلية للعناصر الأرضية النادرة (Gd, Dy, Nd) داخل السيليكون إلى ما يلي:

1. أفضلية الجادولينيوم (Gd) : أثبت النموذج تفوق عنصر الجادولينيوم كخيار أمثل لتصنيع الرقائق المتقدمة، محققاً أعلى معامل كفاءة ( $ICT=0.96$ ) بفضل توازنه المثالي بين العزم المغناطيسي والاستقرار الحراري عند درجة حرارة الغرفة.

2. محدودية الديسبروسيوم (Dy) : رغم امتلاكه لأعلى عزم مغناطيسي، إلا أن انخفاض استقراره الحراري ( $T_c = 180k$ ) يجعله غير صالح للتطبيقات التجارية دون تبريد، مما يحصر استخدامه في البيئات المبردة فقط.
3. استبعاد النيوديميوم (Nd) : أظهرت النتائج عدم صلاحية النيوديميوم لتطبيقات "السينترونيك" المتقدمة بسبب ضعف عزمه المغناطيسي وانهيائه الحراري المبكر ( $T_c = 60k$ ).

4. فعالية نموذج (ICE) : نجح "معامل كفاءة الرقاقة المتكامل" المقترح في توفير أداة تنبؤية دقيقة للمفاضلة الهندسية بين العناصر قبل التصنيع، مما يقلل التكلفة والوقت.

#### 10- التوصيات و الآفاق المستقبلية:

بناءً على نتائج النمذجة والتحليل، يوصي البحث بالآتي:

1. اعتماد استراتيجية التطعيم الهجين : التوجه نحو دراسة تأثير إضافة عناصر انتقالية (مثل الحديد(Fe) أو الكوبالت(Co) إلى مصفوفة السيليكون المدعمة بالجاولينيوم (Gd)، لرفع درجة حرارة كوري ( $T_c > 400k$ ) وضمان العمل في البيئات القاسية.
2. التحقق التجريبي للنموذج (ICE) : إجراء تجارب تصنيع فعلية لرقائق اختبارية (Test Chips) باستخدام تقنيات الفذف الجزئي (MBE) لقياس الأداء ومقارنته بالقيم النظرية التي تنبأ بها نموذج كفاءة الرقاقة المتكامل.
3. توسيع نطاق النمذجة : تطبيق النموذج المقترح على عناصر أرضية نادرة أخرى مثل التيربيوم(Tb) والهولميوم(Ho) لاستكشاف إمكانية وجود بدائل أو مكملات للجاولينيوم في تطبيقات محددة.
4. دراسة تأثيرات الكم (Quantum Effects) : التعمق في دراسة تأثير التفاعلات الكمومية الدقيقة عند الأبعاد النانوية المتناهية الصغر حيث قد تظهر سلوكيات مغناطيسية جديدة غير متوقعة

### المراجع:

1. M. Onal, S. Smith, and K. Johnson, "Recycling of NdFeB Magnets using Sulfation, Selective Roasting, and Water Leaching," *Metals*, Vol. 11, No. 1296, (2021).
2. H. Akbari et al., "First-principles calculations of magnetic properties for analysis of magnetization processes in rare-earth permanent magnets," *Scripta Materialia*, Vol. 146, pp. 260–264, (2018).
3. S. S. A. Gillani et al., "Consequences of tuning Rare Earth ( $RE^{+3}$ ) site and Exchange Correlation Energy (U) on the Optoelectronic, Mechanical and Magnetic properties," *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 138, (2022).
4. M. T. Silva et al., "Rare-Earth Metal Oxides in Electrochemical Sensors," *Sensors*, Vol. 21, No. 5615, (2021).
5. L. Li et al., "Microstructure and Magnetic Properties of Sintered Nd-Fe-B Magnets," *Materials*, Vol. 15, No. 201, (2022).
6. R. S. Sheridan et al., "Anisotropic Powder Processed Nd-Fe-B Magnets with Nd-Cu and Tb-Cu Grain Boundary Diffusion," *Metals*, Vol. 12, No. 794, (2022).
7. X. Liu et al., "Corrosion Resistance of Rare Earth Modified Coatings," *Coatings*, Vol. 14, No. 139, (2024).
8. J. Zhang et al., "Recent Advances in Rare Earth-Based Nanomaterials for Tumor Therapy," *Nanomaterials*, Vol. 12, No. 1773, (2022).

9. Y. Wang et al., "Synthesis and Properties of Rare Earth Complexes," *Molecules*, Vol. 29, No. 688, (2024).
10. Connelly, N. G., Damhus, T., Hartshorn, R. M., & Hutton, A. T. (Eds.). (2005). *Nomenclature of Inorganic Chemistry: IUPAC Recommendations 2005*. Royal Society of Chemistry.
11. Gupta, C. K., & Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. CRC Press. ISBN: 978-0-415-33340-5.
12. Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the Elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-7506-3365-9.
13. Kittel, C. (2005). Introduction to Solid State Physics. 8th Ed., Wiley. (Chapter 14: Magnetic Properties).
14. Lea, K. R., Leask, M. J. M., & Wolf, W. P. (1962). "The raising of angular momentum degeneracy of f-electron terms by cubic crystal fields". *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 23(10), 1381-1405.
15. Anderson, P. W. (1961). "Localized Magnetic States in Metals". *Physical Review*, 124(1), 41-53.
16. Coey, J. M. D. (2010). *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge University Press. (Section 4.2: Localized Moments).
17. Ruderman, M. A., & Kittel, C. (1954). "Indirect Exchange Coupling of Nuclear Magnetic Moments by Conduction Electrons". *Physical Review*, 96(1), 99-102.

18. Dietl, T., et al. (2000). "Zener Model Description of Ferromagnetism in Zinc-Blende Magnetic Semiconductors". Science, 287(5455), 1019-1022.

## دراسة تحسين العزل الحراري للصبية الاسمنتية باستخدام ألياف بوليميرية نانوية من البوليسترين PS و ABS باستخدام تقنية النفخ

د.م. أنس قرمو

### الملخص

في ظل السعي الدائم لإيجاد سبل لترسيخ مبادئ الاستدامة وترشيد الطاقة، وتماشياً مع التطور والتقدم التكنولوجي والبحث العلمي بهدف تطبيق النظم البيئية السليمة، يندرج هذا البحث من خلال استخدام طريقة جديدة لإنتاج ألياف نانوية بوليميرية بتقنية النفخ بهدف استخدامها في مجال العزل الحراري للصبات الاسمنتية.

تم في هذا البحث دراسة تحسين العزل الحراري لعينات اسمنتية تم تصنيعها خصيصاً لهذا الغرض، وقد تم تصنيع العينتان بأبعاد 21 X 21 X 2 cm ، وتم قياس معامل التوصيلية الحرارية لهما وقد بلغت 1.595 W/m.K، ثم تم وضع العينة الأولى على جهاز عزل الألياف النانوية بطريقة النفخ، ثم تم إضافة طبقة عزل من الألياف البوليميرية النانوية على العينة بسماكة معينة، والألياف هي من البوليسترين PS ، تم بعدها قياس سماكة طبقة الألياف المتشكلة على سطح العينة وإجراء قياس معامل التوصيلية الحرارية الجديد للعينة، ثم تم إعادة العينة لجهاز العزل وإضافة طبقة ثانية من الألياف وإعادة قياس السماكة ومعامل التوصيل الحراري، ثم إضافة طبقة ثالثة ورابعة وخامسة وتكرار الخطوات تسجيل نتائج القياس، وبذلك أصبح لدينا خمس قراءات لعينات معزولة بألياف PS بالإضافة لقراءة العينة المرجعية. تم تطبيق نفس الإجراءات على العينة الثانية وذلك باستخدام بوليمير مختلف وهو ABS لإنتاج الياف نانوية بوليميرية من ABS وعزل العينة الثانية وفق نفس الآلية مع أخذ القياسات في كل مرحلة عزل، وبذلك أصبح لدينا 12 عينة لكل عينة قراءاتها الخاصة. تم حساب المقاومة الحرارية الاجمالية لكل عينة وحساب معامل التوصيل الحراري لطبقات العزل بمفردها حيث

بلغ معامل التوصيل الحراري لطبقة ألياف PS 0.07 W/m.K بينما بلغ لألياف ABS 0.085 W/m.K .

أظهرت النتائج تفوق ألياف PS النانوية على ألياف ABS النانوية بنسبة 19.84% من حيث المقاومة الحرارية، وتفوقت أيضاً ألياف PS النانوية على ألياف ABS النانوية بنسبة 13.5% من حيث معامل التوصيل الحراري الأقل، وبالتالي إن استخدام الألياف النانوية المصنعة بتقنية النفخ من نوع PS في العزل الحراري له جدوى جيدة، يليه ألياف ABS النانوية التي حققت أداءً حراريًا أقل.

الكلمات المفتاحية: الألياف النانوية، العزل الحراري بالنفخ، ABS، PS، قياس الموصلية الحرارية، المقاومة الحرارية الاجمالية.

**A study on improving the thermal insulation of cement concrete using polystyrene (PS) and ABS nano-polymer fibers using blow molding technology**

**Dr. Anas Qarmo**

**Abstract**

In the ongoing pursuit of sustainability and energy conservation, and in line with technological advancements and scientific research aimed at implementing sound environmental systems, this research focuses on a novel method for producing polymer nanofibers using blow molding technology for use in thermal insulation of concrete slabs.

This research studied improving the thermal insulation of cement samples that were specially manufactured for this purpose. The two samples were manufactured with dimensions of 21 cm x 21 cm x 2, and their thermal

conductivity coefficient was measured and reached 1.595 W/m.K. Then the first sample was placed on a nanofiber spinning machine by blowing, and then an insulation layer of polymer nanofibers of a certain thickness was added to the sample. The fibers are polystyrene PS. Then the thickness of the fiber layer formed on the surface of the sample was measured and the new thermal conductivity coefficient of the sample was measured. Then the sample was returned to the spinning machine and a second layer of fibers was added and the thickness and thermal conductivity coefficient were measured again. Then a third, fourth and fifth layer were added and the steps were repeated and the measurement results were recorded. Thus we had five readings for samples insulated with PS fibers in addition to the reading of the reference sample. The same procedures were applied to the second sample, using a different polymer, ABS, to produce polymeric nanofibers. The second sample was then insulated using the same mechanism, with measurements taken at each insulation stage. This resulted in 12 samples, each with its own readings. The total thermal resistance of each sample was calculated, as well as the thermal conductivity coefficient of the insulation layers individually. The thermal conductivity coefficient for the PS fiber layer was 0.07 W/m·K, while for the ABS fiber it was 0.085 W/m·K. The results showed that the PS nanofibers outperformed the ABS nanofibers by 19.84% in terms of thermal resistance. Furthermore, the PS nanofibers outperformed the ABS nanofibers by 13.5% in terms of lower thermal conductivity. Therefore, using PS nanofibers manufactured using the blow molding technique for thermal insulation is highly feasible, followed by ABS nanofibers, which exhibited lower thermal performance.

**Keywords:** Nanofibers, thermal insulation, ABS, PS, thermal conductivity measurement, total thermal resistance

## 1. مقدمة:

في ظل الازدياد المضطرد في عدد سكان العالم، وتزايد الطلب على المباني السكنية، أصبح من الضروري الاهتمام بشكل جدي في النواحي البيئية، وتطبيق معايير بيئية سليمة في البناء، وجعل السلوكيات البيئية السلمية محورياً أساسياً في التطوير العمراني والسكني، ولا سيما في دول الناهضة والخارجة من حروب وأزمات والتي تتم فيها عمليات إعادة إعمار. وتبرز هنا إحدى أهم المشاكل الحاصلة وهي المشاكل المتعلقة بهدر الطاقة في المباني السكنية، ولا سيما الهدر الحراري عبر أغلفة الأبنية، والتي يكون مصدرها الأساسي هو عدم تطبيق الأسس والمعايير البيئية السليمة أثناء تشييد تلك المباني. تعد تطبيقات أنظمة الغلاف الذكي للأبنية من أهم سبل التقليل من الهدر الحراري الحاصل على هذا الصعيد، لذلك وجب التركيز في الدراسات والأبحاث على كل ما يحسن من الأداء الحراري والبيئي لأغلفة المباني.

تعد الخرسانة الاسمنتية من أهم المكونات الهيكلية للمباني السكنية، لذلك وجب تسليط الضوء على خصائصها وتحسين تلك الخصائص بما يتماشى المعايير البيئية المتبعة، ومن أهم تلك الخصائص هي خصائص العزل الحراري، لأن ارتفاع معايير تلك الخصائص يساعد بشكل كبير على تطبيق متطلبات ترشيد الطاقة في المباني. تمتلك الخرسانة الاسمنتية معامل توصيل حراري مرتفع نسبياً يتراوح بين [1] 1400 – 2400 W/m.K، مما يجعلها ناقلاً فعالاً للحرارة ويسبب فقداناً كبيراً للطاقة الحرارية في الأبنية والمنشآت. هذا القصور في العزل الحراري يُعدّ تحدياً كبيراً في التصميم المعماري الحديث الذي يسعى لتحقيق كفاءة طاقة عالية وتقليل الانبعاثات الحرارية بما يتوافق مع معايير الاستدامة البيئية الحديثة كالمعيارين:

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) و

(Building Research Establishment Environmental Assessment Method)

BREEAM . [2],[3]

لقد سعت العديد من الدراسات خلال العقد الماضي إلى تحسين الخواص الحرارية للخرسانة عبر استخدام مواد مضافة مثل: الجسيمات النانوية، والركام خفيف الوزن، والمواد العضوية المعزولة، والبوليمرات ذات الخصائص العازلة. ومن بين هذه الاتجاهات، برز استخدام الألياف البوليمرية كأحد الحلول الواعدة لتحسين الأداء الحراري دون التأثير السلبي على مقاومة الضغط أو المتانة الإنشائية. تتميز الألياف البوليمرية مثل البوليسترين (PS)، والبولي بروبيلين (PP)، والأكربونيتريل بيوتاديين ستايرين (ABS) بخفة وزنها [4] وانخفاض معامل توصيلها الحراري، مما يجعل دمجها في المصفوفة الأسمنتية وسيلة فعالة لتقليل انتقال الحرارة عبر المقطع الخرساني.

تُظهر الأبحاث أن دمج الألياف البوليمرية في الخلطة الخرسانية يؤدي إلى تشكيل مسارات حرارية منقطعة داخل البنية المجهرية للخرسانة، ما يقلل من تواصل الجسيمات المعدنية والركامية التي عادةً ما تنقل الحرارة بسرعة. كما أنّ الألياف تخلق فراغات دقيقة (Microvoids) تُسهم في احتجاز الهواء الجاف، وهو عازل طبيعي للحرارة، وبالتالي تُحسن من المقاومة الحرارية الكلية للخرسانة، إلى جانب ذلك، فإن استخدام الألياف البوليمرية لا يُعدّ مجرد وسيلة لتحسين الأداء الحراري، بل يُسهم أيضاً في تعزيز الخصائص الميكانيكية للخرسانة مثل مقاومة الشد والانحناء والانكماش الحراري، حيث تعمل الألياف كموزّع للإجهادات الداخلية وتمنع انتشار الشقوق الدقيقة الناتجة عن تغيرات الحرارة. هذا التكامل بين الأداء الحراري والميكانيكي يجعل الخرسانة البوليمرية من المواد المركبة الواعدة في تطبيقات الأبنية الخضراء والمنشآت الذكية.

ورغم هذه النتائج الإيجابية، ما تزال هناك فجوة بحثية واضحة تتعلق بفهم التأثير المتبادل بين نوع الألياف، ونسب إضافتها، وطريقة توزيعها داخل المصفوفة الاسمنتية، ومدى تأثيرها على معامل التوصيل الحراري عبر الاتجاهات المختلفة للمقطع الخرساني. كما لم تُدرس

بعد بشكل كافٍ أداء الألياف المصنعة بتقنيات النفخ الحراري أو البثق في تحسين العزل، رغم ما تتمتع به هذه التقنيات من قدرة على إنتاج ألياف دقيقة ومنتظمة البنية.

## 2. أهمية البحث وأهدافه:

تتبع أهمية هذا البحث من خلال دراسة تأثير استخدام ألياف بوليمرية مصنعة بتقنية النفخ من بوليمري البوليسترين (PS) و (ABS) على العزل الحراري للخرسانة الاسمنتية، من خلال قياس معامل التوصيل الحراري في مراحل مختلفة من التغليف والسماكة. تسعى الدراسة إلى مقارنة الأداء الحراري لكلا البوليمرين وتحليل العلاقة بين السماكة وفعالية العزل لتحديد أنسب المكونات لتطبيقات الأبنية الحديثة ذات الكفاءة الطاقية العالية.

الهدف الأساسي لهذا البحث هو تحليل وتقييم تأثير الألياف البوليمرية المصنعة بتقنية النفخ من نوعي البوليسترين (PS) و (ABS) على الأداء الحراري للخرسانة الاسمنتية من خلال دراسة سلوك انتقال الحرارة عبر العينات تحت ظروف عملية مضبوطة. وقد تم تحديد الأهداف التفصيلية كما يلي:

1. تحسين العزل الحراري للخرسانة الاسمنتية باستخدام ألياف بوليمرية منخفضة التوصيل الحراري.
2. تقييم مدى فعالية سماكة العزل باستخدام طبقات متعددة الاتجاهات من المواد البوليمرية في خفض معامل التوصيل الحراري.
3. مقارنة الأداء الحراري بين مادتي البوليسترين (PS) و (ABS) لتحديد الأنسب من حيث الكفاءة الحرارية والتكلفة.
4. تقدير الكفاءة الحرارية الإجمالية ( $\eta\%$ ) لكل بوليمر عبر مقارنة نسبة الانخفاض في التوصيل الحراري قبل وبعد العزل.

## 3. الدراسات المرجعية:

أجرى ميسكي ورفاقه بحث في العام 2022 بعنوان خرسانة رغوية عازلة معدلة بتقنية النانو باستخدام السيليكا الدقيقة ومعززة بألياف البولي بروبيلين لتحسين خصائصها، درس فيه بعض مشاكل العزل الحراري للخرسانة الرغوية، وهدفت هذه الدراسة إلى تطوير خرسانة رغوية عازلة للحرارة ذات خصائص محسنة من خلال اختيار الجرعة المثلى من ألياف البولي بروبيلين ومادة السيليكا النانوية المعدلة تجريبياً. استُخدمت الطرق القياسية لتحديد خصائص الخرسانة الرغوية الليفية، بالإضافة إلى طريقة المجهر الضوئي لدراسة بنية المركب. وقد ثبت أن استخدام ألياف البولي بروبيلين بنسبة تدعيم مثالية تتراوح من 1% إلى 3% يُحسن الخواص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة الرغوية الليفية. تم تحديد الجرعة المثلى للمعدّل النانوي المُضاف بدلاً من جزء من المادة الرابطة 10% وألياف البولي بروبيلين 2% من وزن المادة الرابطة. بلغت أعلى قيم الزيادة في الخصائص الميكانيكية 44% لمقاومة الضغط و 73% لمقاومة الشد في الانحناء. انخفضت قيم معامل التوصيل الحراري عند الجرعات المثلى للمعدّل النانوي والألياف بنسبة 9%. لوحظ غياب التشققات الدقيقة عند الحد الفاصل بين ألياف البولي بروبيلين ومصفوفة الأسمنت والرمل المتصلبة نتيجةً للتعديل النانوي. [5]

درس ماهان ورفاقه في عام 2025 تأثيرات إضافة الصوف الصخري والرمل إلى خليط من البوليستر والأسمنت على مقاومة الضغط والعزل الحراري من خلال إعداد أربع عينات مختلفة. تكونت العينة الأولى من 70% أسمنت و 30% بوليستر. أما العينة الثانية، فتكونت من 60% أسمنت و 20% بوليستر و 20% رمل، بدون صوف صخري. وتألّفت العينة الثالثة من 60% أسمنت و 19% بوليستر و 19% رمل و 2% صوف صخري. واحتوت العينة الرابعة على 58% أسمنت و 19% بوليستر و 19% رمل و 4% صوف صخري. أشارت النتائج إلى أن العينة الأساسية (70% أسمنت و 30% بوليستر) تتمتع بمقاومة ضغط تبلغ  $74.233 \text{ MPa}$ ، وأعلى موصلية حرارية تبلغ  $0.797 \text{ W/m.K}$ . من بين العينات الثلاث المعدلة، حققت العينة الثانية

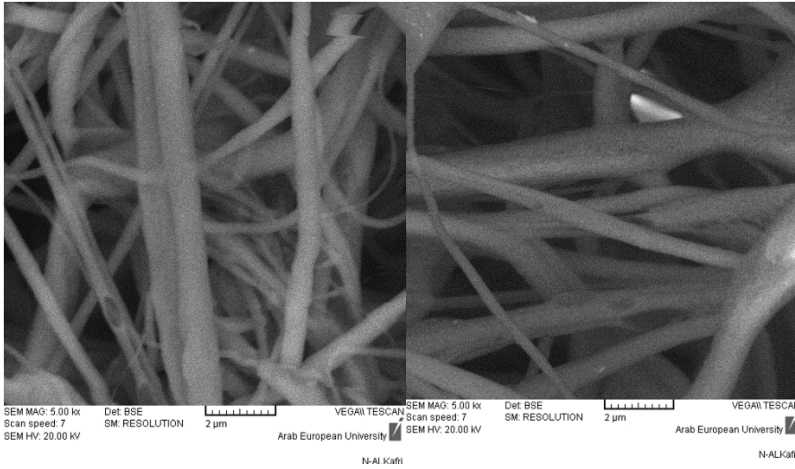
(20% رمل بدون صوف صخري) أعلى مقاومة ضغط بلغت 89.34 MPa. في المقابل، أظهرت العينة الرابعة، التي تحتوي على 4% صوف صخري، أدنى قيم الموصلية الحرارية، مما يجعلها أفضل عينة للعزل الحراري. يُعزى هذا الأداء المتميز في العزل إلى إضافة الصوف الصخري، الذي يتمتع بخصائص عزل حراري ممتازة، مما يساعد على الحفاظ على استقرار درجات الحرارة الداخلية وتقليل تكاليف الطاقة في المباني. [6]

درس فيلازي وزملاؤه في عام 2025 تحسين الخواص الميكانيكية والحرارية للخلطة الخرسانية الخفيفة الوزن باستخدام الألياف الاصطناعية، تم في هذه الدراسة، إضافة ألياف صناعية - البولي بروبيلين (PP) والزجاج (PG) والبازلت (PB) - إلى خلطة خرسانية خفيفة الوزن مع ركام البيرلايت الخام لدراسة أدائها الميكانيكي والحراري والنيوبي الدقيق في آن واحد. على عكس العديد من الدراسات السابقة، حُدثت كمية الألياف نسبةً إلى وزن الاسمنت، مما يضمن ثبات نسبة الألياف إلى الاسمنت في جميع الخلطات. أُجريت اختبارات شاملة، بما في ذلك اختبارات مقاومة الضغط والانحناء، والتوصيل الحراري، وتحليلات SEM/EDS. ، كشفت النتائج عن اختلافات واضحة في التوصيل الحراري تبعاً لنوع الألياف ومحتواها: أظهرت ألياف البازلت أعلى قيمة وهي  $W/m.K 0.4026$  عند محتوى ألياف 0.5% ، بينما أظهرت ألياف البولي بروبيلين أدنى قيمة وقد بلغت  $W/m.K 0.2180$  عند محتوى ألياف 2% ، في حين أظهرت ألياف الزجاج نتائج متوسطة  $W/m.K 0.2805$  عند محتوى 2% . من حيث الخواص الميكانيكية، أدى إضافة الألياف بنسبة تصل إلى 1% إلى تحسين ملحوظ في مقاومة الضغط والانحناء، حيث حققت ألياف البولي بروبيلين بنسبة 1% أفضل النتائج مقاومة ضغط  $MPa 36.05$  ومقاومة انحناء  $MPa 8.98$  . عند نسب ألياف أعلى، تباينت التأثيرات، مما يُبرز أهمية تحسين جرعة الألياف. أكدت الملاحظات المجهرية تحسن الترابط بين الألياف والمصفوفة وانخفاض انتشار الشقوق. بشكل عام، وفرت ألياف البولي بروبيلين أفضل تحسين ميكانيكي، بينما قدمت ألياف الزجاج

والبازلت توازناً بين العزل الحراري والمتانة. تُظهر هذه النتائج إمكانيات الخلطات الاسمنتية خفيفة الوزن المُدعمة بالألياف في تطوير مواد بناء متينة وموفرة للطاقة. [7]

وبالنظر للدراسات المرجعية التي اهتمت بدراسة خصائص الألياف.

وجد بأنه قامت التركي ومن يرافقها في البحث في العام 2025 بدراسة عملوا خلاله على تصنيع وتحسين أغشية من الألياف النانوية من البوليسترين و ABS بطريقة النفخ ودراسة خصائصها وتوصيفها مورفولوجياً، حيث تم أخذ صور لأغشية الألياف المصنعة بجهاز المجهر الالكتروني الماسح وتوصيف الألياف بالاعتماد عليها وعلى برنامج Image J، ويبين الشكل (1) والشكل (2) صور المجهر الالكتروني المأخوذة لكل من ألياف البوليسترين (PS) و (ABS) على الترتيب.



الشكل (2) صورة مأخوذة بالمجهر الالكتروني لألياف

لألياف ABS [8]

الشكل (1) صورة مأخوذة بالمجهر الالكتروني

لألياف بوليسترين [8]

من خلال صور المجهر الالكتروني تم توصيف أغشية الألياف المصنعة، حيث تراوح متوسط أقطار ألياف البوليسترين بين 381.9–644.6 nm بينما بلغ هذا المتوسط في ألياف

ABS قيمة 302.3 nm وهي تعتبر ألياف نانوية وفقاً لتعريف المعهد الياباني للألياف في طوكيو [8] ، وبلغت الكثافة الخطية لأغشية ألياف البوليسترين 17 fiber/10 µm بينما بلغت هذه الكثافة في ABS 89 fiber/10 µm. وأعطت الدراسة مواصفات أخرى للألياف متعلقة بالخواص الميكانيكية ومدى قدرتها على معالجة المياه. [9]

وجد من خلال الدراسات أن معظم التحسينات التي جرت على الصبات الإسمنتية باستخدام الألياف تمت ضمن الصبة الاسمنتية وهذا لا يسمح بأن تجري عملية التحسين بعد الصبة أو في الصبات المنشأة سابقاً، على خلاف البحث الحالي الذي يعتمد على تحسين الصبات المنشأة سابقاً، أي أن الألياف ليست موجودة ضمن الصبة وإنما تشكل طبقة إضافية. ونجد أيضاً أن أياً من الدراسات لم تستخدم طريقة النفخ في اعداد الألياف النانوية وإنما تم استخدام طرق أخرى، وأنهم لم يستخدموا مادة ABS و PS لإنتاج ألياف نانوية لاستخدامها للعزل الحراري بطريقة النفخ.

إن كل ما ذكر من اختلاف عن الدراسات السابقة يعطي البحث قيمة مضافة ويميزه عن الأبحاث السابقة.

#### 4. طرائق البحث:

##### 1.4. المواد المستخدمة:

1- المواد البوليمرية: تم استخدام نوعين مختلفين من البوليمرات وهما:

(a) بوليسترين (PS): تم الحصول عليه على شكل حبيبات كروية سائبة تتراوح أقطارها بين 3-4 mm وهي حبيبات تستخدم كمواد أولية لصناعة منتجات مختلفة من البوليسترين كألواح العزل الحراري ومواد تغليف. ويبين الشكل (3) أحد البوليمرات المستخدمة وهو حبيبات البوليسترين.

(b) بولي أكريلونتريل بوتادين ستايرن (ABS): وهو نوع من البوليميرات الحرارية المشتركة، يتمتع بخصائص متانة عالية، مقاوم للصدمات. تم الحصول عليه على شكل شريط كثافته:  $1.04-1.06 \text{ g/cm}^3$ ، ودرجة انصهاره بين:  $210-250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

تم اختيار هاذين النوعين من البوليميرات بسبب تمتعها بمعامل توصيل حراري منخفض، بالإضافة لسهولة التعامل معها وتشغيلها خاصةً مع جهاز توليد الألياف النانوية بالفخ، والسبب الأهم هو أنه لم يتم استخدام هاذين البوليميرين من قبل لهذا الغرض.



الشكل (3) يبين حبيبات البوليستيرين

2- المذيب: تم استخدام الأسيتون كمذيب، وهو مذيب يستخدم عادةً لإزالة الطلاء الأظافر وإزالة طلاء السيارات لأنه يعتبر مذيب فعال.

#### 2.4. الأجهزة والمعدات المستخدمة:

تم في البحث الحالي استخدام مجموعة متنوعة من الأجهزة والمعدات. فقد استُخدمت بعض منها لتحضير العينات الاسمنتية، والبعض الآخر لتحضير الألياف البوليميرية، بالإضافة لأجهزة ومعدات قياس، وفيما يلي استعراض للأجهزة المستخدمة:

1- قالب صب العينات البيتونية: هو قالب خشبي صُمم خصيصاً لاحتواء الخلطة الخرسانية أثناء عملية الصب بهدف منحها الشكل والأبعاد المطلوبة لإجراء الاختبارات المخبرية. تم في

دراسة تحسين العزل الحراري للصبية الاسمنتية باستخدام ألياف بوليميرية نانوية من البوليسترين PS و ABS باستخدام تقنية النفخ

هذا البحث استخدام قالب بأبعاد (21 × 21 × 6) cm، وهي الأبعاد القياسية المتوافقة مع متطلبات جهاز قياس الموصلية الحرارية المستخدم في التجربة، وذلك لضمان دقة القياسات، ويبين الشكل (4) القالب الخشبي المستخدم لصب العينات.



الشكل (4) يبين القالب الخشبي المستخدم لصب العينات الاسمنتية

2- ميزان الكتروني: تم استخدام ميزان الكتروني دقيق من نوع sartorius بدقة تصل إلى 0.1 mg من أجل وزن المواد البوليميرية المستخدمة في تصنيع الألياف. الميزان مبين في الشكل (5).

3- خلاط مغناطيسي: هو عبارة عن خلاط يعمل بمبدأ عمل مغناطيسي، ويحتوي هذا الخلاط أيضاً على سخان كهربائي لتسخين العينات التي بحاجة لذلك، ويحتوي على مفتاحين لضبط درجة الحرارة وسرعة الدوران، وشاشة رقمية يظهر عليها درجة الحرارة وسرعة الدوران. الشكل (6) يبين الخلاط المغناطيسي.



الشكل (5) يبين ميزان الكتروني المستخدم الشكل (6) يبين الخلاط المغناطيسي المستخدم

**5- جهاز الغزل بالنفخ لإنتاج الألياف النانوية:** يُستخدم هذا الجهاز في تصنيع ألياف نانوية دقيقة من محاليل بوليميرية متنوعة وفق مبدأ يعتمد على نفخ المحلول البوليميري بواسطة تيار من الهواء المضغوط. تبدأ عملية التشغيل بفتح صمام الضاغط الهوائي، مما يؤدي إلى خروج الهواء المضغوط عبر الأنابيب باتجاه رأس النفخ الموضوع في وضعية التشغيل، حيث يُنفخ المحلول البوليميري لتكوين خيوط نانوية دقيقة، في الوقت ذاته، يؤدي تفعيل مفاتيح لوحة التحكم إلى تشغيل كل من الحركة الترددية لحامل رأس النفخ والحركة الدورانية للأسطوانة التجميع. يُولّد المحرك المخصص للأسطوانة حركةً دورانية منتظمة تُمكنها من جمع الألياف المتشكلة على سطحها، بينما يقوم المحرك الثاني بنقل الحركة عبر ذراع ميكانيكي إلى الحامل، ليحدث حركة ترددية خطية ذهاباً وإياباً. تبلغ السرعة الخطية لرأس النفخ حوالي 12 m/min، أي ما يعادل 40 شوطاً في الدقيقة (حيث يُعرّف الشوط بأنه حركة الرأس في الاتجاهين المتعاكسين) [4],[10]. يبين الشكل (7) جهاز الغزل بالنفخ المستخدم، كما يبين الشكل (8) رأس النفخ.

دراسة تحسين العزل الحراري للصبية الاسمنتية باستخدام ألياف بوليمرية نانوية من البوليسترين PS و ABS باستخدام تقنية النفخ



الشكل (8) يبين رأس النفخ



الشكل (7) يبين جهاز الغزل بالنفخ المستخدم

**6- جهاز قياس الموصلية الحرارية:** من أجل تحديد معامل التوصيل الحراري للعينات المحضرة، تم استخدام جهاز قياس الموصلية الحرارية الموضح في الشكل (9). يعتمد هذا الجهاز في عمله على مبدأ التدفق الحراري عبر العينة قيد الاختبار، حيث يتم تمرير تدفق حراري منظم من أحد وجهي العينة إلى الوجه الآخر.

يقوم الجهاز بقياس درجتي حرارة سطحي العينة بدقة عالية، إضافة إلى معدل التدفق الحراري المار خلالها. وبمعرفة مساحة سطح العينة وسماكتها، يمكن حساب معامل التوصيل الحراري ( $\lambda$ ) للعينة باستخدام قانون فورييه للتوصيل الحراري، والذي يُعبّر عن العلاقة الرياضية

بين كمية الحرارة المتدفقة والزمن والمسافة كما يلي: [11]

$$Q = A \cdot \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\delta} \rightarrow \lambda = Q \cdot \frac{\delta}{A \cdot \Delta T}$$

حيث:

$Q$ : التدفق الحراري يقدر بـ  $W$ .

$\Delta T$ : فرق درجة حرارة سطحي العينة  $(T_H - T_C)$ ، يقدر بـ  $^{\circ}C$ .

$\lambda$ : عامل التوصيل الحراري يقدر بـ  $W/mK$ .

$A$ : مساحة سطح العينة تقدر بـ  $m^2$ .

$\delta$ : سماكة العينة تقدر بـ  $m$ .

$$Q = V \cdot I \quad (2)$$

حيث:

$V$ : جهد تغذية المنبع الحراري يقدر بـ  $V$ .

$I$ : شدة تيار تغذية المنبع الحراري يقدر بـ  $A$ .



الشكل (9) يبين جهاز قياس الموصلية الحرارية

توصيف جهاز قياس الموصلية وطريقة القياس والطرز والمعايرة في المرجع [11]

7- بياكوليس رقمي: من أجل تحديد سماكات العينات وسماكات الطبقات بعد أن تم تجهيزها بشكل نهائي في كل مرحلة.

### 3.4. تحضير العينات:

#### 1.3.4. تحضير العينات الاسمنتية:

تم في هذه المرحلة تحضير عدد من العينات الاسمنتية لجعلها عينات اختبارية، العينات المحضرة كانت بأبعاد 21 X 21 X 2 cm ، حيث تم تحضير خلطة اسمنتية مكونة من اسمنت ورمل كلسي وماء، تم خلط المكونات بشكل جيد يدوياً واستمرت عملية الخلط فترة زمنية جيدة حتى تجانس الخليط بشكل جيد، من ثم تم صب العينات في قوالب خشبية وتركها ما يقارب 28 يوماً حتى تجف بشكل جيد، وبذلك تكون العينات الاسمنتية جاهزة لإتمام العمل.

في هذه المرحلة من البحث، تم إعداد عدد من العينات الإسمنتية بغرض استخدامها في الاختبارات الحرارية اللاحقة. حي تم تحضير العينات الاسمنتية بأبعاد قياسية كانت 21) cm (21 × 21 × 2)، وهي الأبعاد التي تُمكن من إجراء قياسات دقيقة لعامل التوصيل الحراري باستخدام جهاز قياس معامل التوصيل الحراري المعتمد في البحث. تم تحضير الخلطة الإسمنتية الأساسية من الاسمنت البورتلاندي العادي كمادة رابطة، والرمل الكلسي الناعم كمادة مالئة، بالإضافة إلى ماء الخلط النقي بنسبة ملائمة لتحقيق قابلية تشغيل مناسبة للخليط وضمان تجانس البنية الداخلية للعيونة. أُجريت عملية الخلط يدوياً باستخدام الأدوات المناسبة، واستمرت لمدة كافية لضمان تجانس تام بين مكونات الخلطة وتحقيق توزيع موحد لحبيبات الرمل داخل الخليط الاسمنتي. بعد الحصول على خليط متجانس ذي قوام مناسب، تم صب الخليط في القوالب الخشبية المخصصة، ثم جرى تسوية السطح العلوي بعناية لإزالة أي فراغات هوائية أو تفاوتات في السماكة قد تؤثر لاحقاً على دقة القياسات، بعد عملية صب العينات، تُركت العينات داخل القوالب لفترة زمنية ثم أُزيلت من القوالب بعناية ونُقلت إلى مكان التجفيف تحت أشعة الشمس،

واستمرت عملية التجفيف فترة زمنية كافية لمدة 28 يوماً مع المحافظة على سقيها بالماء بشكل يومي ومنتظم، ومدة 28 يوم هي المدة القياسية المطلوبة لاكتمال الجفاف وفقاً للمعايير المتبعة، وبعد انتهاء فترة التجفيف، أصبحت العينات الإسمنتية جاهزة تماماً لإجراء الاختبارات المتعلقة بقياس معامل التوصيل الحراري وتطبيق طبقات العزل البوليمرية عليها ضمن المراحل التجريبية اللاحقة من البحث. ويبين الشكل (10) مراحل صب العينات الإسمنتية.



الشكل (10) يبين مراحل صب العينات الإسمنتية

#### 2.3.4. تحضير الألياف البوليمرية النانوية:

تم في هذه المرحلة تحضير الألياف البوليمرية من نوعي البوليسترين (PS) والأكريلونيتريل بيوتاديين ستايرين (ABS) بتركيز وزني بلغ 12% لكل من البوليسترين، وفق منهجية دقيقة تضمنت مرحلتين رئيسيتين:

**المرحلة الأولى تحضير المحلول البوليمري:** بدأت عملية التحضير بتجهيز المحلول البوليمري الأساسي المستخدم في تصنيع الألياف. تم اختيار الأسيون كمذيب عضوي فعال لقدرته على إذابة كلا البوليسترين بفعالية عالية وتشكيل محلول متجانس القوام، حيث جرى وزن كمية محددة من البوليمر تتناسب مع كمية المذيب للحصول على التركيز المطلوب 12%، ثم وُضعت المكونات في بيشر زجاجي مقاوم للحرارة، وُثبت بعد ذلك على خلاط مغناطيسي مزوّد بسخان حراري. تم ضبط درجة الحرارة عند  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  للحفاظ على ثبات اللزوجة ومنع تبخر المذيب بسرعة، بينما ضُبّطت سرعة الدوران على المستوى المتوسط لتأمين تجانس الخلط دون إحداث فقاعات هوائية في المحلول. استمرت عملية الخلط لمدة 15 min تقريباً إلى حين الحصول على محلول متجانس تماماً وخالٍ من أي تكتلات بوليمرية.

تم تطبيق الخطوات نفسها على كل من محلولي PS و ABS بنفس الظروف التشغيلية لضمان توحيد خصائص الألياف الناتجة عند المقارنة التجريبية اللاحقة.

**المرحلة الثانية: تشكيل الألياف البوليمرية على العينات الاسمنتية:** بعد تحضير المحاليل، نُقلت إلى حجرة التغذية الخاصة بجهاز الغزل بالنفخ، حيث تم ملء الحجرة بالمحلول وإغلاقها بإحكام لمنع تسرب المحلول أو فقدان الضغط. نُبّئت العينة الإسمنتية بشكل شاقولي في مواجهة رأس النفخ، لضمان تغطية متجانسة لسطحها أثناء عملية الرش. عند تشغيل ضاغط الهواء، بدأ تدفق الهواء المضغوط عبر رأس النفخ، مما أدى إلى بَحّ المحلول البوليمري على سطح العينة حيث تم تحريك رأس البخ ذهاباً وإياباً بحركة ترددية منتظمة تقريباً، مولداً بذلك طبقات متراكمة من الألياف الدقيقة التي تكوّنت على سطح العينة فور تبخر المذيب. تشكّلت الألياف تدريجياً على هيئة غشاء بوليمري متجانس يغطي

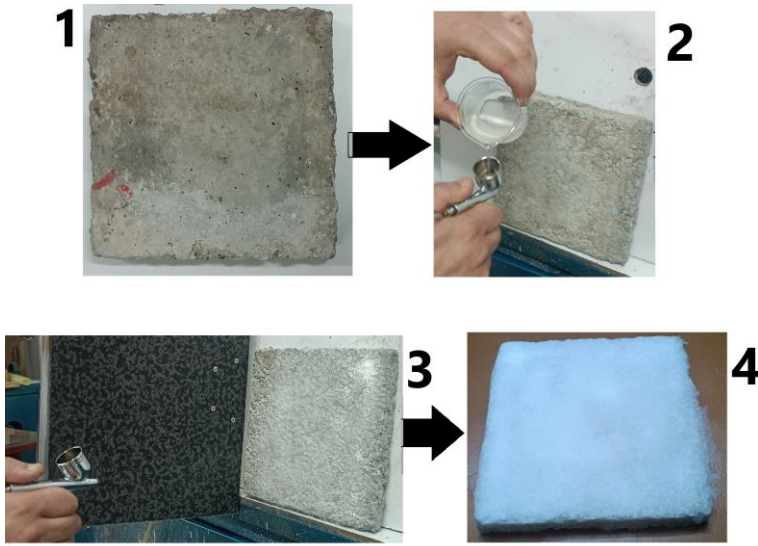
سطح العينة بالكامل. تم تطبيق هذا الإجراء على عدة عينات كل عينة منها يُستخدم فيها نوع من أنواع البوليميرات (PS,ABS) لتشكيل طبقات من الألياف المتراكمة التي تعمل كعازل حراري.

تكررت عملية تشكيل طبقات الألياف وقياس معامل التوصيل الحراري على مراحل متتابعة؛ إذ جرى في البداية قياس الخصائص عند سماكة أولية محددة، ثم أُعيدت عملية النفخ لتشكيل طبقة إضافية مضاعفة السماكة، تلتها قياسات جديدة، وهكذا حتى الوصول إلى عدة مستويات من السماكة تم عندها تسجيل قيم الموصلية الحرارية لكل حالة. تم تشكيل خمس سماكات مختلفة لكل العينات المغطاة بألياف البولسترين PS وألياف ABS

يبين الجدول (1) بارامترات عملية تشكيل الألياف البوليميرية باستخدام جهاز الغزل بالنفخ، ويبين الشكل (11) مراحل تغطية العينات بطبقة من الألياف البوليميرية.

الجدول (1) بارامترات عملية تشكيل الألياف البوليميرية

تركيز المحلول [%]	مسافة الرأس عن العينة [cm]	قطر الفوهة [mm]	ضغط الهواء [bar]	مادة الألياف
10	20	1.8	2	PS
10	20	1.8	2	ABS



الشكل (11) يبين مراحل تغطية العينات بطبقة من الألياف البوليمرية

#### 4.4.4. اجراء الاختبارات:

##### 1.4.4. قياس السماكات:

تم قياس سماكات العينات المدروسة باستخدام بياكوليس رقمي دقيق، وجرت هذه العملية عقب كل مرحلة يتم فيها زيادة في طبقة الألياف التي تغطي العينة، حيث تمت في البداية قياس العينة الاسمنتية قبل تغطيتها بطبقة الألياف، ثم تم تغطيتها بالطبقة الاولى وإعادة قياس السماكة، ثم تغطيتها بطبقة ثانية وإعادة القياس، هكذا حتى الوصول إلى السماكة النهائية. وتم تطبيق هذا الإجراء على جميع العينات المدروسة.

##### 2.4.4. قياس معامل التوصيل الحراري:

تم قياس الموصلية الحرارية للعينات باستخدام جهاز قياس الموصلية الحرارية، حيث تم وضع عينة ضمن الجهاز وتشغيله، وعند استقرار التدفق الحراري العابر للعينة تم أخذ القراءات لقيمة معامل التوصيل الحراري (تراوح زمن استقرار التدفق الحراري في العينات بين 3 - 4.30 ساعات وفقاً لكل عينة).

تم تطبيق هذا الإجراء على 12 عينة، عينتان دون عزل وهما العينتان المرجعيتان، وخمس عينات تم عزلها بشكل متتالي وبسماكات مختلفة بألياف البوليسترين وخمس عينات أخرى تم عزلها بشكل متتالي وبسماكات مختلفة بألياف ABS، حيث تم إجراء القياس عقب كل زيادة في سماكة في طبقة الألياف. تم أخذ عدة قياسات لكل عينة و أخذ المتوسط الحسابي واعتماده كنتيجة نهائية.



الشكل (12) يبين قياس معامل التوصيل الحراري للعينات.

##### 5. النتائج والمناقشة:

تم اختبار 12 عينة، عينتان مرجعيتان تم قياس معامل التوصيل الحراري لهما من ثم تم عزل كل منهما بألياف بوليميرية بطريقة النفخ، الأولى ألياف بوليسترين والثانية ألياف ABS حيث تم عزل كل عينة بطبقة بسماكة معينة من كل نوع ألياف، وقياس معامل التوصيل لهما من ثم زيادة سماكة الطبقة وإعادة القياس، وهكذا حتى تطبيق خمس سماكات من كل نوع من أنواع

دراسة تحسين العزل الحراري للصبة الاسمنتية باستخدام ألياف بوليمرية نانوية من البوليسترين PS و ABS باستخدام تقنية النفخ

---

الألياف، وبذلك تم إجراء القياسات على 12 عينة بهدف تقييم تأثير نوع الألياف البوليمرية وسماكتها على معامل التوصيل الحراري والمقاومة الحرارية الكلية. استخدم في المجموعة الأولى ألياف البوليسترين (PS) ، وفي المجموعة الثانية ألياف ABS ، مع ثبات المساحة السطحية لجميع العينات عند  $0.0441 \text{ m}^2$  .

تم تحديد معامل توصيل حراري للعينتان الأولى والثانية (العينات المرجعية) تجريبياً حيث بلغت مقداره  $1.595 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ، من ثم تم إتمام قياس المعامل للعينات بعد وضع طبقة الألياف على العينات، من ثم حساب معامل الموصلية الحرارية لكل طبقة ألياف فبلغت لألياف البوليسترين  $0.07 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (PS)، ولألياف ABS بلغت  $0.085 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

تم ترتيب معامل التوصيل الحراري الإجمالي والمقاومة الحرارية الاجمالية وسماكات العينات في الجدول (2) وفقاً لكل نوع من أنواع الألياف وسماكتها.

## الجدول (2) يبين معامل التوصيل الحراري الإجمالي والمقاومة الحرارية الإجمالية وسماكات

## العينات

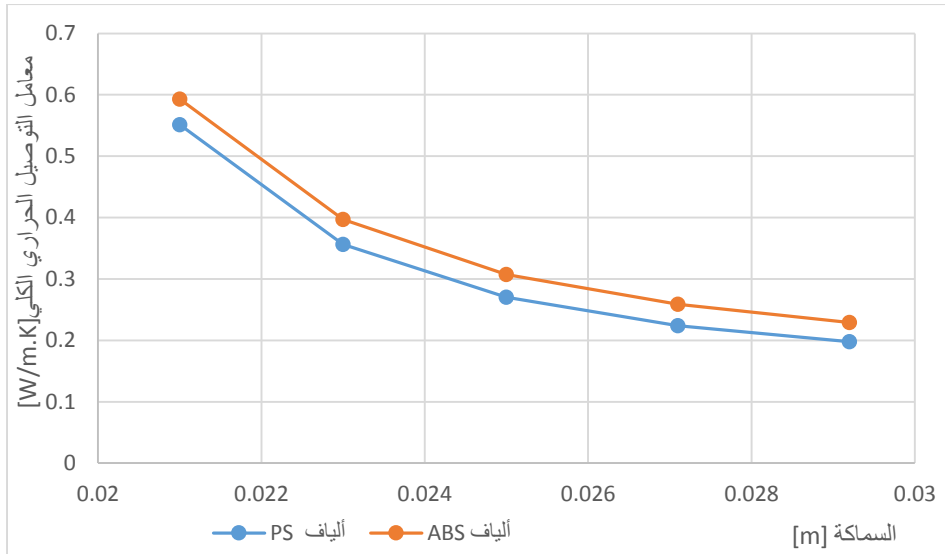
المقاومة الحرارية الكلية بعد العزل [K/W]	معامل التوصيلية الحرارية الكلية للعازل [W/m.K]	معامل التوصيل الحراري [W/m.K]		السماكة [m]		مادة الألياف	
		للعينات الاسمنتية	للعازل	العزل	كاملة	رقم	نوع
0.298552	1.595	1.595	-	0	0.021	A	بوليسترين PS
0.946	0.551	1.595	0.07	0.002	0.023	1	
1.594	0.356	1.595	0.07	0.004	0.025	2	
2.275	0.270	1.595	0.07	0.0061	0.0271	3	
2.955	0.224	1.595	0.07	0.0082	0.0292	4	
3.570	0.198	1.595	0.07	0.0101	0.0311	5	ABS
0.298552	1.595	1.595	-	0	0.02	B	
0.845	0.593	1.595	0.085	0.0021	0.0221	6	
1.378	0.397	1.595	0.085	0.0041	0.0241	7	
1.938	0.307	1.595	0.085	0.0062	0.0262	8	
2.472	0.259	1.595	0.085	0.0082	0.0282	9	10
2.979	0.229	1.595	0.085	0.0101	0.0301		

من خلال تحليل البيانات الواردة في الجدول، يتضح أن كلا ألياف PS وألياف ABS المادتين العازلتين وأظهرتا تحسناً تدريجياً في الأداء الحراري مع زيادة سماكة طبقة الألياف، حيث انخفض معامل التوصيل الحراري الكلي ( $\lambda_{TOTL}$ ) وارتفعت المقاومة الحرارية الكلية ( $R_{TOTL}$ )

دراسة تحسين العزل الحراري للصبة الاسمنتية باستخدام ألياف بوليمرية نانوية من البوليسترين PS و ABS باستخدام تقنية النفخ

ومع ذلك، فقد تفوقت عينات ألياف البوليسترين (PS) بشكل ملحوظ على عينات ألياف ABS في كفاءة العزل، وهو ما يتفق مع الخصائص الفيزيائية الأساسية لكل بوليمر. في حالة PS: انخفض  $\lambda_{TOTL}$  من 0.551 إلى 0.198 W/m.K بزيادة السماكة من 0.002 m إلى 0.0101 m تحسن بنسبة 64% وبنسبة 87.6% عن العينة قبل العزل.

في حالة ABS: انخفض  $\lambda_{TOTL}$  من 0.593 إلى 0.229 W/m.K بزيادة السماكة من 0.0021 m إلى 0.0101 m تحسن بنسبة 61% وبنسبة 85% عن العينة قبل العزل.



الشكل (13) يبين العلاقة بين معامل التوصيل الحراري الكلي والسماكة في كل من ألياف PS و ABS

يفسر انخفاض معامل التوصيل الحراري إلى وجود طبقة ألياف بوليمرية، تعمل الألياف البوليمرية ذات الموصلية المنخفضة كحاجز أمام تدفق الحرارة الصادر من الطبقة الإسمنتية.

مما يوضح الفرق عند السماكات الصغيرة ( $\geq 0.004 \text{ m}$ ): يكون انتقال الحرارة ما زال متأثراً بشكل كبير بالطبقة الإسمنتية، لذلك تكون الفروقات بين PS و ABS محدودة. عند السماكات المتوسطة ( $0.006\text{m}-0.008\text{m}$ ): تبدأ طبقة الألياف بالسيطرة على السلوك الحراري العام، ويظهر أثر نوع المادة بوضوح.

عند السماكات الكبيرة ( $\leq 0.0101 \text{ m}$ ): يصل النظام إلى حالة شبه مستقرة حرارياً، حيث يصبح معدل الانخفاض في  $\lambda_e$  بطيئاً رغم زيادة السماكة، نتيجة تشبع تأثير الطبقة العازلة. في كفاءة العزل بين المادتين.

إن كل زيادة في سماكة الطبقة العازلة تعمل على زيادة المقاومة الحرارية جديدة، مما يرفع من المقاومة الحرارية الكلية للعينات ويخفض معامل التوصيل الحراري الكلي، ونظراً لأن معامل التوصيل الحراري للألياف أصغر بكثير من معامل التوصيل الحراري للطبقة الاسمنتية، فإن تأثير الألياف يزداد بشكل كبير حتى عند زيادات طفيفة في السماكة.

من أجل مقارنة أداء ألياف البوليسترين PS وألياف ABS نجد أن:

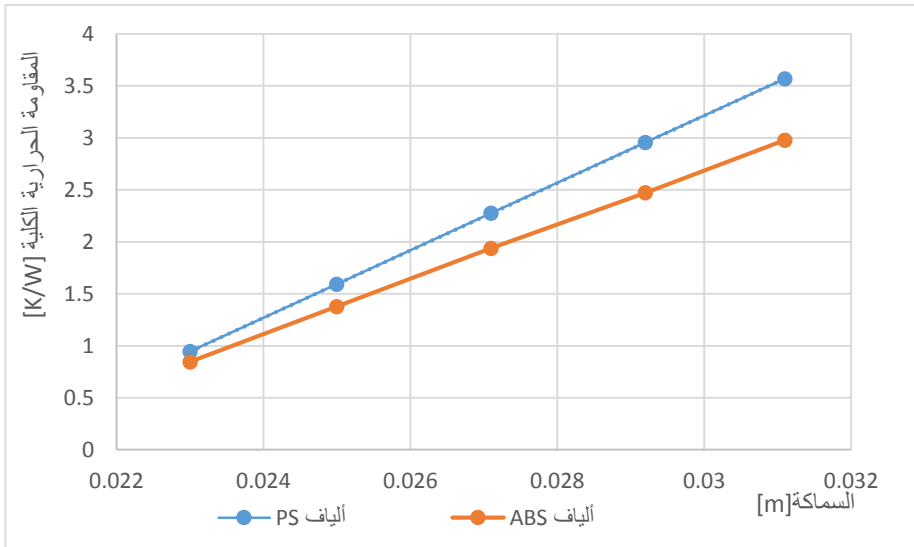
ألياف PS: تتميز ببنية خلوية هوائية ومسامية مرتفعة، مما يجعلها أكثر قدرة على احتجاز الهواء الساكن، وتعتبر عازل حراري جيد. بالتالي، فإن زيادة السماكة تُضعف المقاومة بشكل أسرع وتحقق انخفاضاً أكبر في  $\lambda_{TOTL}$  الكلي.

ألياف ABS: تتمتع ببنية أكثر صلابة وكثافة من PS، ولهذا فهو ناقل أفضل نسبياً للحرارة، إلا أن انتظام بنيته الجزئية ومثابته العالية يمنحانه أداءً حرارياً مستقراً على المدى الطويل ويقلل من التشققات أو الانكماش الحراري.

يبين الشكل (14) العلاقة بين المقاومة الحرارية الكلية والسماكة في كل من ألياف PS

و ABS.

دراسة تحسين العزل الحراري للصبة الاسمنتية باستخدام ألياف بوليمرية نانوية من البوليسترين PS و ABS باستخدام تقنية النفخ

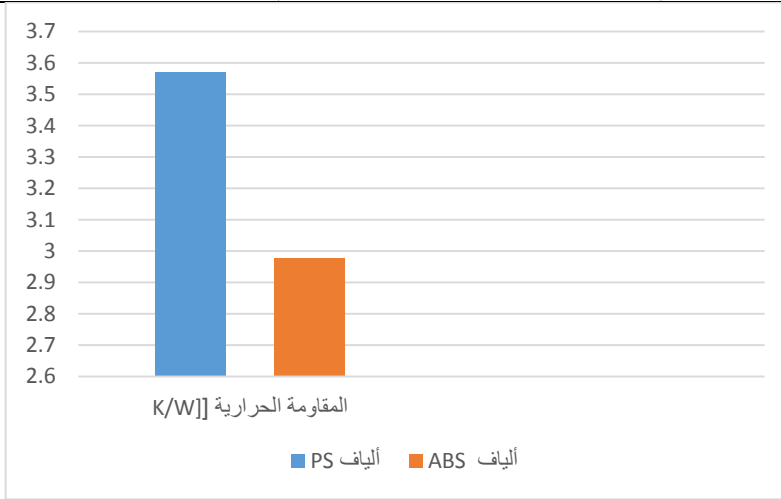


الشكل (14) يبين العلاقة بين المقاومة الحرارية الكلية والسماكة في كل من ألياف PS و ABS

بالنظر للمقاومات الحرارية، يتضح أن المقاومة الحرارية  $R_{TOTL}$  تزداد بمعدل شبه خطي مع سماكة الألياف، وهو ما يتوافق مع معادلة فورييه للتوصيل الحراري. ففي عينات PS، ارتفعت المقاومة من 0.946 K/W إلى 3.57K/W عند زيادة السماكة من 0.002 m إلى 0.0101 m، أي بمعدل زيادة يقارب 0.65 K/W لكل 2 mm من الألياف. أما في عينات ABS، فارتفعت المقاومة من 0.845 K/W إلى 2.979 K/W لنفس المجال من السماكة، بمعدل زيادة 0.53 K/W لكل 2 mm تقريباً.

ويوضح الشكل (15) مقارنة المقاومة الحرارية الكلية لـ PS مع المقاومة الحرارية الكلية لـ

ABS.

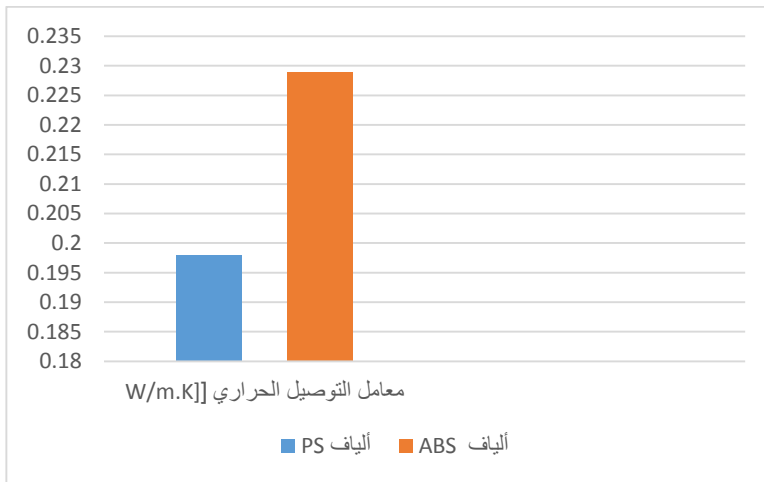


الشكل (15) يبين مقارنة المقاومة الحرارية الكلية لـ PS مع المقاومة الحرارية الكلية لـ

### ABS

بإجراء مقارنة بين قيمة المقاومة الحرارية لـ PS مع قيمة المقاومة الحرارية لـ ABS عند أكبر قيم للمقاومات الحرارية (عند أكبر سماكات للألياف البوليميرية 0.0101 m) نجد بأن المقاومة الحرارية لألياف PS تفوقت بشكل واضح وكبير على المقاومة الحرارية لألياف ABS، حيث فاقتها بنسبة % 19.84، كما أن المقاومة الحرارية لذات عينة PS فاقت في قيمتها أكثر من عشرة أضعاف العينة التي لا تحتوي على عزل.

دراسة تحسين العزل الحراري للصبة الاسمنتية باستخدام ألياف بوليمرية نانوية من البوليسترين PS و ABS باستخدام تقنية النفخ



الشكل (16) يبين مقارنة المقاومة الحرارية الكلية لـ PS مع المقاومة الحرارية الكلية لـ

### ABS

بإجراء مقارنة بين قيمة معامل التوصيل الحراري لـ PS مع قيمة معامل التوصيل الحراري لـ ABS عند أصغر قيم لمعاملات التوصيل الحراري (عند أكبر سماكات للألياف البوليمرية 0.0101 m) نجد بأن معامل التوصيل الحراري لألياف PS أصغر بشكل واضح من معامل التوصيل الحراري لألياف ABS، حيث كانت أصغر بنسبة % 13.5، كما أن معامل التوصيل الحراري للعينة التي لا تحتوي عزل أكبر من معامل التوصيل الحراري لذات عينة PS بأكثر من ثمانية أضعاف.

تطابقت نتائج البحث الحالي مع نتائج كل من ميسكي [5] و ماهان [6] اللذان استخدموا أليافاً لتحسين الأداء الحراري للعينات الإسمنتية، حيث استخدم ميسكي ألياف البولي بروبيلين بينما استخدم ماهان ألياف الصوف الصخري لتحسين الخواص الحرارية، حيث تم تحسين في الأداء الحراري للعينات الاسمنتية المدروسة مع وجود تفاوت في نسب التحسين الذي جرى، ووجود فرق في طريقة تطبيق العزل.

## 6. الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال الدراسة التي تمت أصبح من الممكن صياغة بعض الاستنتاجات على النحو الآتي:

1. أثبتت الدراسة أنه يمكن تصنيع ألياف بوليميرية نانوية من البوليسترين PS وألياف ABS بطريقة النفخ تعمل على تحسين الأداء الحراري (العزل الحراري) للعينات الاسمنتية.
2. تفوقت ألياف البوليسترين PS على ألياف ABS من حيث فعاليتها للعزل الحراري، حيث فاقتها بنسبة % 19.84 من حيث المقاومة الحرارية الكلية وبنسبة % 13.5 من حيث معامل التوصيل الحراري.
3. أكدت الدراسة أن زيادة سماكة طبقة الألياف تعمل على زيادة المقاومة الحرارية للعينات، حيث أزدادت المقاومة الحرارية من قيمة 0.946 K/W إلى 3.57K/W عند زيادة السماكة من 0.002 m إلى 0.0101 m عند استخدام ألياف PS، بينما ازدادت من 0.845 K/W إلى 2.979 K/W عند استخدام ABS عند نفس المجال من السماكة.
4. أدت زيادة سماكة الألياف البوليميرية إلى انقاص معامل التوصيل الحراري للعينات المدروسة في كلا النوعين من الألياف، حيث انخفض معامل التوصيل الحراري عند زيادة السماكة من 0.002 m إلى 0.0101 m بنسبة %64 عند استخدام PS، بينما انخفض هذا المعامل بنسبة %61 عند استخدام ABS.
5. تكون نسبة التحسن في الأداء الحراري مرتفعة عند العمل في مجال سماكات صغير، وتبدأ النسبة التحسن بالانخفاض مع الانتقال لمجال سماكات متوسطة، وتصبح نسبة التحسن صغيرة جداً عند العمل في مجالات سماكات كبيرة.

### التوصيات:

من خلال ما سبق يمكن أن نوصي بما يلي:

- 1- اعتماد تقنية النفخ في تصنيع ألياف بوليميرية بغرض تحسين العزل الحراري.
- 2- اجراء تجارب بغرض تصنيع ألياف من مواد أخرى بطريقة النفخ لاستخدامها بالعزل الحراري.
- 3- العمل على ادخال الألياف التي تم تصنيعها ضمن الخلطة الخرسانية واجراء الاختبارات اللازمة لمعرفة فعالية هذه الألياف في العزل الحراري.
- 4- تشجيع الباحثين ومراكز الأبحاث والشركات العامة والخاصة على البدء بشكل جدي بإجراء أبحاث مشابهة تشجع الاستدامة وترشيد الطاقة.

### المراجع

### References

1. **Syrian Arab Code for the design and implementation of installations in reinforced concrete.**
2. **Leadership in Energy and Environmental Design** – (LEED), U.S. Green Building Council. (2023). LEED v4.1 Building Design and Construction. <https://www.usgbc.org/leed>.

3. **Building Research Establishment Environmental Assessment Method**– (BREEAM), BREEAM UK New Construction V7,2025, [Institution of Environmental Sciences](https://breeam.com/standards). <https://breeam.com/standards>
4. Hilal M and Asaad M and AlTurki F. (2025), **Studying the Effect of Different Membrane Material Types on the Efficiency of Water Purification**. *homs University Journal – Series for Chemical and Petroleum Engineering*.
5. Meskhi B et al. (2022), **Insulation Foam Concrete Nanomodified with Microsilica and Reinforced with Polypropylene Fiber for the Improvement of Characteristics**. *MDPI, Journal of Polymers, 2022, Volume 14, 4401, Page 1–21*.
6. Mahan H et al. (2025), **Analyzing thermal insulation of concrete polymer by adding mineral wool**. *Advances in Science and Technology Research Journal, 2025, 19(5), Page 430–439*.
7. Filazi A et al. (2025), **Enhancing Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Mortar With Synthetic Fibers: A Comprehensive Study**. *Journal of The Structural Design of Tall and Special Buildings: Volume 34, Issue 16*,
8. Tanioka A and Takahashi M, (2016), **High-Performance and Specialty Fibers, Nanofibers**. *Springer. Department of Organic Polymeric Materials, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, Society of F.S. Technology, Japan (ed.), Book. Page 273– 283*.
9. AlTurki F and Hilal M and Asaad M. (2025), **Improving the properties of manufactured and used membranes in water**

**treatment.** *homs University Journal – Series for Chemical and Petroleum Engineering.*

10.Hossen Sh et al. (2024), **Development of a spinning device that works with blowing technology and combining it with electrospinning to produce non-woven networks from polymeric materials.** Homs University.

11.Qarmo A, et al. (2019) – **Design and manufacture a thermal conductivity measurement device with an Arduino controller to manage data input and output operations.** *homs University Journal – Series for Chemical and Petroleum Engineering, 41(2019), Pages 113-140.*

## دراسة أثر خوارزميات الجدولة على أداء بروتوكولات التوجيه في شبكات

### المركبات اللاسلكية VANET

د.م. أحمد العلي\*

#### الملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة أثر خوارزميات جدولة الطوابير (Active Queue Management) (AQM) - على أداء بروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية (VANETs). تم من خلال استخدام محاكي الشبكة NS3 تقييم أربعة بروتوكولات توجيه وهي AODV, DSR, DSDV, GPSR، وذلك باستخدام ثلاث خوارزميات لإدارة الطوابير وهي DropTail, RED, REM. تم تنفيذ التجارب ضمن سيناريوهين مختلفين لحركة المركبات، هما السيناريو الحضري والسيناريو السريع، مع تغيير كثافة الشبكة بعدد 30 و 60 و 90 مركبة، بهدف تحليل تأثير الازدحام وطبيعة البيئة على مؤشرات الأداء. اعتمدت الدراسة على مجموعة من مقاييس الأداء القياسية، شملت نسبة تسليم الرزم، ومتوسط التأخير، والإنتاجية، ونسبة فقدان الرزم. أظهرت النتائج أن زيادة كثافة المركبات تؤدي إلى تدهور تدريجي في أداء الشبكة، خصوصا في البيئة الحضرية ذات الازدحام العالي والتغير السريع في الطوبولوجيا. كما بينت النتائج تفوق بروتوكول GPSR في معظم السيناريوهات، سواء في البيئات الحضرية أو على الطرق السريعة، نظرا لاعتماده على التوجيه الجغرافي وتقليل حمل التوجيه. من جهة أخرى، أثبتت خوارزمية REM كفاءة عالية في إدارة الازدحام، حيث حققت أفضل النتائج من حيث زيادة نسبة تسليم الرزم، وتقليل التأخير، وتقليل فقدان الرزم مقارنة بـ DropTail و RED، خاصة عند الكثافات العالية. تؤكد نتائج البحث أن الدمج بين بروتوكولات التوجيه الجغرافية وخوارزميات إدارة الطوابير الذكية يعد خيارا فعالا لتحسين أداء شبكات VANET في البيئات المختلفة.

الكلمات المفتاح : شبكات المركبات اللاسلكية، VANET، بروتوكولات التوجيه، خوارزميات إدارة الطوابير .

---

\* عضو هيئة تدريسية- قسم الشبكات الحاسوبية و النظم- كلية الهندسة المعلوماتية-جامعة حمص.

**Studying of the Impact of Scheduling Algorithms on the  
Performance of Routing Protocols in Vehicle Ad Hoc  
Networks(VANET)**

Dr.eng. Ahmad Alali\*

**ABSTRACT**

This paper aims at investigating the impact of Active Queue Management (AQM) algorithms on the performance of routing protocols in Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs). Using the NS-3 network simulator, four routing protocols—AODV, DSR, DSDV, and GPSR—were evaluated under three queue management algorithms: DropTail, RED, and REM. The experiments were conducted under two different vehicular mobility scenarios, namely urban and highway scenarios, varying the network density with 30, 60, and 90 vehicles in order to analyze the effects of congestion and environmental characteristics on network performance.

This paper employed a set of standard performance metrics, including packet delivery ratio, average end-to-end delay, throughput, and packet loss ratio. The results indicate that increasing vehicle density leads to a gradual degradation in network performance, particularly in urban environments characterized by high congestion and rapid topology changes. Furthermore, the results show that the GPSR protocol outperforms the other routing protocols in most scenarios, both in urban and highway environments, due to its reliance on geographic routing and reduced routing overhead.

On the other hand, the REM algorithm demonstrated high efficiency in congestion management, achieving the best performance in terms of higher packet delivery ratio, lower delay, and reduced packet loss compared to DropTail and RED, especially under high-density conditions. The findings confirm that combining geographic routing protocols with intelligent queue management algorithms is an effective approach to enhancing VANET performance across diverse environments

**Keywords:** VANET, Routing Protocols, Active Queue Management.

---

\* Lecturer, Department of Systems and Computer Networks, Faculty Of Informatics Engineering, Homs University.

#### 1. مقدمة:

تعد الشبكات اللاسلكية النقالة من الأنظمة الشبكية الديناميكية التي تتكون من مجموعة من العقد المتعاونة، القادرة على الحركة المستمرة وتبادل البيانات فيما بينها دون الاعتماد على بنية تحتية ثابتة. تعتمد هذه الشبكات على آلية الاتصال الذاتي، حيث تقوم العقد بدور المرسل والمستقبل والموجه في الوقت نفسه، وتتخذ قرارات التوجيه بشكل مستقل بالاعتماد على حالة الشبكة وتعير طوبولوجيتها.

تلعب بروتوكولات التوجيه دورا محوريا في تحديد أداء هذا النوع من الشبكات، إذ تؤثر آلية اكتشاف المسارات وصيانتها بشكل مباشر على كفاءة الاتصال وجودة الخدمة. ويختلف أداء بروتوكولات التوجيه باختلاف البيئة التشغيلية وطبيعة الحركة، الأمر الذي يجعل اختيار البروتوكول المناسب تحديا أساسيا، خاصة في الشبكات ذات التغيير السريع في الطوبولوجيا مثل شبكات المركبات اللاسلكي (VANET).

من جهة أخرى، يتم تخزين رزم البيانات مؤقتا ضمن طوابير (Queues) داخل العقد الشبكية بهدف تنظيم تدفق البيانات والحد من حالات الازدحام. وتعد خوارزميات جدولة الطوابير المسؤولة

عن إدارة هذه الطوابير من العوامل المؤثرة بشكل مباشر على مؤشرات الأداء، إذ تحدد ترتيب إرسال الرزم، وآلية التعامل مع الازدحام، والرزم التي سيتم تمريرها أو إهمالها، إضافةً إلى التحكم بزمن الانتظار والتأخير داخل الشبكة.

يحدث الازدحام في الشبكة عادةً عندما يتجاوز معدل إرسال الرزم قدرة العقد أو القناة اللاسلكية على الاستقبال والمعالجة، مما يؤدي إلى زيادة التأخير، وارتفاع نسبة فقدان الرزم، وهدر موارد الشبكة. وتزداد خطورة هذه المشكلات في التطبيقات الحساسة للزمن، مثل نقل الصوت والفيديو، التي تتطلب تأخيراً منخفضاً واستقراراً عالياً في الاتصال. انطلاقاً من ذلك، تبرز أهمية دراسة تأثير خوارزميات إدارة وجدولة الطوابير على أداء بروتوكولات التوجيه، ولا سيما في بيئات شبكات المركبات اللاسلكية VANETS التي تتميز بكثافة عقد متغيرة وسرعات عالية وتغير مستمر في الطوبولوجيا. يهدف هذا البحث إلى تحليل هذا الأثر من خلال تقييم أداء مجموعة من بروتوكولات التوجيه الشائعة عند تطبيق خوارزميات جدولة مختلفة، بهدف الوصول إلى حلول أكثر كفاءة لتحسين جودة الخدمة وأداء الشبكة في البيئات المختلفة.

## 2. الهدف من البحث وأهميته:

نظراً للطبيعة الديناميكية للشبكات اللاسلكية النقالة، وما يرافقها من تغيرات مستمرة في بنية الشبكة وطوبولوجيتها نتيجة حركة العقد، تبرز الحاجة إلى بروتوكولات توجيه فعالة قادرة على ضمان استقرار الاتصال وتحقيق جودة خدمة مقبولة. وتزداد أهمية ذلك في شبكات المركبات اللاسلكية (VANETS)، حيث تشارك جميع العقد في عملية بناء المسارات وتحديثها ضمن بيئات ذات كثافة وحركة متغيرة.

يهدف هذا البحث في جانبه الأول إلى تقييم جودة الخدمة لبروتوكولات التوجيه الشائعة في شبكات المركبات اللاسلكية VANET، من خلال تحليل أدائها ضمن بيئات تشغيل مختلفة، وتحديد البروتوكول الأكثر كفاءة من حيث نسبة تسليم الرزم، والتأخير، والإنتاجية، وفقدان الرزم. ويسهم هذا التقييم في فهم تأثير طبيعة البيئة وكثافة العقد على أداء بروتوكولات التوجيه المختلفة.

أما في جانبه الثاني، فيهدف البحث إلى دراسة أثر خوارزميات جدولة وإدارة الطوابير على أداء بروتوكولات التوجيه في الشبكات اللاسلكية النقالة، وذلك لما تلعبه هذه الخوارزميات من دور أساسي في تنظيم تدفق البيانات والتحكم بالازدحام داخل الشبكة. إذ تسهم خوارزميات الجدولة الفعالة في تقليل التصادمات، والحد من التأخير، وتحسين استغلال موارد الشبكة، مما يؤدي إلى تحسين جودة الخدمة، خاصة في التطبيقات الحساسة للزمن مثل نقل الصوت والفيديو.

تكمن أهمية هذا البحث في الربط بين بروتوكولات التوجيه وخوارزميات إدارة الطوابير ضمن بيئة شبكات المركبات اللاسلكية VANET ، وتقديم تحليل يوضح تأثير هذا الدمج على الأداء العام للشبكة. كما تسهم نتائج الدراسة في توفير مرجع علمي يساعد الباحثين ومصممي الشبكات على اختيار الحلول الأنسب لتحسين موثوقية الاتصال وجودة الخدمة في شبكات المركبات اللاسلكية.

### 3. الدراسات السابقة:

ركزت ابحاث مثل الدراسة (1) على اثر خوارزميات الجدولة على اداء بروتوكولات التوجيه في الشبكات اللاسلكية النقالة حيث تمت المقارنة بين ثلاث خوارزميات جدولة DropTail,RED,REM وباستخدام ثلاث بروتوكولات توجيه DSDV,DSR,AODV ونستنتج من هذه الدراسة أنه تختلف أداء بروتوكولات التوجيه في الشبكات اللاسلكية النقالة بالنسبة لمعايير جودة الخدمة حسب البيئة التشغيلية . أداء بروتوكولي AODV,DSR أفضل من البروتوكول DSDV الذي يكون فيه متوسط تأخير رزم البيانات أقل بالنسبة للبيئات المدروسة ويكون لبروتوكول DSDV نفس الأداء بالنسبة لنسبة تسليم رزم البيانات والإنتاجية ومتوسط تأخير الرزم في خوارزميتي الاكتشاف المبكر العشوائي(RED),التعليم الأسي العشوائي(REM) مع زيادة سرعة العقد وزمن التوقف وله نفس الأداء بالنسبة لنسبة تسليم رزم البيانات والإنتاجية ومتوسط تأخير الرزم في خوارزميتي الحذف من النهاية (DropTail),الاكتشاف المبكر العشوائي(RED) مع زيادة عدد العقد والاتصالات الأعظمية بينها. على الرغم من ان هذه الدراسة ركزت على الشبكات اللاسلكية النقالة ولم تطرق لموضوع شبكات المركبات اللاسلكية تناولت عدة أبحاث حديثة شبكات المركبات اللاسلكية (VANETs) من جوانب مختلفة لتحسين التوجيه والأداء تحت بيئات الحركة الديناميكية العالية.

فعلى سبيل المثال، ركزت الدراسة (2) على تحسين الأداء لبروتوكولات التوجيه مثل QOS- AODV و GPSR من خلال تحسين معاملات التوجيه، مما أدى إلى تحسين نسبة تسليم الرزم وتقليل التأخير في سيناريوهات حضرية وسريعة، مؤكداً أهمية التخصيص الدقيق لبروتوكولات التوجيه في الظروف المختلفة لشبكات المركبات. بالإضافة إلى ذلك، ركزت أبحاث مثل الدراسة (3) على تقييم جودة الخدمة لمجموعة من بروتوكولات التوجيه التقليدية مثل AODV، DSR، GPSR ضمن بيئات شبكات المركبات اللاسلكية VANET الحضرية، وذلك باستخدام محاكاة حديثة لقياس مؤشرات الأداء الأساسية مثل التأخير والإنتاجية ونسبة فقدان الرزم، مما يعزز فهم الفوارق بين هذه البروتوكولات في ظل حركة المركبات المتغيرة.

على صعيد خوارزميات جدولة الطوابير وإدارة الازدحام، رغم أن معظم الدراسات المتخصصة في AQM تركزت في الأصل على الشبكات اللاسلكية النقالة MANET أو شبكات TCP عموماً، إلا أن هناك توجهاً بحثياً حديثاً في دمج تقنيات إدارة الطوابير مع خوارزميات متقدمة مثل التعلم المعزز لتحسين استقرار الشبكات الديناميكية كما في الدراسة (4) مما يشير إلى إمكان تطوير خوارزميات AQM قابلة للتكيف مع تغيرات في حركة المركبات مستقلاً.

رغم تعدد هذه الدراسات، تبقى الدراسات التي تربط بين خوارزميات إدارة الطوابير AQM وبروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية VANET المختلفة نادرة، مما يبرز أهمية وإسهام هذا البحث في سد هذه الفجوة العلمية من خلال مقارنة تأثير خوارزميات مثل DropTail، RED، REM على أداء بروتوكولات التوجيه في بيئتين مختلفتين (البيئة الحضرية والبيئة السريعة) وتحت تأثير كثافات حركة متغيرة.

#### 4. بروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية (5) (1)

تصنف بروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية (VANETs) إلى عدة فئات رئيسية، وذلك وفقاً لآلية اكتشاف المسارات وإدارتها داخل الشبكة، ومن أبرزها بروتوكولات التوجيه الاستباقية، وبروتوكولات التوجيه التفاعلية، وبروتوكولات التوجيه المعتمدة على الموقع وغيرها.

ويسهم هذا التصنيف في فهم سلوك كل فئة وتأثيرها على أداء الشبكة في البيئات ذات الحركة العالية والتغير المستمر في الطوبولوجيا (6).

#### 4.1 بروتوكولات التوجيه الاستباقية (Proactive Routing Protocols) (5) (1)

تعتمد بروتوكولات التوجيه الاستباقية على مبدأ الاحتفاظ بمسارات جاهزة نحو جميع العقد الأخرى في الشبكة في جميع الأوقات، وذلك من خلال تبادل تحديثات دورية لجداول التوجيه بين العقد. تتضمن هذه التحديثات معلومات عن حالة الوصلات والمسارات، إضافة إلى تحديثات طارئة ترسل عند حدوث أي تغيير في بنية الشبكة، مثل إضافة وصلة جديدة أو انقطاع أخرى، ويزداد معدل هذه التحديثات بازدياد سرعة حركة العقد (6).

تتميز هذه البروتوكولات بزمن وصول منخفض للزخم، نظراً لتوفر المسارات مسبقاً، إلا أن من أبرز سلبياتها حمل التوجيه المرتفع الناتج عن التحديثات الدورية، والذي قد يكون كبيراً في الشبكات ذات الكثافة العالية أو الحركة السريعة، مما يؤدي إلى استهلاك موارد الشبكة والتأثير سلباً على عرض الحزمة.

يعد بروتوكول توجيه شعاع المسافة المتسلسل (Destination-Sequenced Distance Vector – DSDV) من أشهر البروتوكولات الاستباقية، وقد تم اعتماده في هذا البحث لدراسة أثر خوارزميات جدولة الطوابير على أدائه ضمن بيئات شبكات المركبات اللاسلكية VANET المختلفة.

#### 4.2 بروتوكولات التوجيه التفاعلية (Reactive Routing Protocols) (5) (1)

ظهرت بروتوكولات التوجيه التفاعلية كحل بديل لتقليل حمل التوجيه المرتفع في البروتوكولات الاستباقية، خاصة في الشبكات التي تتغير طوبولوجيتها بشكل كبير وتكون مواردها محدودة. تعتمد هذه البروتوكولات على اكتشاف المسار عند الطلب، حيث لا يتم إنشاء مسار بين عقدتين إلا عندما تكون هناك حاجة فعلية لإرسال البيانات. عندما ترغب عقدة المصدر بإرسال بيانات

إلى عقدة الهدف، تقوم أولاً بالتحقق من وجود مسار صالح في جدول التوجيه الخاص بها. وفي حال عدم توفر مسار، يتم تنفيذ إجراء اكتشاف المسار لإيجاد طريق مناسب إلى الوجهة. وبهذا الأسلوب، يتم تجنب استهلاك موارد الشبكة في إنشاء مسارات غير مستخدمة (6).

من أبرز ميزات بروتوكولات التوجيه التفاعلية تقليل حمل التوجيه واستهلاك عرض الحزمة مقارنة بالبروتوكولات الاستباقية، إلا أن من سلبياتها الرئيسية زيادة زمن التأخير الناتج عن عملية اكتشاف المسار، خصوصاً في البيئات ذات الحركة العالية. من أشهر بروتوكولات التوجيه التفاعلية المستخدمة في شبكات المركبات اللاسلكية بروتوكول توجيه المصدر الديناميكي (Dynamic Source Routing – DSR) وبروتوكول توجيه شعاع المسافة حسب الطلب (Ad hoc On-Demand Distance Vector – AODV) وقد تم اعتماد هذين البروتوكولين في هذا البحث لتحليل تأثير خوارزميات جدولة الطوابير على أدائهما (6).

### 4.3 بروتوكولات التوجيه المعتمدة على الموقع (Position-Based Routing Protocols): (5) (6)

تعتمد بروتوكولات التوجيه المعتمدة على الموقع على المعلومات الجغرافية لمواقع العقد في عملية اتخاذ قرار التوجيه، حيث تستخدم كل عقدة موقعها الحالي وموقع العقدة الوجهة، الذي يتم الحصول عليه عادة عبر نظام تحديد المواقع (GPS)، لاختيار العقدة التالية الأقرب إلى الوجهة. تعد هذه البروتوكولات مناسبة بشكل خاص لشبكات المركبات اللاسلكية، نظراً لتوفر معلومات الموقع وسرعة تغير الطوبولوجيا. كما تتميز بتقليل حمل التوجيه، إذ لا تعتمد على إنشاء مسارات كاملة مسبقاً. يعد بروتوكول التوجيه الجغرافي (Greedy Perimeter Stateless Routing – GPSR) من أشهر البروتوكولات المعتمدة على الموقع، وقد تم تضمينه في هذا البحث لما أظهره من كفاءة عالية في البيئات ذات الكثافة والحركة المرتفعة.

### 5. خوارزميات الجدولة (7):

يوجد عدة تقنيات لخوارزميات الجدولة منها تتخلص من الرزم عندما يحدث فيضان في الشبكة وتختبر المرسل بأن يخفف من معدل الإرسال كخوارزمية الحذف من النهاية (DropTail) (7) . خوارزميات أخرى تنتبأ بحدوث فيضان في الشبكة قبل حدوثه وتختبر المصدر بأن يخفف من معدل الإرسال كخوارزمية الاكتشاف المبكر العشوائي (RED) وخوارزمية التعليم الآسي العشوائي (REM) (7).

### 5.1 خوارزمية الحذف من النهاية (DropTail) (7) :

من أبسط خوارزميات الأرتال، في هذه الخوارزمية عندما يمتلئ الرتل بكامل سعته يتم حذف الرزم الجديدة القادمة إلى الرتل وتستمر عملية حذف جميع الرزم الجديدة إلى أن يصبح بإمكان الرتل استقبالها من جديد. يتم تهيئة الطول الأعظمي للرتل بقيمة تم تعريفها بشكل مسبق وعندما يتم الوصول لهذه القيمة تهمل عندها جميع الرزم الجديدة القادمة وإرسال إشارة للمصدر لتخفيف معدل الإرسال (8). هذه الخوارزمية تعالج كل الرزم بشكل متماثل بغض النظر عن نوع البيانات. يظهر الشكل (1) (8) احتمال إهمال الرزم في هذه الخوارزمية، عندما يتجاوز طول الرتل الحد الأعظمي يتم إهمال جميع الرزم القادمة.

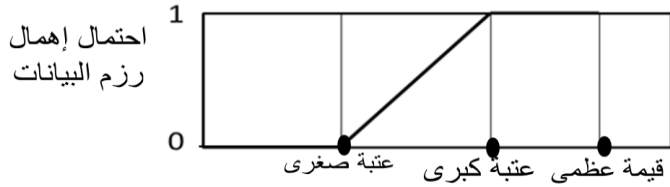


الشكل (1) : احتمال إهمال الرزم في خوارزمية الجدولة الحذف من النهاية (DropTail)

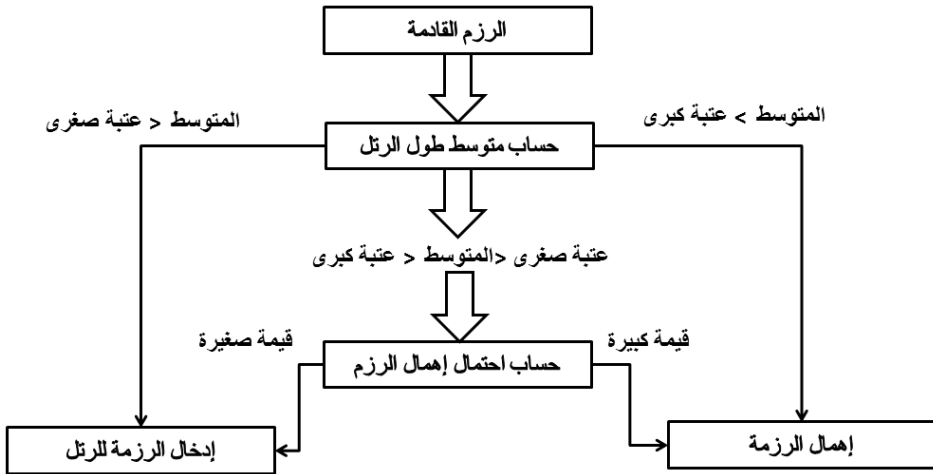
### 5.2 خوارزمية الاكتشاف المبكر العشوائي (RED) (7) :

المشكلة الأساسية في خوارزمية الحذف من النهاية (DropTail) هي أنه المرسل لا يخفف من معدل الإرسال إلا بعد اكتشاف ضياع لبعض رزم البيانات وبالتالي عدد كبير من الرزم تهمل بسبب أن المصدر يقوم بالإرسال بمعدل لا تدعمه الشبكة. جاءت خوارزمية الاكتشاف المبكر العشوائي (RED) لتخفف من المشكلة السابقة عن طريق الاكتشاف المبكر للازدحام وإرسال إشارة ازدياح (notification) إلى المرسل ليخفف معدل الإرسال قبل حدوث فيضان في الرتل. في هذه الخوارزمية، كما واضح من الشكل (3) (8) يتم مراقبة متوسط حجم الرتل (avg) ويختبر فيما

إذا كان بين عتبة صغرى ( $minth$ ) وعتبة كبرى ( $maxth$ ) فإن كان بين هاتين العتبتين فهذا يعني أن الرزم القادمة ستهمل باحتمال  $p=p(avg)$  وإن كان أكبر من العتبة الكبرى ستهمل الرزمة وإن كان أصغر من العتبة الصغرى تدخل الرزمة للرتل. يظهر الشكل (2) احتمال إهمال الرزم في خوارزمية الجدولة الاكتشاف المبكر العشوائي (RED) (8).



الشكل (2) : احتمال إهمال الرزم في خوارزمية الجدولة الاكتشاف المبكر العشوائي (RED) (8)



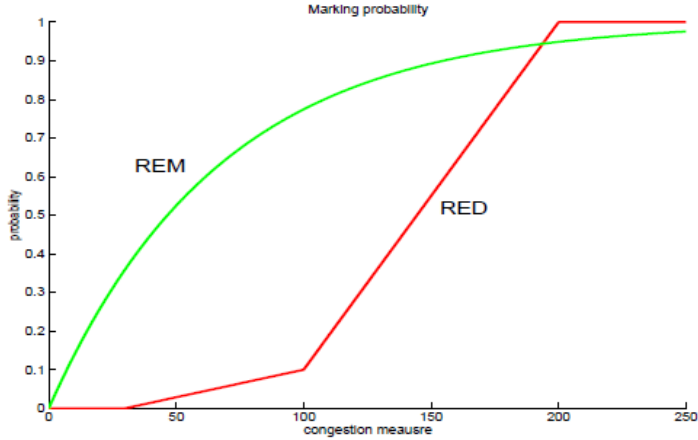
الشكل (3) : آلية عمل خوارزمية الجدولة الاكتشاف المبكر العشوائي (RED) (8).

### 5.3 خوارزمية التعليم الأسّي العشوائي (REM) Random Exponential Marking

(7):

الهدف الأساسي في هذه الخوارزمية هي تأمين استقرار معدل الإرسال مع سعة الشبكة بغض النظر عن عدد المستخدمين وهنا فإن كل رتل يحتفظ بمتحول Price كقياس للتصادم. إن

المتحول Price هو متحول يتم تحديثه باستمرار إما دورياً أو بشكل غير متزامن وذلك حسب تطابق معدل تدفق البيانات مع سعة الشبكة فزيادة Price تعني بالمقابل وجود زيادة في عدم التطابق ونقصانه يدل على تطابق. مما سبق نجد أنه كلما زاد عدد المصادر (الأجهزة المرسله) فإنه يزداد متحول ال price وهذا ما يدعي إلى الحاجة لإرسال إشارة قوية لتخفيض معدلات الإرسال لدى جميع المصادر حتى نصل إلى Price مساوٍ للصفر. يتم تعليم الرزم لإهمالها باحتمالية حسب Price(8). يتم تعديل قيمة ال Price حسب الفرق بين معدل وصول الرزم واستطاعة الوصلة الخارجية المتوفرة والفرق بين طول الرتل الحالي و طول الرتل الهدف. من أجل استقرار الشبكة يجب أن يكون طول الرتل الحالي مساوي لطول الرتل الهدف و معدل وصول الرزم مساوي لاستطاعة الوصلة الخارجية. يظهر الشكل(4) احتمال تعليم الرزم لإهمالها في خوارزميتي الاكتشاف المبكر العشوائي(RED) والتعليم الأسي العشوائي(REM) حسب مقياس التصادم(8).



الشكل(4) : احتمال تعليم الرزم لإهمالها في خوارزميتي الاكتشاف المبكر العشوائي(RED) والتعليم الأسي العشوائي(REM) (8)

1. القسم العملي:

## دراسة أثر خوارزميات الجدولة على أداء بروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية VANET

يهدف هذا القسم إلى تقديم الجانب التطبيقي للبحث، والذي يتضمن تصميم التجارب، إعداد بيئة المحاكاة، تنفيذ عمليات الجدولة والتوجيه، استخراج النتائج، وتحليل أداء البروتوكولات المختلفة عند تطبيق خوارزميات جدولة الطوابير (AQM) في شبكات المركبات اللاسلكية VANETS.

تعتمد منهجية هذا البحث على تنفيذ مجموعة من التجارب باستخدام نموذج محاكاة مبسط، يعتمد على محاكاة ازدحام الشبكة وحركة المركبات، ثم قياس أثر خوارزميات الجدولة على أداء بروتوكولات التوجيه. تم اختيار أربع بروتوكولات توجيه (AODV, DSR, DSDV, GPSR) وتطبيق ثلاث خوارزميات جدولة (DropTail, RED, REM) وذلك كونها الأشهر والاکثر استخداماً في هذا النوع من الشبكات. تم تصميم سيناريوهات الحركة باستخدام بيئتي محاكاة البيئة الأولى من خلال استخدام طريق حضري Urban والبيئة الثانية من خلال استخدام طريق سريع highway مع تغيير في كثافة عدد المركبات (30،60،90) مركبة في كل بيئة.

يوضح الجدول (1) التالي الفروقات الجوهرية بين البيئتين الحضرية والسريعة، حيث تشكل البيئة الحضرية تحدياً كبيراً لبروتوكولات التوجيه وخوارزميات الجدولة بسبب كثافة المركبات، العوائق، والتغير السريع في الطوبولوجيا، في حين يوفر سيناريو الطريق السريع بيئة اتصال أكثر استقراراً وأفضل من حيث مؤشرات الأداء.

جدول (1): مقارنة مواصفات السيناريو الحضري وسيناريو الطريق السريع المستخدمين في هذه الدراسة

عنصر المقارنة	السيناريو الحضري (Urban)	السيناريو السريع (Highway)
نوع البيئة	بيئة حضرية مكتظة	طريق سريع مفتوح
شكل الطريق	شبكة مربعة/مستطيلة (Grid)	مستقيم أو شبه مستقيم
عدد التقاطعات	15 - 40 تقاطعاً	لا يوجد
إشارات المرور	موجودة	غير موجودة

عدد المسارات	2 - 1 مسار في كل اتجاه	3 - 2 مسارات في كل اتجاه
طول الطريق	150 - 300 متر لكل مقطع	2 - 6 كيلومترات
العوائق	مبانٍ عالية (Urban Canyon)	لا توجد عوائق
مناطق الازدحام	مرتفعة خصوصاً عند التقاطعات	منخفضة جداً
سرعة المركبات	30 - 60 كم/ساعة	80 - 120 كم/ساعة
نموذج الحركة	Krauss Car Model	Krauss Car Model
نمط الحركة	غير منتظم، توقفات وانعطافات	خطي منتظم، بدون توقف
معدل التسارع/التباطؤ	مرتفع	منخفض إلى متوسط
عدد المركبات	30 / 60 / 90 مركبة	30 / 60 / 90 مركبة
متوسط عدد الجيران	8 - 15 مركبة	3 - 7 مركبات
التداخل اللاسلكي	مرتفع	منخفض
التغير في الطوبولوجيا	كبير جداً	متوسط

تم اختيار معاملات المحاكاة بما يحقق توازناً بين الدقة الواقعية وقابلية التنفيذ، مع اعتماد قيم مستخدمة على نطاق واسع في أبحاث شبكات المركبات اللاسلكية VANET لضمان عدالة المقارنة وموثوقية النتائج. يظهر الجدول (2) مواصفات بيئة المحاكاة.

الجدول (2) مواصفات بيئة المحاكاة.

الفئة	المعامل	القيمة / الوصف
محاكي الشبكات	Network Simulator	ns-3
محاكي الحركة	Mobility Simulator	SUMO

دراسة أثر خوارزميات الجدولة على أداء بروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية VANET

نوع الشبكة	Network Type	Vehicular Ad Hoc Network (VANET)
المعيار اللاسلكي	PHY / MAC Standard	IEEE 802.11p (WAVE)
نطاق التردد	Frequency Band	5.9 GHz
نموذج الانتشار	Propagation Model	Two-Ray Ground
مدى الإرسال	Transmission Range	250-300 م
نوع القناة	Channel Type	Wireless Channel
أنماط الحركة	Mobility Models	Krauss
سيناريوهات الحركة	Mobility Scenarios	Highway ، Urban
عدد المركبات	Number of Vehicles	30 - 60 - 90 مركبة
سرعة المركبات (Urban)	Vehicle Speed	30 - 60 كم/ساعة
سرعة المركبات (Highway)	Vehicle Speed	80 - 120 كم/ساعة
بروتوكولات التوجيه	Routing Protocols	،DSDV ،DSR ،AODV GPSR
خوارزميات الجدولة (AQM)	Queue Management	REM ،RED ،DropTail
نوع حركة البيانات	Traffic Type	CBR (UDP)
حجم الحزمة	Packet Size	512 بايت
معدل الإرسال	Packet Rate	4 حزمة/ثانية

طول الطابور	Queue Length	50 حزمة
زمن المحاكاة	Simulation Time	600 ثانية
عدد التكرارات	Number of Runs	10 مرات لكل سيناريو
البذور العشوائية	Random Seeds	عدة قيم لضمان الموثوقية
مؤشرات الأداء	Performance Metrics	PDR ، Delay ، Throughput ، Packet Loss
بيئة التشغيل	OS	Linux / Ubuntu

### توليد الحركة:

تعتبر آلية توليد الحركة من أهم عناصر محاكاة شبكات المركبات اللاسلكية، حيث تؤثر بشكل مباشر على أداء البروتوكولات ونتائج التجارب. تهدف هذه الآلية إلى محاكاة حركة المركبات على الطرق بشكل واقعي، بما في ذلك السرعات المختلفة، التوقف عند الإشارات، تغيير الحارات، والتفاعل مع المركبات الأخرى. يتم استخدام نماذج حركة محددة، مثل نموذج الطريق الحضري (Urban Mobility Model) الذي يحاكي شوارع المدينة والإشارات المرورية، ونموذج الطريق السريع (Highway Mobility Model) الذي يعكس حركة المركبات بسرعات عالية مع تباعد أقل بين المركبات. تم توليد الحركة باستخدام أداة المحاكاة المتقدمة SUMO، حيث يتم تحديد مسارات المركبات، السرعات، توقيتات البداية والنهاية، وتوزيع المركبات على الطرق، لتوفير بيئة محاكاة دقيقة وواقعية لاختبار البروتوكولات المختلفة.

### مؤشرات الأداء:

يعتمد هذا البحث على مجموعة من مؤشرات الأداء الأساسية لتقييم أثر خوارزميات جدولة الطوابير على أداء بروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية. تشمل هذه المؤشرات نسبة تسليم الرزم (Packet Delivery Ratio – PDR) التي تعكس كفاءة البروتوكول في إيصال الرزم بنجاح إلى الوجهة النهائية، ومعدل التأخير من طرف إلى طرف (End-to-End Delay) الذي يعبر عن الزمن اللازم لوصول الرزمة من المرسل إلى المستقبل، ويمثل مؤشراً مهماً لجودة الخدمة خاصة في التطبيقات الزمنية الحرجة. كما تم اعتماد الإنتاجية (Throughput) لقياس معدل البيانات المستلمة بنجاح خلال وحدة الزمن، ونسبة فقدان الرزم (Packet Loss Ratio) لتحديد

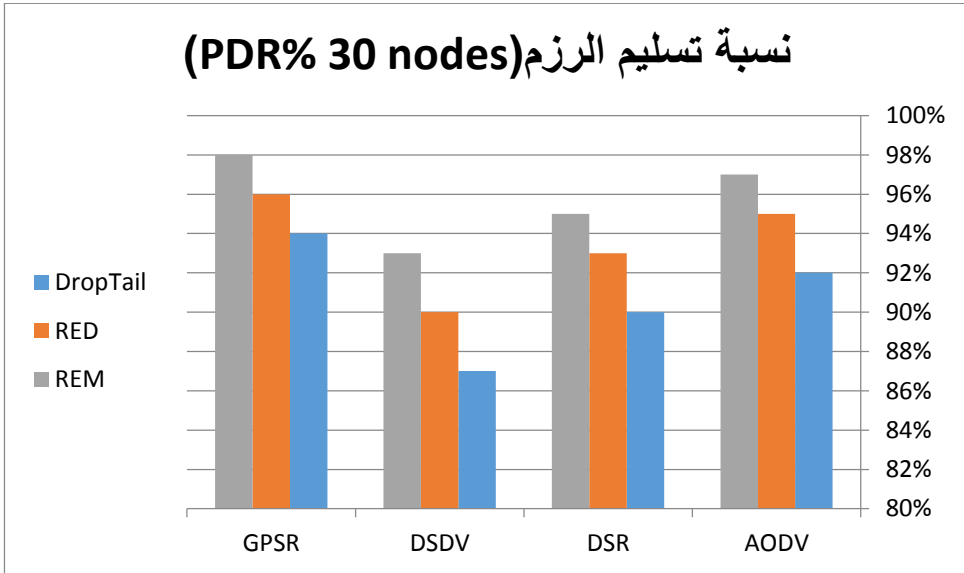
مستوى الازدحام وتأثير آليات الجدولة على استقرار الشبكة. وقد استخدمت هذه المؤشرات مجتمعة لإجراء مقارنة دقيقة بين بروتوكولات التوجيه المختلفة تحت تأثير خوارزميات الجدولة المدروسة، بما يتيح استخلاص نتائج واقعية حول كفاءة كل بروتوكول وخوارزمية في تحسين أداء شبكات المركبات اللاسلكية.

### التنفيذ العملي:

سيتم في هذا القسم دراسة اثر خوارزميات الجدولة DropTail,RED,REM على أداء بروتوكولات التوجيه AODV,DSR,DSDV باستخدام سيناريوهين الاول بيئة حضرية والثاني باستخدام بيئة طريق سريع وذلك مع تغير كثافة المركبات على الطريق 30 و 60 و 90 مركبة.

#### 6.1 أولاً السيناريو الحضري من أجل 30 و 60 و 90 عقدة:

##### 6.1.1 السيناريو الحضري من اجل 30 عقدة:

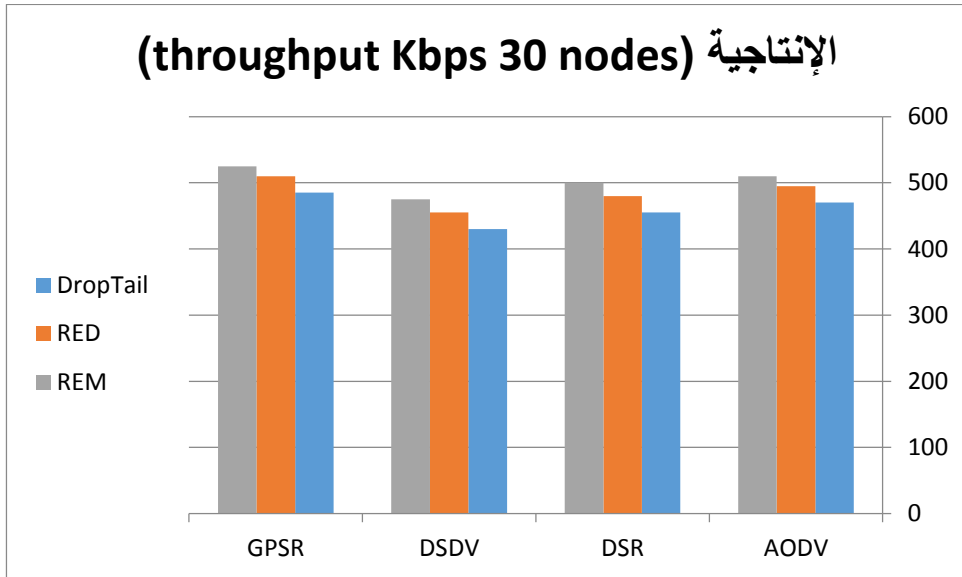


الشكل (5) نسبة تسليم الرزم في السيناريو الحضري من اجل عدد عقد 30.

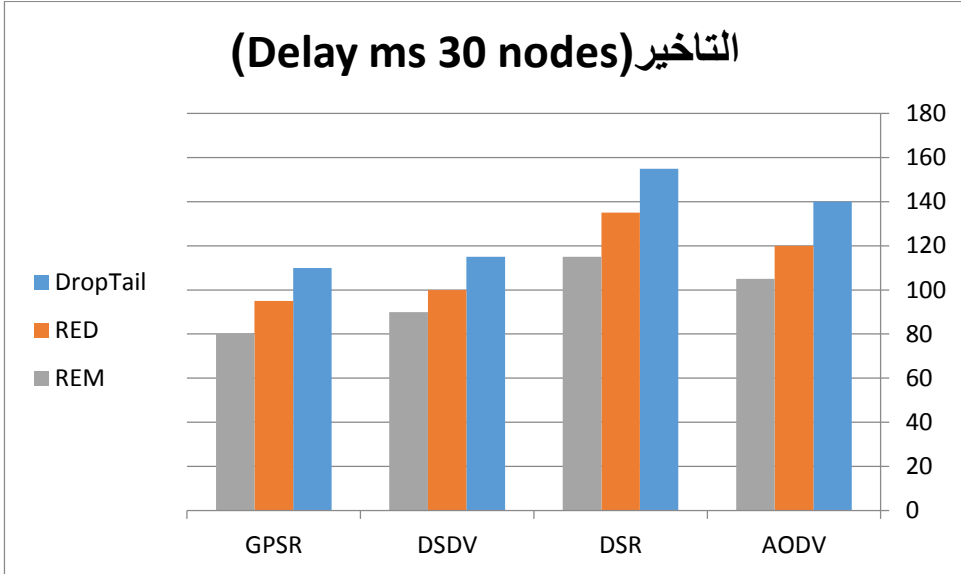
يبين الشكل(5) نسبة تسليم الرزم في السيناريو الحضري عند عدد 30 عقدة نجد أن جميع بروتوكولات التوجيه تحقق قيمة مرتفعة نسبياً، نتيجة انخفاض مستوى الازدحام واستقرار الروابط اللاسلكية. يتفوق بروتوكول GPSR في هذا السيناريو محققاً أعلى نسبة تسليم، بسبب اعتماده على التوجيه الجغرافي وتقليل رزم التحكم. يليه بروتوكول AODV الذي يستفيد من محدودية

تغير الطوبولوجيا، بينما تسجل بروتوكولات DSDV و DSR نسباً أقل نسبياً نتيجة حمل التوجيه الإضافي وتضمين معلومات المسار. كما يلاحظ أن استخدام خوارزميات إدارة الطوابير الذكية، خصوصاً REM، يساهم في تحسين نسبة تسليم الرزم PDR مقارنةً بـ DropTail، عبر تقليل فقد الرزم عند ازدحام الطوابير.

يظهر الشكل (6) الإنتاجية عند عدد 30 عقدة ويبين أن الشبكة تحقق إنتاجية مرتفعة نسبياً بسبب انخفاض الازدحام واستقرار الروابط. يتفوق بروتوكول GPSR محققاً أعلى إنتاجية نتيجة تقليل حمل التوجيه، يليه AODV بأداء جيد ومستقر. في المقابل، تسجل DSDV و DSR إنتاجية أقل نسبياً بسبب التحديثات الدورية وتضمين معلومات المسار داخل الرزم. كما يساهم استخدام خوارزمية REM في تحسين الإنتاجية مقارنةً بـ DropTail و RED عبر التحكم الفعال بازدحام الطوابير والحفاظ على تدفق منتظم للبيانات.

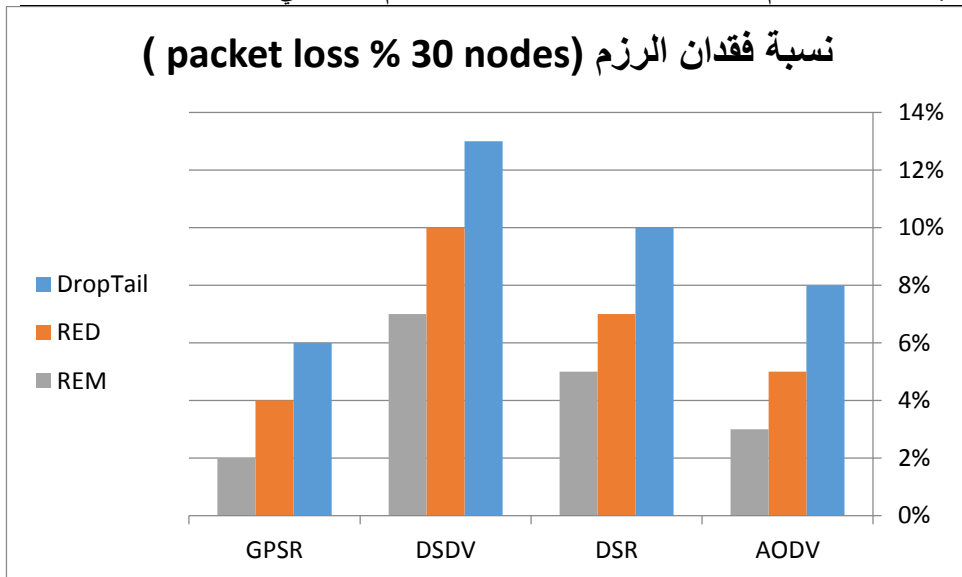


الشكل (6) الإنتاجية في السيناريو الحضري من اجل عدد عقد 30.



الشكل (7) التأخير في السيناريو الحضري من اجل عدد عقد 30.

يظهر الشكل (7) التأخير عند عدد 30 عقدة ونجد أن متوسط التأخير يكون منخفضاً نسبياً لجميع بروتوكولات التوجيه، نتيجة قلة الازدحام واستقرار المسارات. يحقق بروتوكول **GPSR** أقل تأخير بسبب اعتماده على التوجيه الجغرافي وعدم الحاجة إلى عمليات اكتشاف المسار. يليه **AODV** بتأخير مقبول، بينما تسجل **DSDV** و **DSR** قيم تأخير أعلى نسبياً بسبب التحديثات الدورية وتخزين المسارات داخل الرزم. كما يساهم استخدام خوارزمية إدارة الطوابير **REM** في تقليل التأخير مقارنةً بـ **DropTail** و **RED**، عبر منع ازدحام الطوابير وتحسين زمن الانتظار داخل العقد.



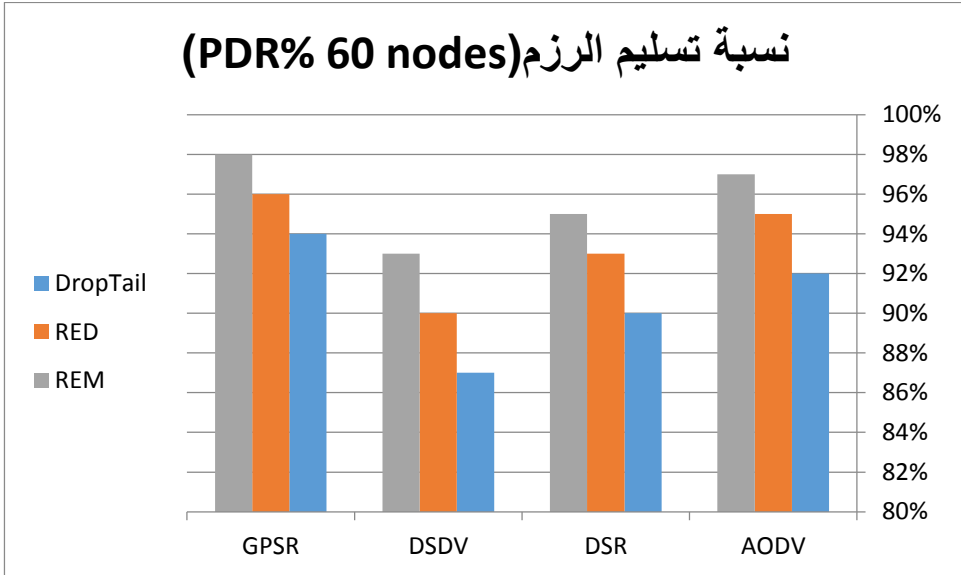
الشكل (8) نسبة فقدان الرزم في السيناريو الحضري من اجل عدد عقد 30.

يظهر الشكل (8) نسبة فقدان الرزم في السيناريو الحضري عند عدد 30 عقدة ونجد أن الفقدان يكون منخفضاً نسبياً لدى جميع بروتوكولات التوجيه، نتيجة محدودية الازدحام واستقرار الروابط اللاسلكية. يحقق بروتوكول GPSR أقل نسبة فقدان، لفعاليته في تقليل رزم التحكم وتجنب انهيار الطوابير. يليه AODV بأداء جيد، بينما تسجل DSDV و DSR نسب فقدان أعلى نسبياً بسبب حمل التوجيه الإضافي وتكرار إعادة الإرسال. كما يلاحظ أن استخدام خوارزمية REM يقلل فقدان الرزم بشكل أوضح مقارنةً ب DropTail و RED، من خلال التحكم الاستباقي في الازدحام ومنع امتلاء الطوابير.

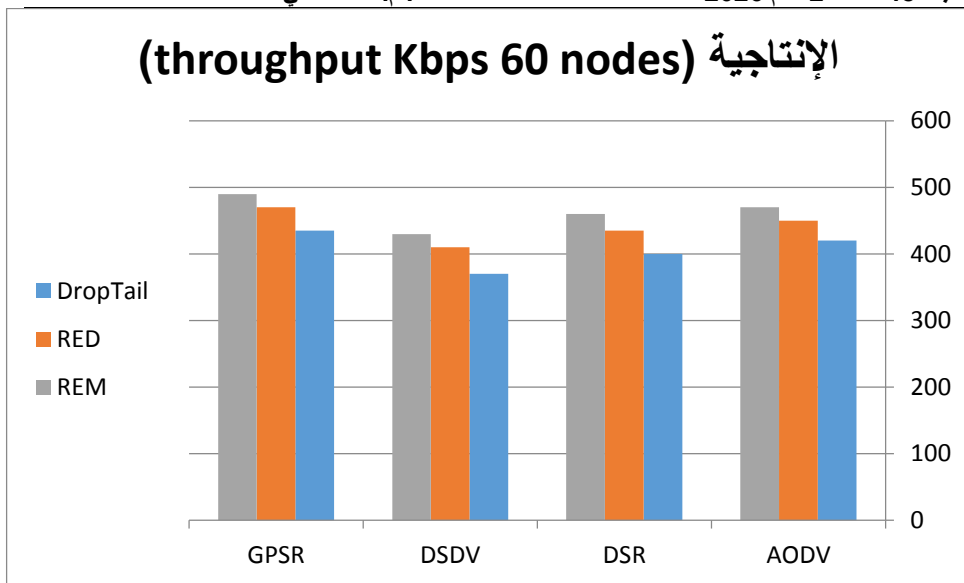
#### 6.1.2 السيناريو الحضري من اجل 60 عقدة:

يظهر الشكل (9) نسبة تسليم الرزم عند عدد 60 عقدة نجد حدوث انخفاض نسبي في نسبة تسليم الرزم مقارنةً بحالة 30 عقدة، وذلك نتيجة زيادة كثافة المركبات وارتفاع التداخل اللاسلكي وتكرار تغير الطوبولوجيا. يحقق بروتوكول GPSR أعلى نسبة تسليم رزم بين جميع البروتوكولات، خصوصاً عند استخدام خوارزمية REM، بسبب تقليل حمل التوجيه وعدم الاعتماد على اكتشاف المسارات. يأتي AODV في المرتبة الثانية بأداء جيد، بينما تسجل DSR و DSDV نسب تسليم أقل نسبياً نتيجة زيادة رزم التحكم وتكرار إعادة الإرسال. كما يلاحظ تفوق

خوارزمية REM على كل من RED و DropTail في تحسين نسبة تسليم الرزم، خاصة في بيئة ذات ازدحام متوسط، مما يؤكد فعاليتها في إدارة الطوابير داخل شبكات المركبات اللاسلكية VANET.

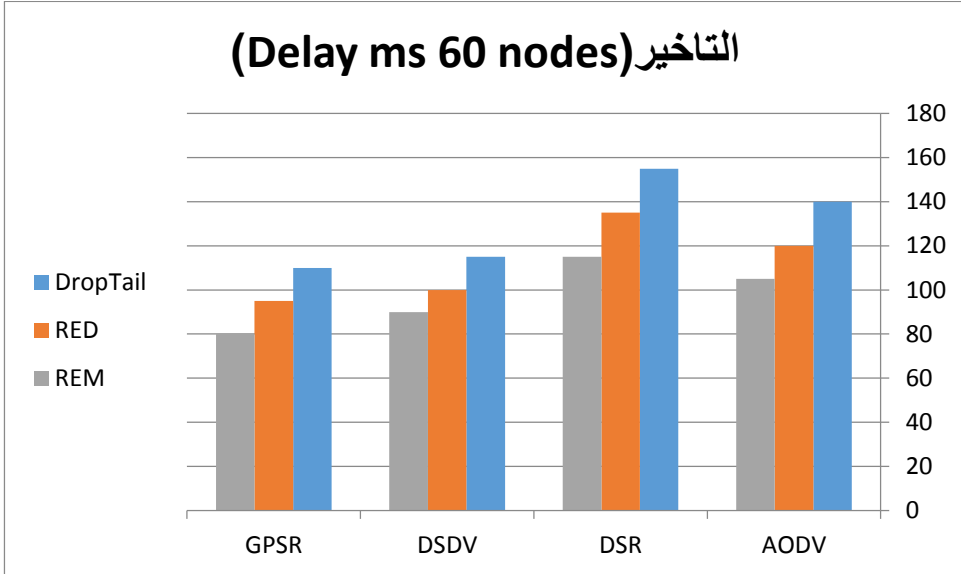


الشكل (9) نسبة تسليم الرزم في السيناريو الحضري عند عدد عقد 60.



الشكل (10) الإنتاجية في السيناريو الحضري عند عدد عقد 60.

يظهر الشكل (10) الإنتاجية عند عدد 60 عقدة نجد انخفاضاً نسبياً في الإنتاجية مقارنةً بسيناريو 30 عقدة، نتيجة زيادة الازدحام والتداخل اللاسلكي وارتفاع حمل التوجيه. يحقق بروتوكول GPSR أعلى إنتاجية بين جميع البروتوكولات، خاصةً عند استخدام خوارزمية REM، بسبب تقليل رزم التوجيه والحفاظ على تدفق بيانات مستقر. يليه بروتوكول AODV بأداء جيد، بينما تسجل DSDV و DSR إنتاجية أقل نسبياً نتيجة زيادة عمليات اكتشاف المسار وتحديث جداول التوجيه. كما يظهر تفوق واضح لخوارزمية REM مقارنةً بـ RED و DropTail في تحسين الإنتاجية، مما يؤكد فعاليتها في إدارة الازدحام في شبكات المركبات اللاسلكية ذات الكثافة المتوسطة.

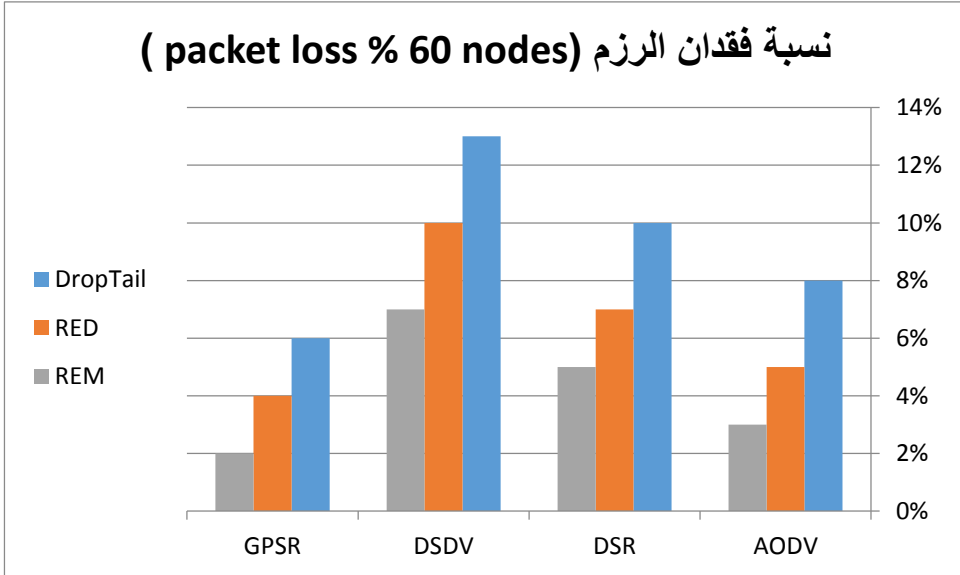


الشكل (11) التأخير في السيناريو الحضري عند عدد عقد 60.

يظهر الشكل (11) التأخير عند عدد 60 عقدة نجد ارتفاعاً ملحوظاً في متوسط التأخير مقارنةً بسيناريو 30 عقدة، وذلك نتيجة زيادة كثافة المركبات وازدحام الطوابير وارتفاع التداخل اللاسلكي. يحقق بروتوكول GPSR أقل تأخير بين جميع البروتوكولات، خصوصاً عند استخدام خوارزمية REM، بسبب تقليل عمليات اكتشاف المسار وتسريع تمرير الرزم. في المقابل، يسجل بروتوكول DSR أعلى تأخير، نتيجة الاعتماد على تضمين المسارات داخل الرزم وزيادة إعادة الإرسال. يأتي AODV و DSDV بقيم تأخير متوسطة، مع تحسن واضح عند استخدام REM مقارنةً بـ DropTail و RED ويظهر الشكل تفوق خوارزمية REM في تقليل التأخير والمحافظة على استقرار الأداء في بيئة ذات ازدحام متوسط ضمن شبكات المركبات اللاسلكية.

يظهر الشكل (12) نسبة فقدان الرزم عند عدد 60 عقدة نجد ازدياد الفقدان مقارنةً بسيناريو 30 عقدة، نتيجة ارتفاع الازدحام والتداخل اللاسلكي وزيادة حمل التوجيه. يحقق بروتوكول GPSR أقل نسبة فقدان رزم، خاصةً عند استخدام خوارزمية REM، بفضل تقليل رزم التوجيه وتجنب امتلاء الطوابير. في المقابل، يسجل DSDV أعلى نسبة فقدان، نتيجة التحديثات الدورية لجداول التوجيه وعدم ملائمتها للتغيرات السريعة في الطوبولوجيا. تأتي DSR و AODV بقيم فقدان

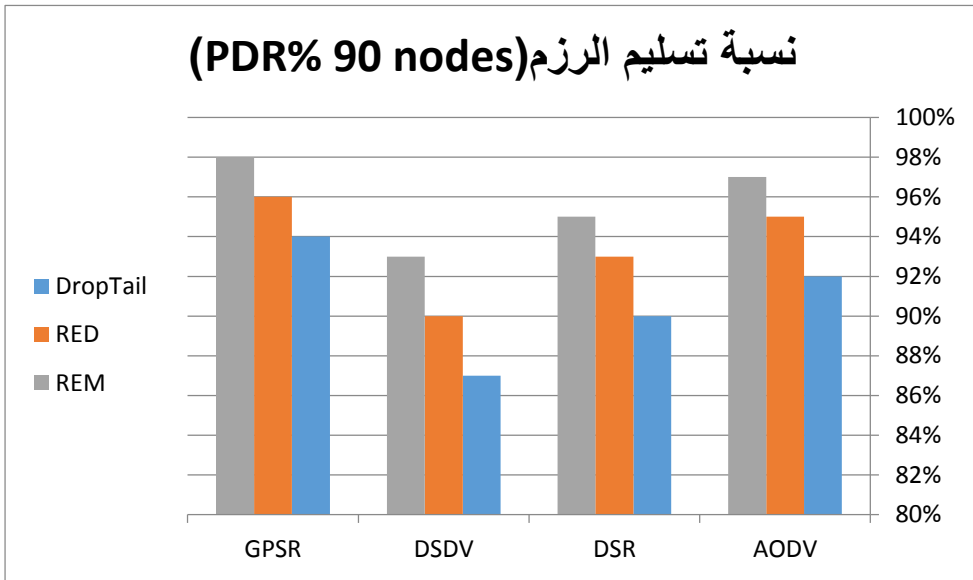
متوسطة، مع تحسن واضح عند استخدام REM مقارنةً بـ RED و DropTail ويظهر الشكل تفوق خوارزمية REM في الحد من فقدان الرزم والمحافظة على استقرار الأداء في بيئة شبكات المركبات اللاسلكية ذات كثافة متوسطة.



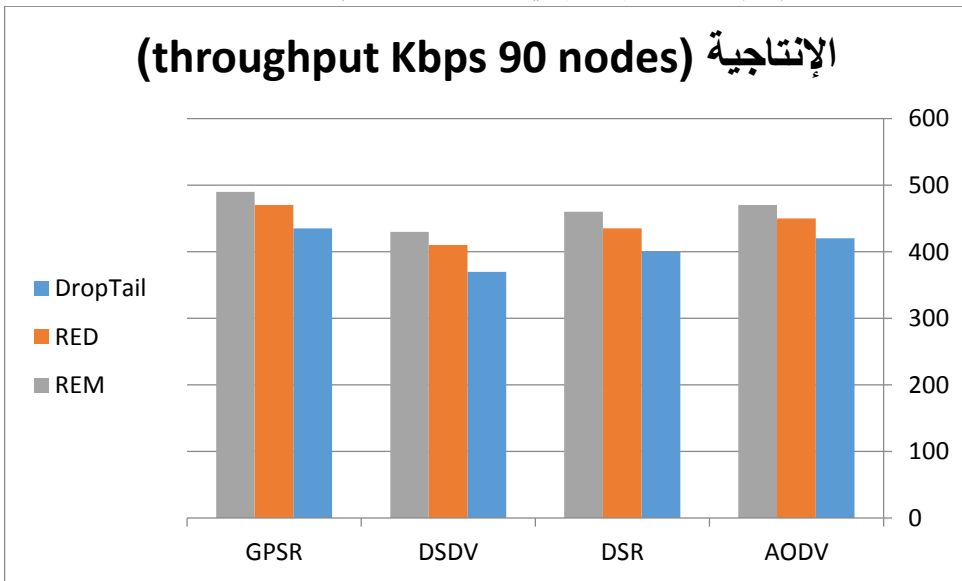
الشكل (12) نسبة فقدان الرزم في السيناريو الحضري عند عدد عقد 60.

### 6.1.3 السيناريو الحضري من اجل 90 عقدة :

يظهر الشكل (13) نسبة تسليم الرزم عند عدد 90 عقدة ونجد انخفاضاً ملحوظاً في نسبة تسليم الرزم مقارنةً بـ 30 و 60 عقدة، وذلك نتيجة الازدحام العالي، والتداخل اللاسلكي الشديد، والتغير السريع في الطوبولوجيا. يحافظ بروتوكول GPSR على أعلى نسبة تسليم رزم بين جميع البروتوكولات، خصوصاً عند استخدام خوارزمية REM، بفضل تقليل حمل التوجيه وعدم الاعتماد على اكتشاف المسارات. يأتي AODV في المرتبة الثانية بأداء مقبول، بينما تسجل DSR و DSDV نسب تسليم أقل نسبياً بسبب الزيادة الكبيرة في رزم الوجيه وتكرار إعادة الإرسال. كما يظهر المخطط تفوق خوارزمية REM بشكل واضح مقارنةً بـ RED و DropTail في تحسين نسبة تسليم الرزم، مما يؤكد فعاليتها في بيئات شبكات المركبات اللاسلكية ذات الازدحام العالي.

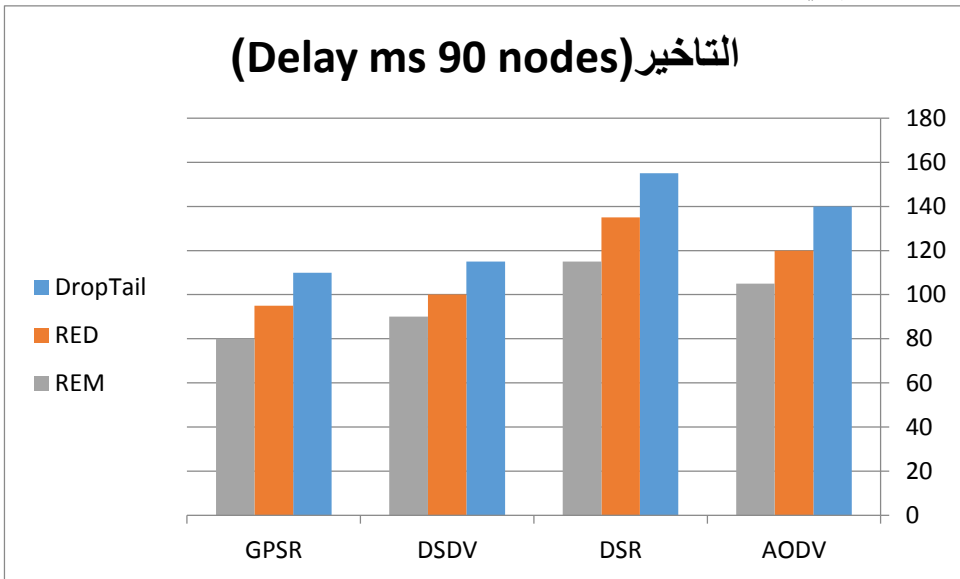


الشكل (13) نسبة تسليم الرزم في السيناريو الحضري عند عدد عقد 90.



الشكل (14) الإنتاجية في السيناريو الحضري عند عدد عقد 90.

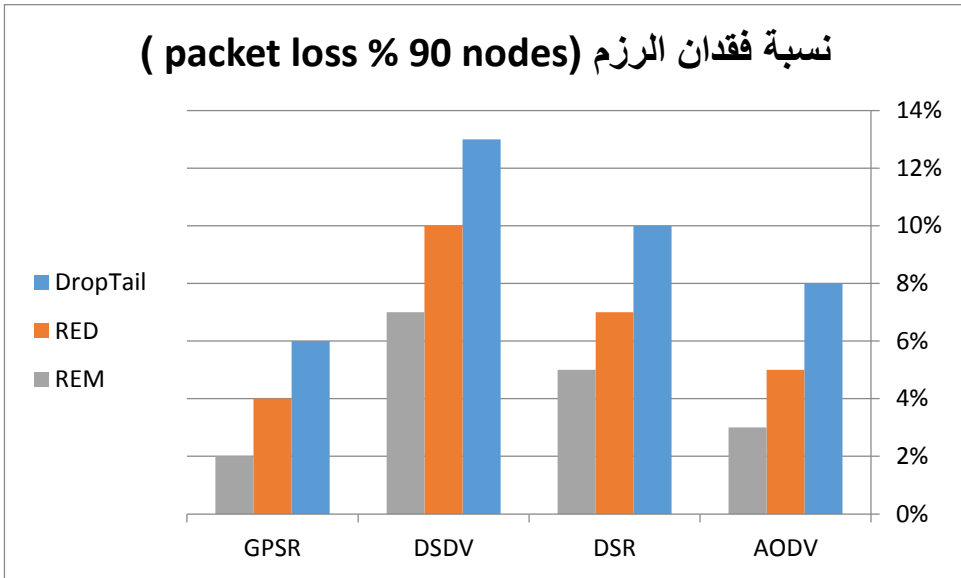
يظهر الشكل (14) الإنتاجية عند عدد 90 عقدة ونجد انخفاضاً إضافياً في الإنتاجية مقارنةً بـ 30 و 60 عقدة، نتيجة الازدحام العالي والتداخل اللاسلكي الشديد وزيادة حمل التوجيه. يحقق بروتوكول GPSR أعلى إنتاجية بين جميع البروتوكولات، خاصةً عند استخدام خوارزمية REM، بفضل تقليل رزم التوجيه والمحافظة على تدفق بيانات أكثر استقراراً. يليه بروتوكول AODV بأداء مقبول، بينما تسجل DSR و DSDV إنتاجية أقل نسبياً بسبب تكرار اكتشاف المسارات وتحديث الجداول في بيئة ذات تغير سريع في الطوبولوجيا. كما يظهر تفوق واضح لخوارزمية REM مقارنةً بـ RED و DropTail في تحسين الإنتاجية، مما يؤكد فعاليتها في إدارة الازدحام في شبكات المركبات اللاسلكية ذات الكثافة العالية.



الشكل (15) التأخير في السيناريو الحضري عند عدد عقد 90.

يظهر الشكل (15) التأخير عند عدد 90 عقدة ارتفاعاً كبيراً في متوسط التأخير مقارنةً بسيناريو 30 و 60 عقدة، نتيجة الازدحام الشديد، وزيادة التداخل اللاسلكي، وامتلاء الطوابير داخل العقدة. يحقق بروتوكول GPSR أقل تأخير نسبياً، خاصةً عند استخدام خوارزمية REM، بفضل تقليل حمل التوجيه وعدم الحاجة إلى اكتشاف المسارات. في المقابل، يسجل بروتوكول DSR أعلى قيم تأخير بسبب تضمين المسارات داخل الرزم وزيادة إعادة الإرسال في بيئة عالية الكثافة. يأتي AODV و DSDV بقيم تأخير متوسطة، مع تحسن واضح عند استخدام REM مقارنةً بـ

RED و DropTail ويؤكد الشكل فعالية خوارزمية REM في الحد من التأخير والمحافظة على استقرار الأداء في شبكات المركبات اللاسلكية ذات الازدحام العالي. يظهر الشكل (16) نسبة فقدان الرزم عند عدد 90 عقدة ونجد ارتفاعاً واضحاً في الفقدان مقارنةً بسيناريو 30 و 60 عقدة، نتيجة الازدحام الشديد، والتداخل اللاسلكي العالي، وامتلاء الطوابير داخل العقدة. يحقق بروتوكول GPSR أقل نسبة فقدان رزم، خاصةً عند استخدام خوارزمية REM، بفضل تقليل حمل التوجيه وتحسين إدارة الطوابير. في المقابل، يسجل بروتوكول DSDV أعلى نسبة فقدان، نتيجة التحديثات الدورية لجدول التوجيه وعدم ملائمتها للبيئات ذات التغير السريع في الطوبولوجيا. تأتي DSR و AODV بقيم فقدان متوسطة، مع تحسن ملحوظ عند استخدام REM مقارنةً بـ RED و DropTail ويؤكد الشكل تفوق خوارزمية REM في تقليل فقدان الرزم والمحافظة على استقرار الأداء في شبكات المركبات اللاسلكية ذات الكثافة العالية.



الشكل (16) نسبة فقدان الرزم في السيناريو الحضري عند عدد عقدة 90.

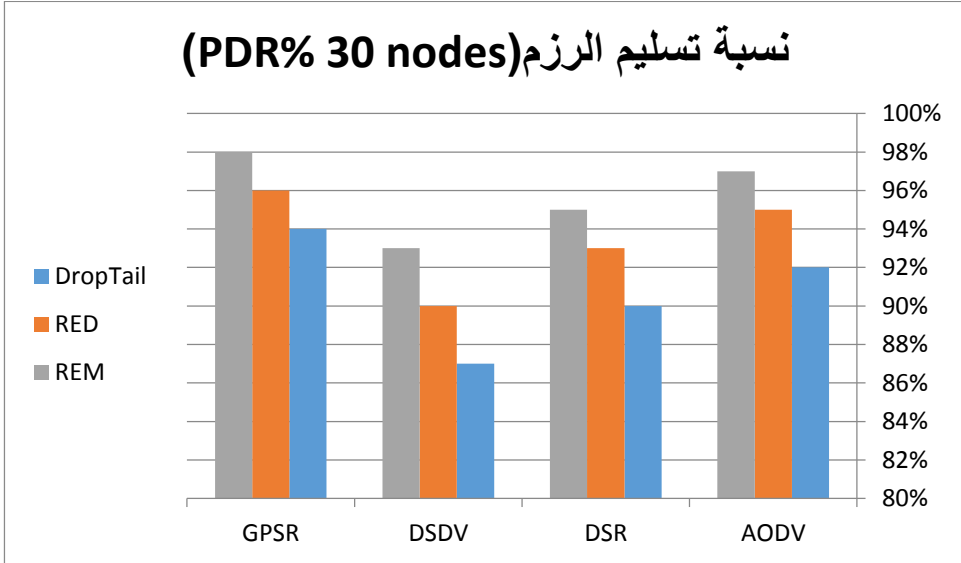
**ملخص نتائج السيناريو الحضري عند عدد عقد 30 و 60 و 60:**

أظهرت نتائج السيناريو الحضري أن أداء شبكات المركبات اللاسلكية VANET يتأثر بشكل كبير بكثافة المركبات وطبيعة البيئة الحضرية ذات الازدحام العالي والتغير السريع في الطوبولوجيا. عند 30 عقدة، حققت معظم بروتوكولات التوجيه نسب تسليم رزم مرتفعة، وتأخيراً منخفضاً، وإنتاجية جيدة نسبياً، نتيجة محدودية الازدحام واستقرار الروابط، مع تفوق واضح لبروتوكول GSPR وخوارزمية REM. عند زيادة عدد العقد إلى 60 عقدة، لوحظ انخفاض نسبي في نسبة تسليم الرزم والإنتاجية، مقابل ارتفاع في التأخير وفقدان الرزم، بسبب زيادة التداخل اللاسلكي وازدحام الطوابير. رغم ذلك، حافظ GSPR على أفضل أداء مقارنةً بباقي البروتوكولات، بينما أظهرت REM تفوقاً ملحوظاً في تحسين مؤشرات الأداء مقارنةً بـ RED و DropTail.

في سيناريو 90 عقدة، والذي يمثل حالة ازدحام مرتفع جداً، تدهورت مؤشرات الأداء بشكل واضح لجميع البروتوكولات، حيث ارتفع التأخير وفقدان الرزم بشكل كبير وانخفضت الإنتاجية ونسبة التسليم. ومع ذلك، استمر GSPR في تحقيق أفضل النتائج نسبياً، خاصةً عند استخدام REM، في حين كان أداء DSDV و DSR الأضعف بسبب حمل التوجيه الكبير وعدم ملائمتها للتغير السريع في الطوبولوجيا. بشكل عام، تؤكد نتائج السيناريو الحضري أن:

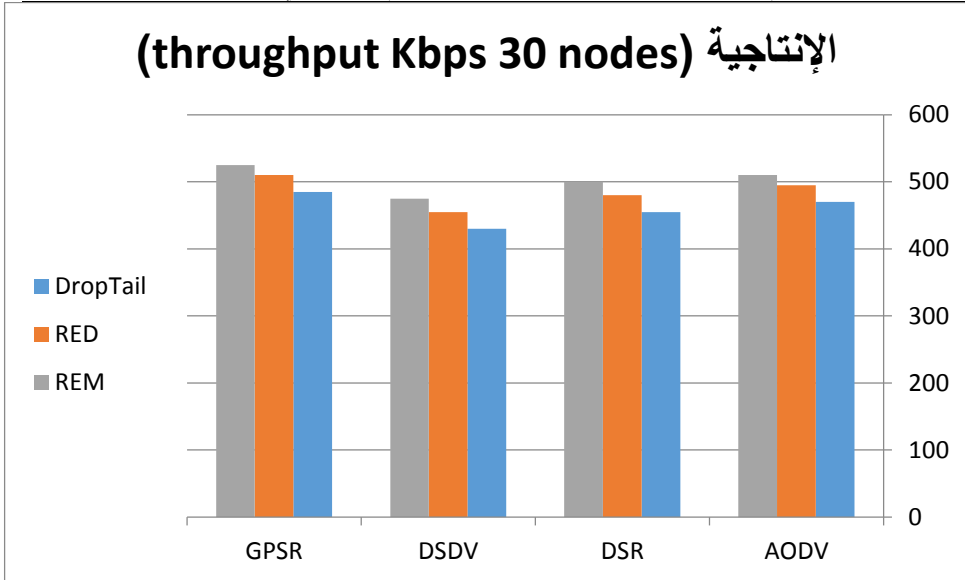
- زيادة كثافة المركبات تؤدي إلى تدهور تدريجي في الأداء.
- بروتوكول GSPR هو الأنسب للبيئات الحضرية المكتظة.
- خوارزمية REM هي الأكثر كفاءة في إدارة الازدحام وتقليل التأخير وفقدان الرزم.
- خوارزمية DropTail تظهر أداءً ضعيفاً في حالات الازدحام العالي.

**6.2 ثانياً السيناريو السريع من أجل 30 و 60 و 90 عقدة:****6.2.1 السيناريو السريع من أجل 30 عقدة:**



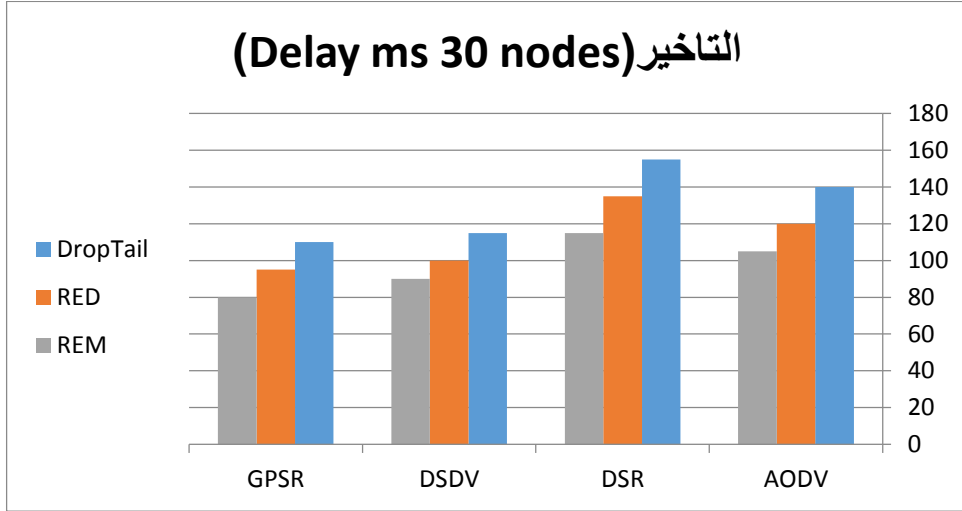
الشكل (17) نسبة تسليم الرزم في السيناريو السريع عند عدد عقد 30.

يظهر الشكل (17) أن نسبة تسليم الرزم عند عدد 30 عقدة في سيناريو الطريق السريع مرتفعة جداً لجميع بروتوكولات التوجيه، وذلك بسبب استقرار الحركة، غياب التقاطعات، وانخفاض التداخل اللاسلكي. يحقق بروتوكول GPSR أعلى نسبة تسليم رزم، حيث تصل إلى 99% عند استخدام خوارزمية REM، نتيجة اعتماده على التوجيه الجغرافي وتقليل حمل التوجيه. يليه بروتوكول AODV بأداء ممتاز، حيث تصل نسبة التسليم إلى 98% مع REM. كما يظهر تفوق خوارزمية REM على RED و DropTail في جميع البروتوكولات، مما يؤكد فعاليتها في تحسين موثوقية الإرسال حتى في البيئات ذات الازدحام المنخفض مثل الطريق السريع.



الشكل (18) الإنتاجية في السيناريو السريع عند عدد عقد 30.

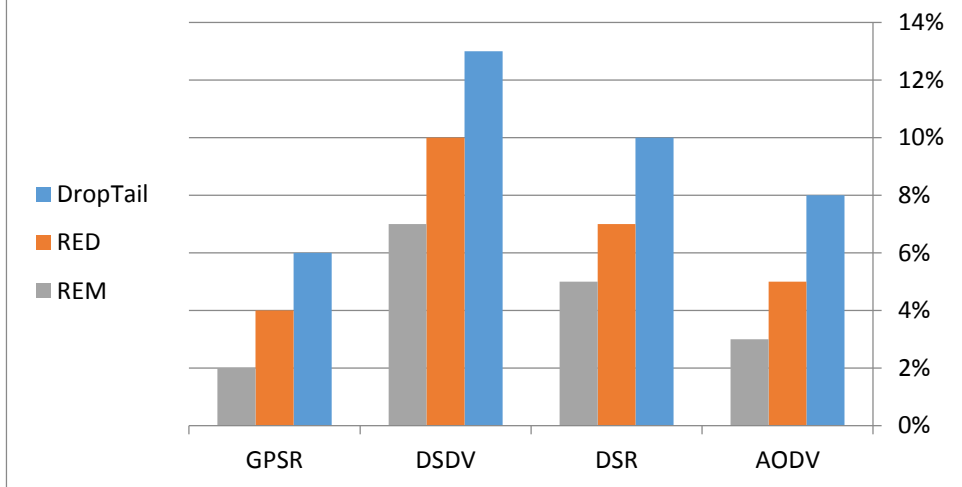
يظهر الشكل (18) نتائج الإنتاجية عند 30 عقدة في سيناريو الطريق السريع ونجد أن جميع البروتوكولات تحقق أداءً مرتفعاً بسبب استقرار الحركة وانخفاض الازدحام، مع تفوق واضح لبروتوكول GPSR. كما تحقق خوارزمية REM أعلى إنتاجية مقارنةً بـ RED و DropTail لجميع البروتوكولات، مما يؤكد كفاءتها في إدارة الازدحام.



الشكل (19) التأخير في السيناريو السريع عند عدد عقد 30.

يظهر الشكل (19) أن متوسط التأخير عند 60 عقدة في سيناريو الطريق السريع يكون منخفضاً نسبياً بسبب استقرار الحركة، مع تسجيل بروتوكول GPSR أقل تأخير، يليه DSDV، بينما يعاني DSR من أعلى تأخير، كما يلاحظ أن خوارزمية REM تحقق أقل قيم تأخير مقارنةً بـ RED و DropTail لجميع البروتوكولات، مما يؤكد فعاليتها في تقليل زمن الانتظار داخل الشبكة.

### نسبة فقدان الرزم ( packet loss % 30 nodes )

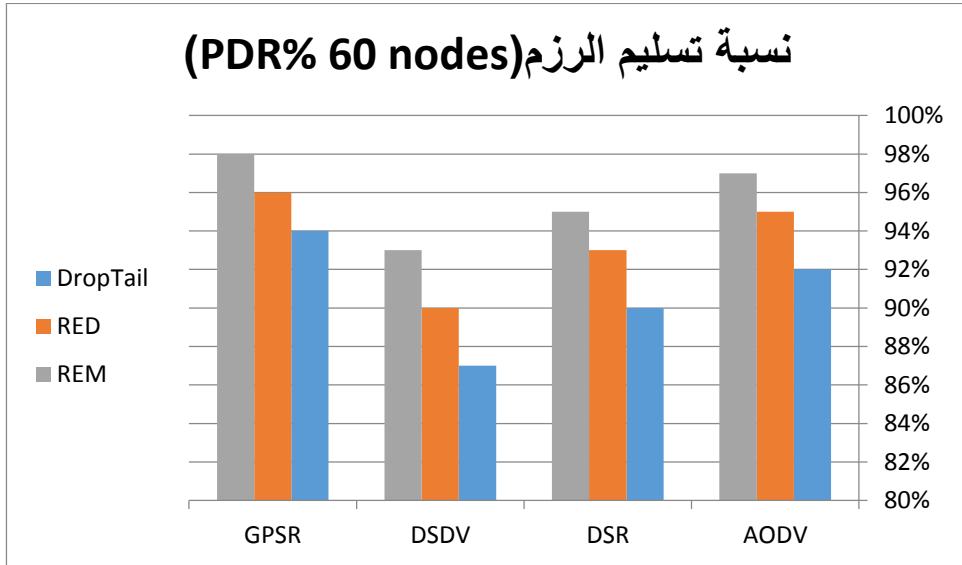


الشكل (20) نسبة فقدان الرزم في السيناريو السريع عند عدد عقد 30.

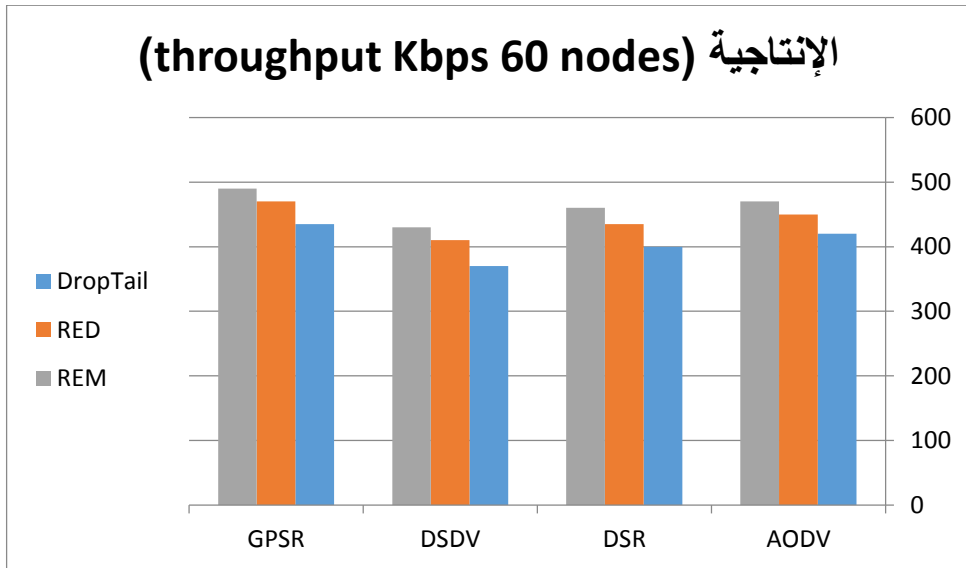
يظهر الشكل (20) نسبة فقدان الرزم عند 30 عقدة على الطريق السريع لكل من البروتوكولات الأربعة AODV، DSR، DSDV، و GPSR مع خوارزميات إدارة الطابور DropTail، RED، و REM. يلاحظ أن GPSR يحقق أدنى نسبة فقد للرزم، يليه AODV ثم DSR، بينما كان أعلى فقد للرزم مع DSDV. كما يقلل استخدام RED و REM بشكل واضح من فقدان الرزم مقارنة بـ DropTail، مما يشير إلى فعالية خوارزميات إدارة الطابور الذكية في تحسين أداء الشبكة.

#### 6.2.2 السيناريو السريع من اجل 60 عقدة:

يظهر الشكل (21) نسبة تسليم الرزم عند 60 عقدة على الطريق السريع باستخدام البروتوكولات GPSR، DSDV، DSR، و AODV مع خوارزميات إدارة الطابور DropTail، RED، و REM. يلاحظ أن GPSR يحقق أعلى نسبة تسليم للرزم، يليه AODV و DSR، بينما كان أدنى تسليم مع DSDV. كما يظهر أن استخدام RED و REM يحسن من نسبة تسليم الرزم مقارنة بـ DropTail، مما يعكس فعالية خوارزميات إدارة الطابور الذكية في تعزيز أداء الشبكة.



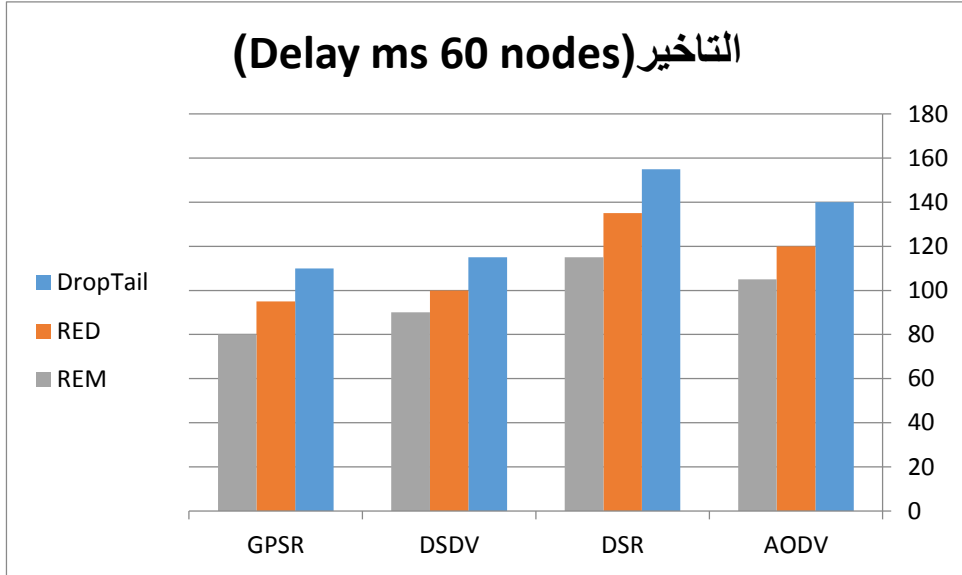
الشكل (21) نسبة تسليم الرزم في السيناريو السريع عند عدد عقد 60.



الشكل (22) الإنتاجية في السيناريو السريع عند عدد عقد 60.

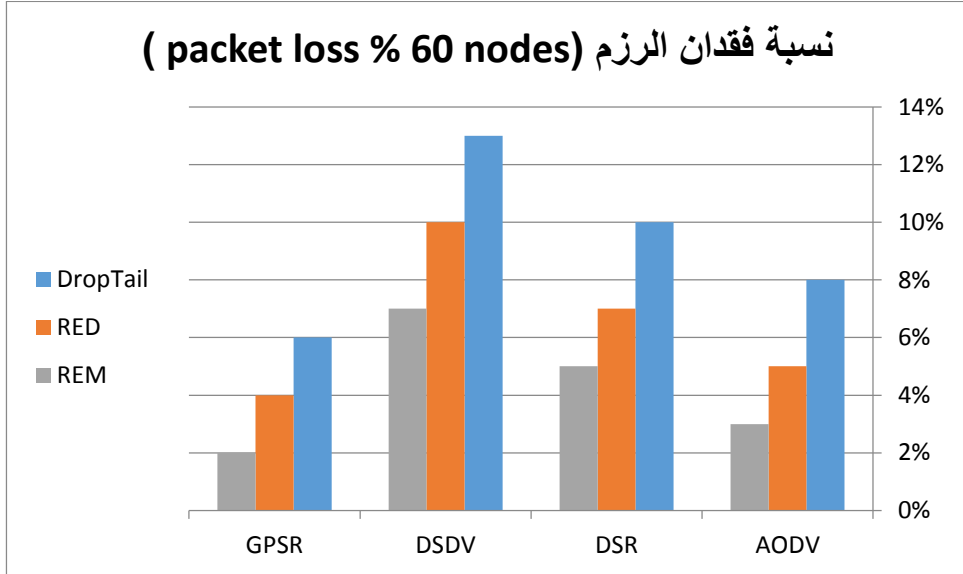
يظهر الشكل (22) الإنتاجية عند 60 عقدة على الطريق السريع باستخدام البروتوكولات GPSR ، DSDV ، DSR ، AODV مع خوارزميات إدارة الطابور DropTail ، RED ، REM. يلاحظ أن

GPSR يحقق أعلى إنتاجية، تليه AODV و DSR، بينما كانت أقل إنتاجية مع DSDV. كما يظهر أن استخدام RED و REM يعزز الإنتاجية مقارنة بDropTail، ما يعكس قدرة خوارزميات إدارة الطابور الذكية على تحسين أداء الشبكة في نقل البيانات.



الشكل (23) التأخير في السيناريو السريع عند عدد عقد 60.

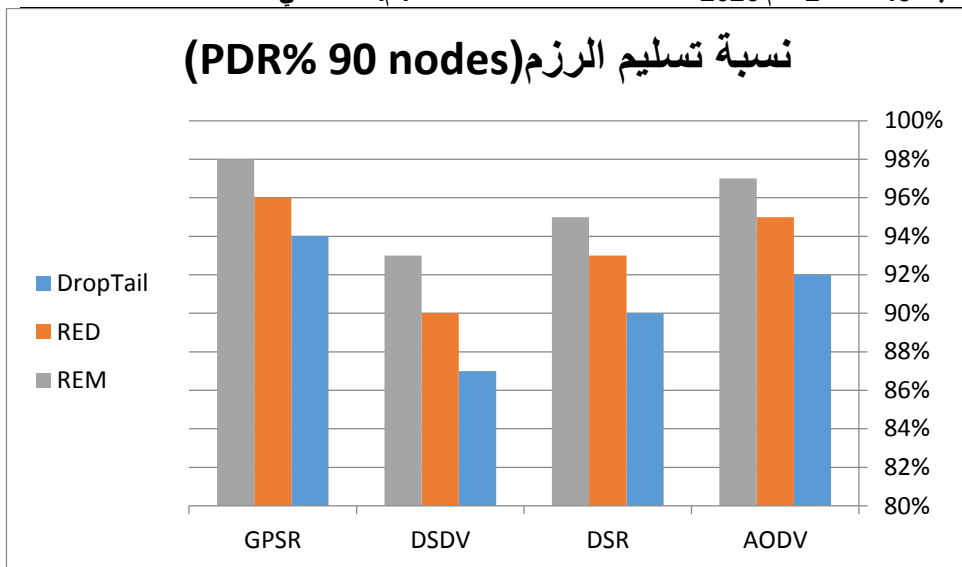
يظهر الشكل (23) أن التأخير يقل عند استخدام خوارزميات الجدولة الذكية RED و REM مقارنة بDropTail. البروتوكول GPSR سجل أقل تأخير، يليه DSDV، بينما كان التأخير أعلى مع AODV و DSR. التحسن في الأداء ملحوظ مع REM، مما يشير إلى فعالية هذه الخوارزميات في تقليل زمن استجابة الشبكة في بيئة عالية الحركة.



الشكل (24) نسبة فقدان الرزم في السيناريو السريع عند عدد عقد 60.

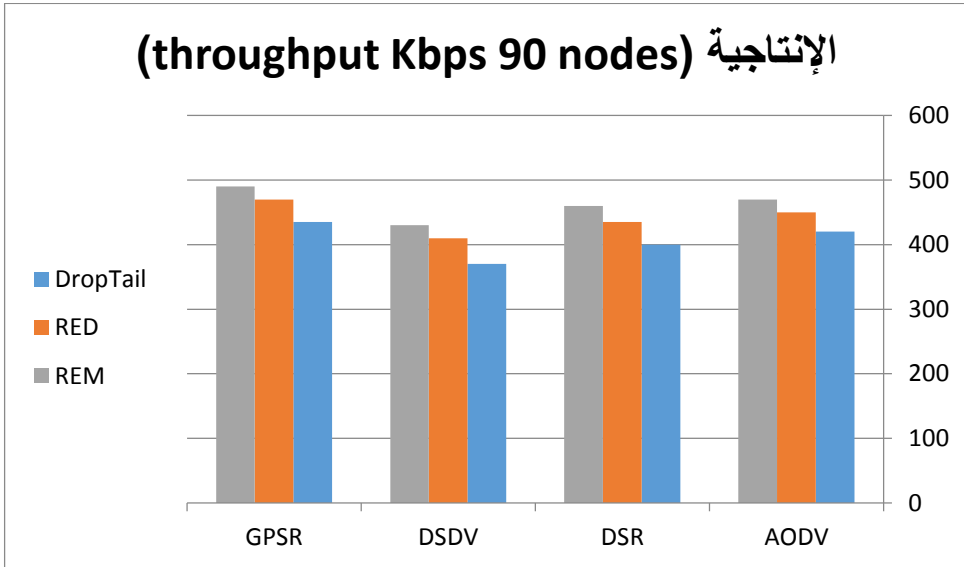
يظهر الشكل (24) أن استخدام خوارزميات الجدولة الذكية RED و REM يقلل بشكل ملحوظ من فقدان الرزم مقارنة بـ DropTail. البروتوكول GPSR حقق أقل فقدان رزم، يليه AODV و DSR، بينما سجل DSDV أعلى نسبة فقد. تشير هذه النتائج إلى فعالية RED و REM في تحسين موثوقية الشبكة وتقليل فقد البيانات في بيئة عالية الحركة.

### 6.2.3 السيناريو السريع من أجل 90 عقدة:

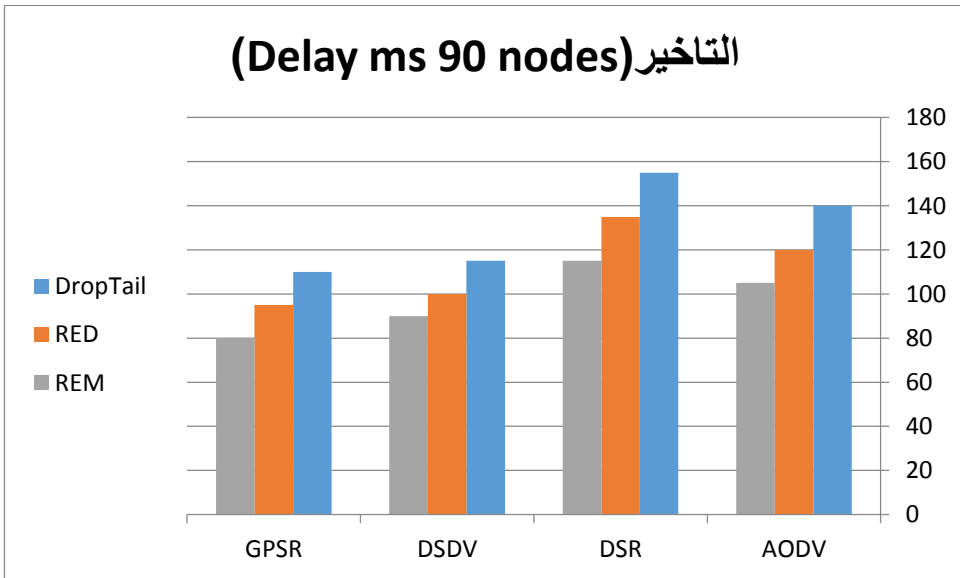


الشكل (25) نسبة تسليم الرزم في السيناريو السريع عند عدد عقد 90.

يظهر الشكل (25) أن نسبة تسليم الرزم عند عدد 90 عقدة على الطريق السريع تكون مرتفعة نسبياً لجميع البروتوكولات، مع تفوق واضح لخوارزمية REM مقارنةً بـ RED و DropTail. يحقق بروتوكول GPSR أعلى نسبة تسليم رزم، يليه AODV ثم DSR، بينما يسجل DSDV أقل القيم. بشكل عام، تشير النتائج إلى أن استخدام REM يحسن موثوقية الشبكة في البيئات عالية الكثافة والحركة مثل الطرق السريعة، خاصة مع بروتوكولات التوجيه الجغرافية والتفاعلية. يظهر الشكل (26) أن الإنتاجية عند عدد 90 عقدة على الطريق السريع تكون أعلى عند استخدام خوارزمية REM لجميع بروتوكولات التوجيه، تليها RED ثم DropTail. يحقق GPSR أعلى إنتاجية مقارنةً ببقية البروتوكولات، يليه AODV ثم DSR، بينما يسجل DSDV أقل إنتاجية. تعكس هذه النتائج قدرة REM على تقليل الازدحام وتحسين استغلال عرض الحزمة في البيئات ذات الكثافة العالية والحركة السريعة، مما يؤدي إلى رفع الإنتاجية الكلية للشبكة.



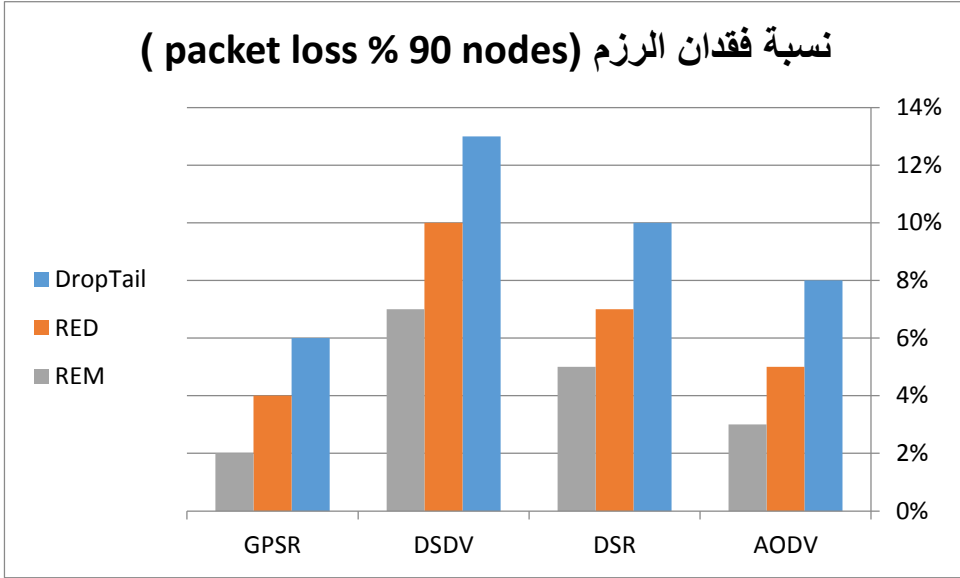
الشكل (26) الإنتاجية في السيناريو السريع عند عدد عقد 90.



الشكل (27) التأخير في السيناريو السريع عند عدد عقد 90.

يظهر الشكل (27) أن متوسط التأخير عند عدد 90 عقدة على الطريق السريع يكون الأقل عند استخدام خوارزمية REM لجميع بروتوكولات التوجيه، تليها RED، بينما تسجل DropTail

أعلى قيم تأخير. يظهر بروتوكول GPSR أقل تأخير مقارنةً ببقية البروتوكولات، في حين يعاني DSR من أعلى تأخير بسبب طبيعة الاعتماد على المسارات وتحديثها في بيئة عالية الحركة. بشكل عام، تؤكد النتائج أن REM أكثر كفاءة في تقليل زمن الانتظار في الشبكات عالية الكثافة مثل سيناريو الطريق السريع.



الشكل (28) نسبة فقدان الرزم في السيناريو السريع عند عدد عقد 90.

عند عدد 90 عقدة على الطريق السريع، يظهر الشكل (28) أن نسبة فقدان الرزم تكون الأقل عند استخدام خوارزمية REM لجميع بروتوكولات التوجيه، تليها RED، بينما تسجل DropTail أعلى نسب الفقد. يحقق بروتوكول GPSR أقل فقدان للرزم نتيجة اعتماده على التوجيه الجغرافي المناسب لبيئات الحركة العالية، في حين يظهر DSDV و DSR نسب فقد أعلى بسبب عدم الاستقرار المتكرر للمسارات. بشكل عام، تؤكد النتائج أن REM يحدّ من الازدحام ويحسن موثوقية الإرسال في سيناريو الطريق السريع عالي الكثافة.

**ملخص السيناريو السريع عند عدد عقد 30 و 60 و 90:**

تظهر نتائج المحاكاة في سيناريو الطريق السريع أن أداء الشبكة يتأثر بشكل واضح بزيادة عدد العقد نتيجة السرعات العالية والتغير المستمر في الطوبولوجيا عند 30 عقدة

يكون الازدحام محدوداً، وتحقق جميع البروتوكولات نسب تسليم رزم مرتفعة وتأخيراً منخفضاً نسبياً. الفروقات بين خوارزميات إدارة الطوابير DropTail, RED, REM تكون بسيطة، مع أفضلية طفيفة لـ REM في الاستقرار. عند عقدة يبدأ تأثير الازدحام بالظهور، حيث ينخفض أداء DropTail مقارنةً بـ RED و REM. تتحسن نسبة تسليم الرزم والإنتاجية بشكل ملحوظ عند استخدام REM، مع انخفاض التأخير وفقدان الرزم، خاصة مع بروتوكولي GPSR و AODV. عند عقدة تصبح الشبكة عالية الكثافة وأكثر عرضة للازدحام. يبرز تفوق REM بوضوح في تحقيق أعلى نسبة تسليم رزم وإنتاجية وأقل تأخير وفقدان رزم، بينما يسجل DropTail أضعف أداء. كما يحقق GPSR أفضل النتائج بين بروتوكولات التوجيه لملائمته لبيئة الطرق السريعة عالية الحركة. بالتالي نستنتج أنه يزداد تأثير خوارزميات إدارة الطوابير مع زيادة عدد العقد، وتعد REM الخيار الأكثر كفاءة واستقراراً في سيناريو الطريق السريع، خصوصاً عند الكثافات العالية، مع تفوق بروتوكول GPSR من حيث الأداء العام.

## 2. الخاتمة :

قدم هذا البحث تحليل شامل لأثر خوارزميات جدولة الطوابير على أداء بروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية VANET ضمن بيئتين مختلفتين هما السيناريو الحضري وسيناريو الطريق السريع، ومع تغير كثافة المركبات. أظهرت نتائج المحاكاة أن زيادة عدد المركبات تؤدي إلى تدهور تدريجي في مؤشرات الأداء، ولا سيما في البيئة الحضرية التي تتميز بازدحام مرتفع وتغير سريع في الطوبولوجيا، مما يفرض تحديات كبيرة على بروتوكولات التوجيه وآليات إدارة الطوابير. كما بينت النتائج تفوق بروتوكول GPSR في معظم السيناريوهات، سواء في البيئات الحضرية أو على الطرق السريعة، نظراً لاعتماده على التوجيه الجغرافي وتقليل حمل التوجيه، مما يجعله أكثر ملاءمة لبيئات شبكات المركبات اللاسلكية VANET ذات الحركة العالية. من جهة أخرى، أظهرت خوارزمية REM كفاءة واضحة في إدارة الازدحام مقارنةً بخوارزمتي DropTail و RED، حيث حققت أعلى نسب تسليم للرزم، وأقل تأخير، وأدنى فقدان للرزم، خاصة عند الكثافات العالية. تؤكد نتائج البحث أن الدمج بين بروتوكولات التوجيه وخوارزميات إدارة الطوابير

الذكاء يعد عاملا حاسما في تحسين جودة الخدمة وموثوقية الاتصال في شبكات المركبات اللاسلكية، سواء في البيئات الحضرية المعقدة أو في سيناريوهات الطرق السريعة عالية السرعة.

### 3. التوصيات والأعمال المستقبلية

يوصي هذا البحث بتوسيع نطاق الدراسات المستقبلية في مجال شبكات المركبات اللاسلكية VANET من خلال اعتماد خوارزميات جدولة ذكية متكيفة تعتمد على التعلم الآلي أو الذكاء الاصطناعي، بحيث تكون قادرة على التكيف الديناميكي مع التغير السريع في كثافة المركبات وحالة المرور والازدحام الشبكي. كما يقترح دراسة دمج خوارزميات إدارة الطوابير مع بروتوكولات توجيه هجينة أو متعددة المسارات لتحسين الموثوقية وتقليل زمن التأخير، خاصة في تطبيقات السلامة المرورية الحساسة للزمن. كذلك، يمكن توسيع الدراسة لتشمل نماذج حركة أكثر واقعية تعكس سلوك السائقين، مثل التوقفات المفاجئة، الحوادث المرورية، وتغير المسارات، إضافة إلى دراسة تأثير الاتصال بين المركبات والبنية التحتية V2I ضمن أنظمة النقل الذكية. ويستحسن أيضا تضمين مؤشرات أداء إضافية مثل استهلاك الطاقة، العدالة بين العقد، وتأثير جودة القناة اللاسلكية، إلى جانب تنفيذ محاكاة مشتركة أو تجارب شبه حقيقية للتحقق من قابلية تطبيق النتائج في البيئات الواقعية لشبكات المركبات اللاسلكية.

### 4. المراجع:

1. دراسة اثر خوارزميات الجدولة على بروتوكولات التوجيه في الشبكات اللاسلكية النقلة. احمد العلي ، زينب خلوف ، ماهر عباس. حمص : جامعة حمص، 2015.
2. Performance Evaluation and QoS Optimization of Routing Protocols in Vehicular Communication Networks Under Delay-Sensitive Conditions .”M. Al-Qutayri, and A. Al-Hammadi, A. Al-Ali ، - : - . ،2025MDPI.
3. .ANALYSING VANET ROUTING PROTOCOLS: QOS METRICS AND PERFORMANCE EVALUATION .usman a ismail ،abubaker

- m baba و suliman a tijani : - .Journal of Systematic and Modern Science Research.2024 ،
4. Machine learning approaches for active queue management . Mahmood Ahmadi Mohammad Parsa Toopchinezhad : - .science direct elsevier.2025 ،
  5. Bio-Inspired Routing Protocols for Vehicular Ad-Hoc Networks .S. Bitam and A. Mellouk .london : book London, UK: ISTE Ltd. / Wiley.2013 ،
  6. A Comprehensive Survey on Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs ):(M. H. F. Rahman and A. M. A. Alghamdi : - . IEEE.2023 ،
  7. VALUATION OF ACTIVE QUEUE MANAGEMENT ALGORITHMS .S.ÖZEKES .Istanbul : Istanbul Commerce University.2005 ،
  8. Performance & Analysis of REM, RED & 'GREEN AQM Algorithms in Congestion Control .R.SCHOLA : - .ijarcsse,Volume 3.2013 ،

## تصميم وتحليل داراة جامع كامل منخفضة الاستطاعة والمساحة باستخدام

## تقنية CMOS 45 nm

طالب الدكتوراه: هلال احمد تكرونى

جامعة حمص - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - قسم هندسة الالكترونيايات والاتصالات

الدكتور المشرف: مجد الدين العلي

## المخلص

تعد داراة الجامع الكامل (FA) أحد المكونات الأساسية في تصميم الدوائر الحسائية والمنطقية ومن أهم مكونات المعالج، لأنها تعتبر الكتلة الأساسية في القيام بالعديد من العمليات الحسائية مثل الجمع والطرح والضرب والقسمة. كما يعد الجامع الكامل من أكثر المكونات استخداماً في العديد من الأجهزة المختلفة مثل المعالج (CPU) ووحدة الحساب والمنطق (ALU) ومعالج الإشارات الرقمية (DSP) وغيرها، ولذلك يُعتبر تصميم داراة جامع كامل تتمتع بأداء عالٍ ذو أهمية قصوى.

تم في هذه المقالة اقتراح بنية محسنة لداراة جامع كامل (15T-FA) ومقارنتها مع عدة دارات مختلفة، وهي داراة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA وداراة TG-FA وداراة H-FA وداراة PTL-FA. تمت المحاكاة باستخدام برنامج Cadence Virtuoso 6.1.7 باستخدام تقنية CMOS 45 nm، وتم إجراء المقارنة بين الدارات المدروسة من حيث استهلاك الاستطاعة والمساحة وتأخير الانتشار ومضروب التأخير بالاستطاعة (PDP). تُظهر نتائج المحاكاة أن الدارة المقترحة 15T-FA تتميز بأقل استهلاك للاستطاعة بين الدارات المدروسة مع قيمة nW 172.306، وهي الدارة الأقل مساحةً مع قيمة  $4.701 \mu\text{m}^2$ .

الكلمات المفتاحية: جامع كامل FA، منطق ترانزستورات التمرير PTL، بوابة الإرسال TG، CMOS، مضروب التأخير بالاستطاعة PDP.

## Design and analysis of a low-power and low-area full adder circuit using 45 nm CMOS technology

### Abstract

The Full Adder (FA) is a fundamental component in the design of arithmetic and logic circuits and is one of the most important elements of a processor, as it serves as the basic building block for performing numerous arithmetic operations such as addition, subtraction, multiplication, and division. Furthermore, the Full Adder is one of the most widely used components in various devices, including the Central Processing Unit (CPU), the Arithmetic Logic Unit (ALU), the Digital Signal Processor (DSP), and others. Therefore, designing a high-performance full adder circuit is of utmost importance.

In this paper, an improved structure of a full adder circuit (15T-FA) is proposed and compared with several different adder designs, namely the conventional full adder (28T-FA), TG-FA, H-FA, and PTL-FA circuits. The simulations were carried out using Cadence Virtuoso 6.1.7 with CMOS 45 nm technology. The comparison among the studied circuits was performed in terms of power consumption, area, propagation delay, and power delay product (PDP). The simulation results show that the proposed 15T-FA circuit exhibits the lowest power consumption among the studied designs, with a value of 172.306 nW, and it also occupies the smallest area of 4.701  $\mu\text{m}^2$ .

**Keywords:** Full adder (FA), Pass transistor logic (PTL), Transmission gate (TG), CMOS, Power delay product (PDP).

## 1. المقدمة:

شهدت السنوات الأخيرة مع الارتفاع الهائل في سوق المنتجات الالكترونية المحمولة طلباً متزايداً على الأجهزة الالكترونية منخفضة الاستطاعة مثل أجهزة الكمبيوتر المحمولة والأجهزة القابلة للارتداء والهواتف الذكية وغيرها من التجهيزات [1]. تُعد دارة الجامع الكامل أحد أهم المكونات الأساسية في المعالج، حيث تُستخدم في وحدة الحساب والمنطق (ALU) ووحدة الفاصلة العائمة (FPU)، وتُعتبر دارة الجامع الكامل هي جوهر العديد من العمليات الحسابية مثل الجمع والطرح والضرب والقسمة وكذلك تُستخدم في توليد العناوين [2]. وهذا ما دفع إلى القيام بالعديد من الجهود البحثية لتصميم دارة جامع كامل ذات استهلاك استطاعة منخفض، حيث تم اقتراح العديد من البنى المختلفة لدارة الجامع الكامل منخفضة الاستطاعة، ومنها دارة 17T-FA التي تعتمد على استخدام بوابة XOR جديدة منخفضة الاستطاعة مكونة من 5 ترانزستورات [3]، كما تم اقتراح دارة 15T-FA المكونة من 15 ترانزستور، والتي تتميز باستهلاك استطاعة منخفض بسبب انخفاض عدد الترانزستورات التي تكون بحالة عمل في نفس الوقت بين الدخل والخرج، والتي تعتمد على بنية XOR-XNOR جديدة مكونة من 10 ترانزستورات [4]. كما تم اقتراح دارة PTL-FA والتي تعتمد على استخدام تقنية ((Pass Transistor Logic (PTL) في بنيتها، مما يقلل من عدد الترانزستورات المستخدمة في تصميم الدارة وبالتالي يقلل من استهلاك الاستطاعة [5].

كما استهدفت العديد من الأبحاث اقتراح بنى مختلفة لدارة الجامع الكامل بحيث تكون مناسبة للتطبيقات عالية السرعة ومنخفضة المساحة، والتي تعتمد على تحقيق ذلك من خلال استخدام عدد منخفض من الترانزستورات في بنية الدارة [6]، ومن الأمثلة على هذه الدارات هي دارة-12T FA [1] المكونة من 12 ترانزستور فقط والتي تعتمد في تصميمها على بنية XNOR جديدة مكونة من 6 ترانزستورات، حيث يساهم هذا العدد المنخفض من الترانزستورات في تقليل مساحة الدارة وانخفاض تأخير انتشار إشارات الخرج، ومن الدارات التي تم اقتراحها هي دارة GDI-FA [7] التي تعتمد على استخدام تقنية ((Gate Diffusion Input (GDI) والتي تستهدف تقليل عدد

الترانزستورات المستخدمة في تصميم الدارات والبوابات المنطقية مما يجعلها قادرة على زيادة السرعة وتقليل المساحة.

وكذلك لا بد من الإضاءة على أهمية الحصول على جهد خرج متأرجح بشكل كامل والذي يعتبر عاملاً رئيسياً لضمان موثوقية عمل الدارة عند جهود التغذية المنخفضة في الدارات ذات الأبعاد النانوية (deep sub-micrometer) [8]، حيث قد يتسبب الانخفاض في تأرجح الجهد إلى بطء عملية التبديل أثناء تنفيذ العمليات المتتالية، وقد يؤدي أحياناً إلى فشل عمل الدارة عند جهود التغذية المنخفضة [9]. ومن الدارات التي تتميز بجهد خرج متأرجح بشكل كامل هي TG-FA [10] والتي تعتمد على استخدام تقنية بوابة الإرسال (Transmission gate (TG))، وهي عبارة عن ترانزستورين NMOS و PMOS موصولان على التوازي يعملان معاً لتمرير الإشارة بشكل قوي وتجنب مشكلة هبوط الجهد، ودارة H-FA [11] التي تتميز بجهد خرج كامل التأرجح وذلك بالاعتماد على بنية هجينة قادرة على استعادة مستوى إشارة الخرج، كما تم اقتراح دارة FSGDI-FA [12] التي تعتمد على استخدام تقنية (Full Swing Gate Diffusion Input (FSGDI))، مما يوفر جهد خرج متأرجح بشكل كامل وتحسن كل من استهلاك الاستطاعة والتأخير.

تم في هذا البحث دراسة ومحاكاة عدة بنى لدارات الجامع الكامل واقتراح دارة جامع كامل 15T-FA محسنة تعمل على تخفيض كلاً من المساحة واستهلاك الاستطاعة، تمت عملية المحاكاة باستخدام برنامج Cadence Virtuoso 6.1.7 عند التقنية CMOS 45 nm وذلك من أجل الوصول إلى معرفة واضحة عن مختلف خصائص هذه الدارات والمقارنة فيما بينها.

## 2. هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى دراسة عدة أنواع من دارات الجامع الكامل، واقتراح دائرة جامع كامل -15T FA ذات استهلاك استطاعة منخفض ومساحة صغيرة بالمقارنة مع باقي الدارات، مع المحافظة على قيم جيدة لكل من تأخير الانتشار ومضروب التأخير بالاستطاعة (Power Delay Product (PDP)).

### 3. مواد وطرق البحث:

اعتمد البحث على طريقة البحث التجريبية، حيث تم إجراء عملية المحاكاة لدارات الجامع الكامل المختلفة باستخدام برنامج Cadence Virtuoso 6.1.7 الذي يعمل على نظام Linux عند التقنية CMOS 45 nm.

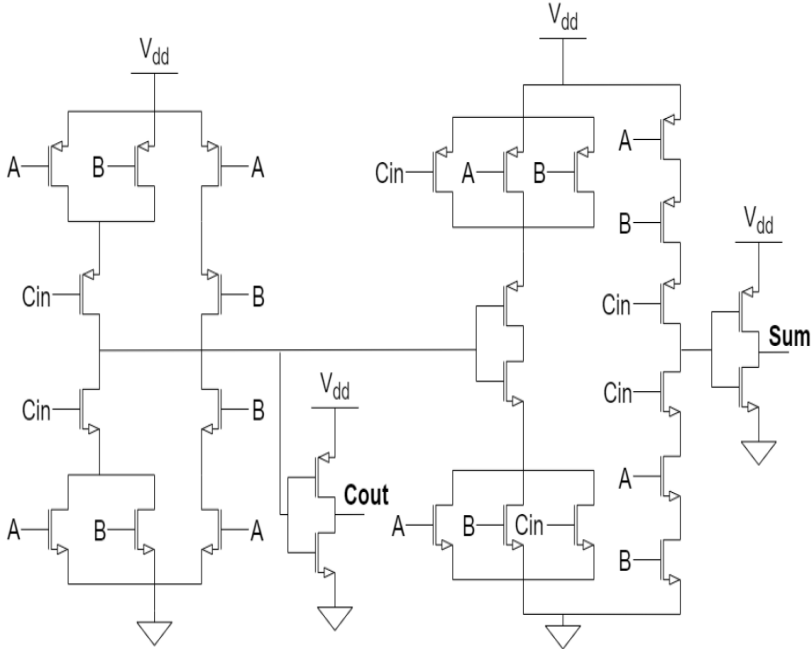
### 4. أنواع دارات الجامع الكامل:

نظراً لتأثير دائرة الجامع الكامل الكبير على أداء الأنظمة الرقمية وتنوع استخداماتها، فقد تم التركيز في العديد من الأبحاث على تطوير هياكل مختلفة تحقق تحسينات في بعض البارامترات الأساسية للجامع الكامل بما يتناسب مع متطلبات التطبيقات المختلفة.

تم في هذا البحث تحليل أداء عدة أنواع من دارات الجامع الكامل وهي:

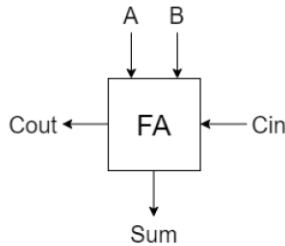
#### 4.1 دائرة الجامع الكامل التقليدي القائم على CMOS (28T-FA):

يتم تصميم دائرة الجامع الكامل التقليدي القائم على CMOS باستخدام 28 ترانزستوراً كما هو مبين في الشكل (1)، وتتكون هذه الدارة من ترانزستورات PMOS في شبكة الرفع وترانزستورات NMOS في شبكة الخفض، ويتميز هذا التصميم بقدرة تشغيل جيدة وجهد خرج متأرجح بشكل كامل، إلا أن العدد الكبير من الترانزستورات المستخدم في التصميم يؤدي إلى زيادة استهلاك الاستطاعة وزيادة التأخير [10].



الشكل (1): دائرة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA [10].

تحتوي دائرة الجامع الكامل كما هو مبين في الشكل (2) على ثلاث مداخل وهي A و B و Cin، حيث أن A و B هما البتان المراد جمعهما، و Cin يمثل بت الحمل من المرحلة السابقة. وتحتوي دائرة الجامع الكامل على مخرجين وهما إشارة المجموع (Sum) وإشارة الحمل (Cout) [10].



الشكل (2): المخطط الصندوقي لمداخل ومخارج دائرة الجامع الكامل [10].

يعبّر عن سلوك دارة الجامع الكامل بجدول الحقيقة المبين في الجدول (1)، ويتم التعبير عن خرج دارة الجامع الكامل بالمعادلتين (1) و(2):

$$\text{Sum} = A \oplus B \oplus \text{Cin} \quad (1)$$

$$\text{Cout} = AB + \text{Cin}(A \oplus B) \quad (2)$$

الجدول (1): جدول الحقيقة لدارة الجامع الكامل [10].

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

#### 4.1.1 تحليل أداء دارة الجامع الكامل:

يعتمد تقييم دارة الجامع الكامل على إظهار منحنيات الدخل والخرج، وتحليل أداء عدد من البارامترات الأساسية التي سيتم الاعتماد عليها في دراسة ومقارنة أداء البنى المختلفة لدارات الجامع الكامل، وهذه البارامترات الأساسية هي [11]:

1. **الاستطاعة:** يتم تصنيف تبديد الاستطاعة في الدارات الرقمية إلى قسمين وهما [13]:
  - الاستطاعة الستاتيكية: يحدث استهلاك الاستطاعة الستاتيكية بسبب تيارات التسرب في الدارة، وذلك عندما تكون الدارة في وضع الخمول أو الاستعداد (وضع السكون).
  - الاستطاعة الديناميكية: وهي الاستطاعة المستهلكة أثناء الحالة النشطة للترانزستورات، والتي تنقسم إلى استهلاك استطاعة قصر الدارة والناجمة عن تدفق التيار المباشر بين جهد التغذية Vdd والأرضي، واستهلاك استطاعة التبديل والناجمة عن شحن وتفريغ سعات الحمل.

يُحسب استهلاك الاستطاعة المتوسطة الكلي في الدارة من خلال المعادلة (3) [13]:

$$P_{avg} = P_{static} + P_{dynamic} \quad (3)$$

2. **زمن التأخير:** يُحدّد زمن تأخير الانتشار من خلال قياس الزمن الفاصل بين لحظة وصول إشارة الدخل إلى 50% من قيمتها العظمى ولحظة وصول إشارة الخرج إلى 50% من قيمتها العظمى، وذلك لكل انتقال في الخرج. وتُعتبر قيمة التأخير الأكبر بين جميع الانتقالات هي زمن التأخير الكلي للدارة، والذي يمثل أسوأ حالة تأخير محتملة [14].

3. **مضروب التأخير بالاستطاعة (PDP):** يحسب مضروب التأخير بالاستطاعة (PDP) من خلال ضرب أسوأ حالة تأخير مع استهلاك الاستطاعة في الدارة [15]، حيث يعبر مضروب التأخير بالاستطاعة عن المقايضة بين معيارين متعارضين وهما التأخير واستهلاك الاستطاعة [16].

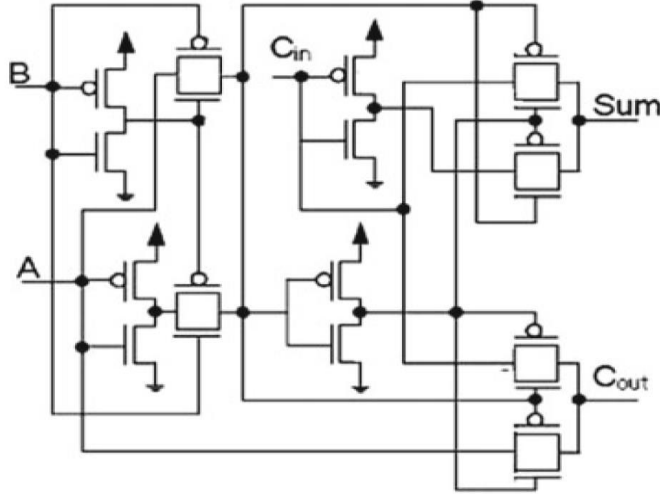
4. المساحة: تشير المساحة إلى الحيز الفيزيائي التي تشغله دائرة الجامع الكامل على الرقاقة، والذي يتم تحديده من المخطط الفيزيائي للدائرة (Layout) [17].

#### 4.2 دائرة الجامع الكامل القائم على تقنية بوابة الإرسال (TG-FA):

صممت دائرة الجامع الكامل TG-FA المبينة في الشكل (3) باستخدام 20 ترانزستوراً، وبالاعتماد على تقنية بوابة الإرسال، حيث تستخدم تقنية بوابة الإرسال (Transmission gate (TG)) ترانزستورين NMOS و PMOS موصولان على التوازي لتمرير الإشارة إلى الخرج بشكل قوي وتجنب مشكلة هبوط الجهد [18].

لفهم آلية عمل بوابة الإرسال يجب توضيح مفهوم قوة الإشارة، والتي تُقَيَّم بمدى قربها من مصدر الجهد المثالي سواء كان VDD أو GND، حيث يُمرر ترانزستور NMOS قيمة 0 منطقي بشكل قوي وقيمة 1 منطقي بشكل ضعيف، بينما يُظهر ترانزستور PMOS سلوكاً معاكساً، حيث يُمرر قيمة 0 منطقي بشكل ضعيف وقيمة 1 منطقي بشكل قوي [10].

تُشكّل بوابة الإرسال بتوصيل PMOS و NMOS على التوازي، والتي يتم التحكم بها عن طريق إشارة تحكم والإشارة المكملة لها، بحيث إما أن يكون الترانزستورين بحالة عمل أو بحالة إيقاف، وبالتالي عندما يكون الترانزستوران في حالة عمل والاستفادة من خاصية ترانزستور NMOS بتمرير 0 منطقي بشكل قوي ومن خاصية ترانزستور PMOS بتمرير 1 منطقي بشكل قوي، فإن إشارة الخرج تكون دائماً قوية [10].

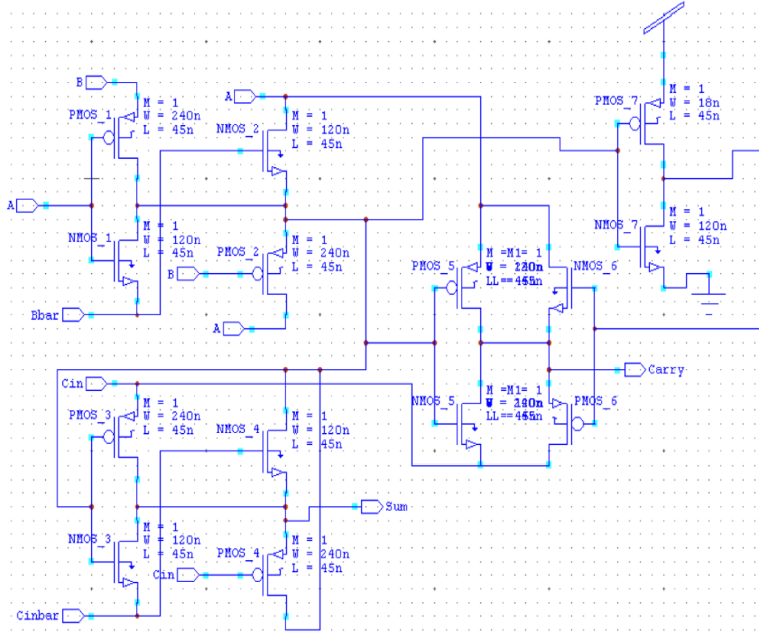


الشكل (3): دائرة جامع كامل قائمة على استخدام تقنية بوابة الإرسال TG (TG-FA) [18].

#### 4.3 دائرة الجامع الكامل الهجينة ((Hybrid Full Adder (H-FA)):

تعتمد دائرة الجامع الكامل الهجينة H-FA على استخدام مجموعة من النواخب المنطقية الهجينة في بنيتها، والتي تعتمد على استخدام تقنية GDI، مما يجعلها قادرة على تنفيذ العمليات المنطقية بعدد ترانزستورات أقل مقارنة بالتصاميم التقليدية، حيث تستخدم دائرة الجامع الكامل الهجينة 18 ترانزستوراً في بنيتها كما هو موضح في الشكل (4) [11].

يتميز هذا التصميم لدائرة الجامع الكامل الهجينة H-FA بأنه ذو استهلاك استطاعة منخفض ومساحة صغيرة، كما أنه يتمتع بجهد خرج متأرجح بشكل كامل، وذلك لاعتماد الدارة على استخدام منطق استعادة المستوى لإشارات الخرج عن طريق إضافة ترانزستورات استعادة التأرجح عند خرج النواخب للتعويض عن هبوط الجهد الناتج عن جهد العتبة [11].



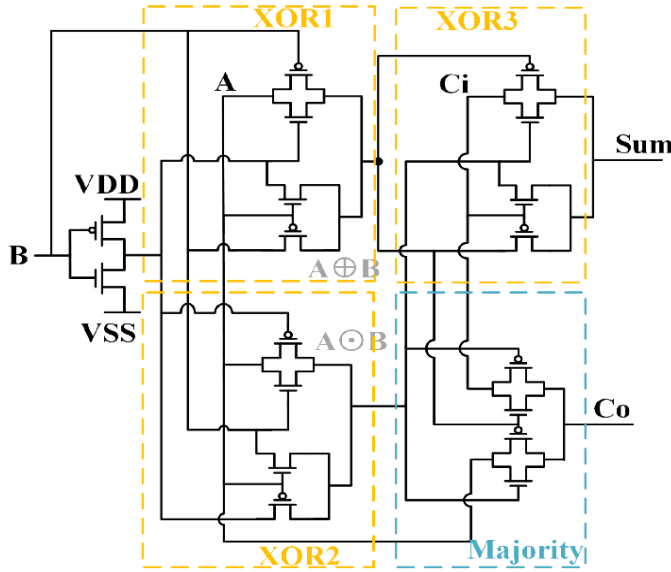
الشكل (4): دائرة الجامع الكامل الهجينة H-FA [11].

## 4.4 دائرة الجامع الكامل القائم على تقنية PTL (PTL-FA):

تم تصميم دائرة الجامع الكامل PTL-FA بالاعتماد على منطق ترانزستورات التمرير (PTL) باستخدام 18 ترانزستور كما هو مبين في الشكل (5)، حيث تُستخدم تقنية PTL لنشر الجهد عبر ترانزستورات التمرير مباشرة عوضاً عن استخدام سلسلة من ترانزستورات الرفع والسحب، مما يؤدي إلى تقليل الوصلات المتصلة مع التغذية مقارنةً بالدارات التي تعتمد على المنطق CMOS، وهذا ما يقلل من استهلاك الاستطاعة في الدارة [5].

تعتمد دائرة الجامع الكامل PTL-FA في بنيتها على استخدام دارتين منفصلتين لإنتاج كل من XOR و XNOR عوضاً عن استخدام عاكس لإنتاج XNOR من XOR، وبالتالي تعمل الدارتين بشكل متوازٍ بنفس الوقت مما يقلل من التأخير في الدارة والذي ينتج عن استخدام العاكس لإنتاج

XNOR. تتميز هذه الدارة باستهلاك استطاعة منخفض وذلك بسبب استخدام تقنية PTL في بنيتها، مما يقلل من عدد الترانزستورات المستخدمة في الدارة وبالتالي يقلل من استهلاك الاستطاعة [5].



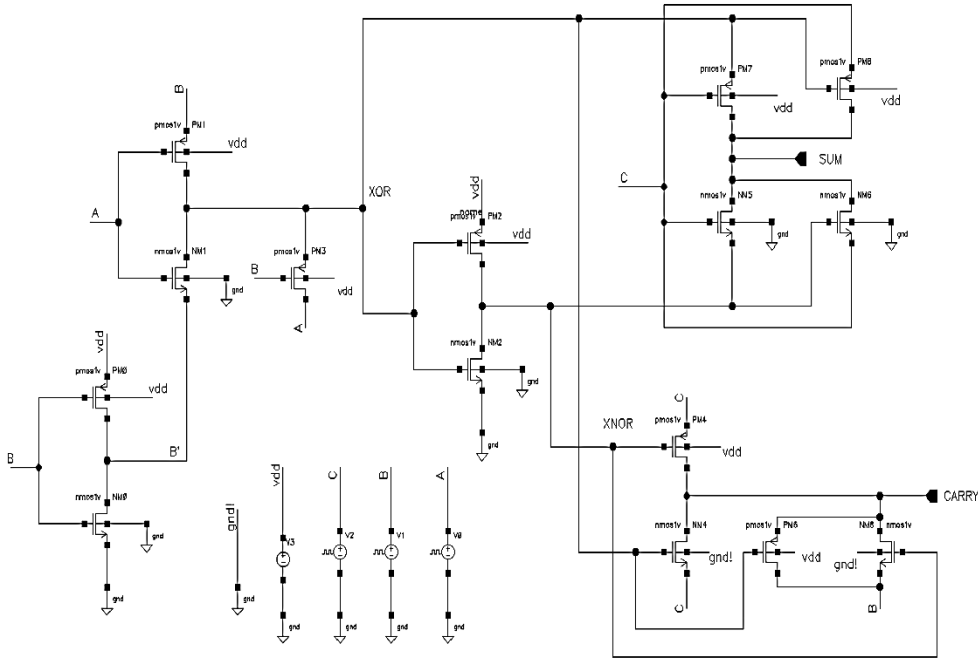
الشكل (5): دارة جامع كامل قائم على استخدام منطق ترانزستورات التمرير PTL (-) PTL (FA) [5].

#### 4.5 الجامع الكامل المقترح (15T-FA):

تم تصميم دارة الجامع الكامل 15T-FA المقترحة باستخدام 15 ترانزستور كما هو مبين في الشكل (6)، حيث تعتمد الدارة المقترحة على استخدام دارة XOR منخفضة الاستطاعة في بنيتها والتي تتكون من 5 ترانزستورات، تم الاعتماد على كل من التقنيتين PTL و GDI لتنفيذ البوابة المنطقية XOR بأقل عدد ممكن من الترانزستورات، ولذلك تتميز دارة XOR المستخدمة بأنها ذات استهلاك استطاعة منخفض ومساحة صغيرة.

تم استخدام تقنية GDI للحصول على إشارة المجموع (SUM)، بالإضافة إلى استخدام ترانزستورات إضافية للمحافظة على مستوى جهد الخرج متأرجح بشكل كامل من 0 إلى Vdd، في حين تم الحصول على إشارة الحمل (CARRY) باستخدام تقنية بوابة الإرسال (Transmission Gate (TG)) للحصول على جهد خرج متأرجح بشكل كامل وذلك من خلال معالجة مشكلة هبوط الجهد الناتج عن جهد العتبة [19].

تتميز دارة الجامع الكامل المقترحة 15T-FA بأنها ذات استهلاك استطاعة منخفض ومساحة صغيرة وذلك بسبب تقليل عدد الترانزستورات المستخدمة في بنية الدارة، مع المحافظة على جهد خرج متأرجح بشكل كامل وأداء زمني جيد من حيث تأخير الانتشار.

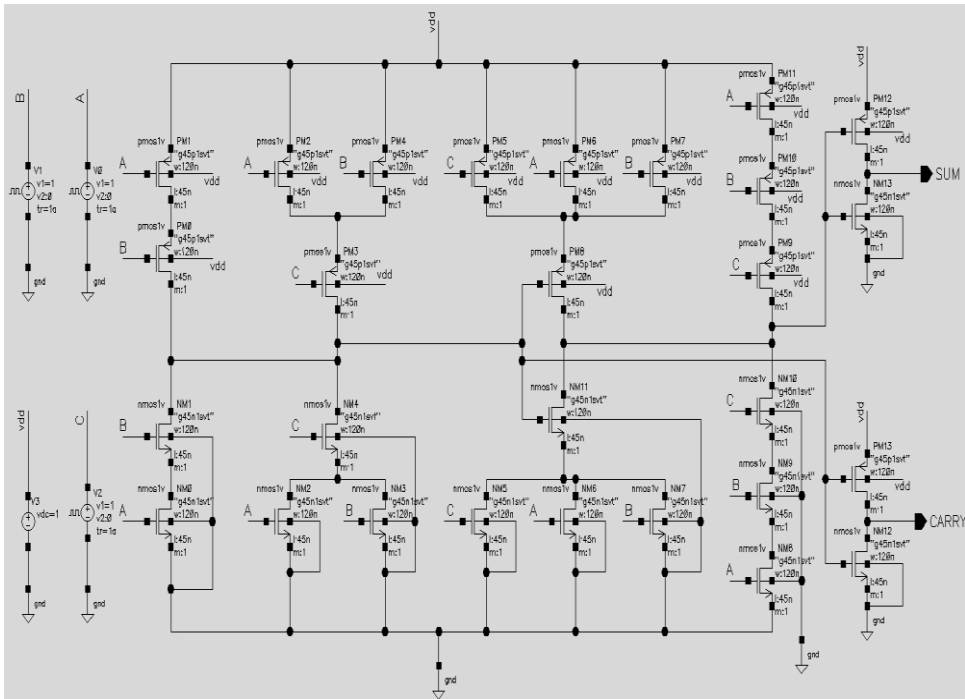


الشكل (6): دارة الجامع الكامل المقترح 15T-FA.

5. نتائج المحاكاة:

### 5.1 دارة الجامع الكامل التقليدي (28T-FA):

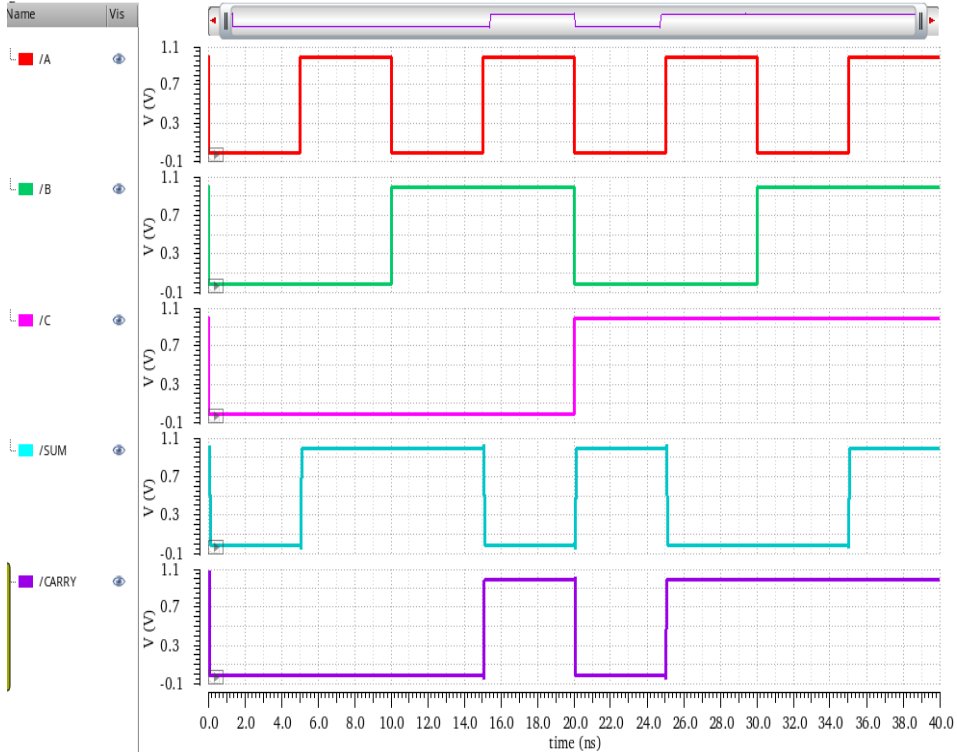
تمت محاكاة دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA باستخدام برنامج Cadence Virtuoso عند تقنية 45 nm كما هو مبين في الشكل (7)، وذلك عند جهد تغذية  $V_{dd}=1\text{ v}$  ودرجة حرارة  $T=27\text{ C}^\circ$  (Celsius) وبأبعاد  $(W/L) = 120/45\text{ nm}$  لكل من ترانزستورات الـ NMOS والـ PMOS، حيث أن عرض الترانزستور  $W$  وطول الترانزستور  $L$ .



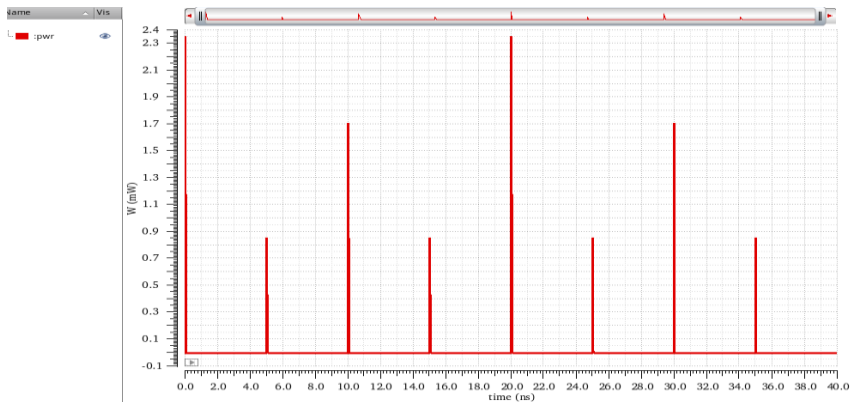
الشكل (7): مخطط الجامع الكامل التقليدي (28T-FA).

تم من خلال هذه المحاكاة إظهار كل من منحنيات الدخل والخرج لدارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA بالاعتماد على المحاكاة العابرة والمبينة في الشكل (8)، وتم حساب كل من البارامترات التالية والتي تعبر عن أداء دارة الجامع الكامل، وهي:

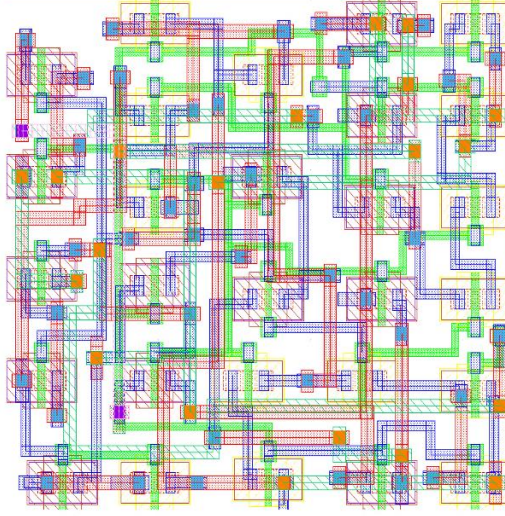
- **الاستطاعة المتوسطة (Average Power):** والتي يتم حسابها من خلال أخذ القيمة المتوسطة للاستطاعة الكلية المستهلكة في الدارة والمبينة في الشكل (9).
- **التأخير:** يتم حساب التأخير لكل من إشارتي الخرج، وهما تأخير إشارة المجموع ( Sum Delay) وتأخير إشارة الحمل (Carry Delay).
- **مضروب التأخير بالاستطاعة (PDP):** والذي نحصل عليه من خلال ضرب أسوأ حالة تأخير بالاستطاعة المتوسطة.
- **المساحة (area):** والتي يتم حسابها من خلال التخطيط (layout) لدارة الجامع الكامل، كما هو مبين في الشكل (10).



الشكل (8): المحاكاة العابرة لمداخل ومخارج دائرة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA.



الشكل (9): المحاكاة العابرة للاستطاعة المستهلكة لدائرة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA.



الشكل (10): تخطيط (layout) لدارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA.

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

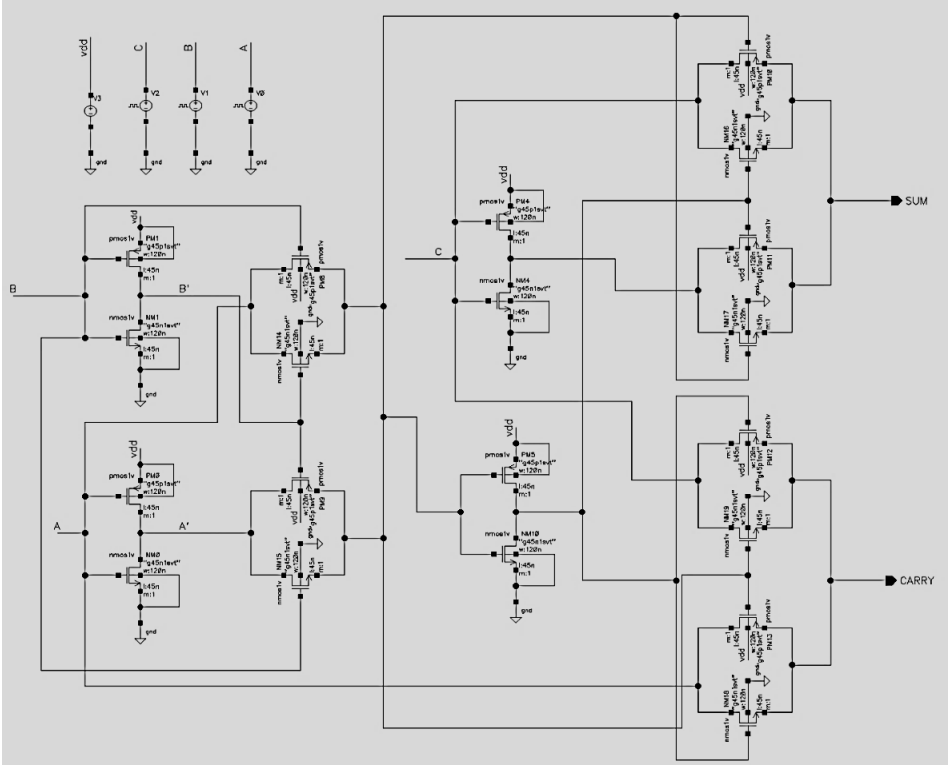
الجدول (2): نتائج محاكاة دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA.

المساحة ( $\mu m^2$ )	مضروب التأخير بالاستطاعة (aj)	تأخير إشارة الحمل (ps)	تأخير إشارة المجموع (ps)	الاستطاعة المتوسطة (nW)	
10.011	18.103	42.8188	70.6453	256.253	28T- FA

5.2 دارات الجامع الكامل الأخرى:

- دارة الجامع الكامل القائم على تقنية بوابة الإرسال (TG-FA):

تم محاكاة دارة الجامع الكامل TG-FA المبينة في الشكل (11) عند بارامترات تشغيل مشابهة لدارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA. تعتمد هذه الدارة على استخدام تقنية الإرسال TG لتجنب مشكلة هبوط الجهد الناتج عن جهد العتبة، والحصول على جهد خرج متأرجح بشكل كامل. تظهر نتائج المحاكاة في الجدول (3).

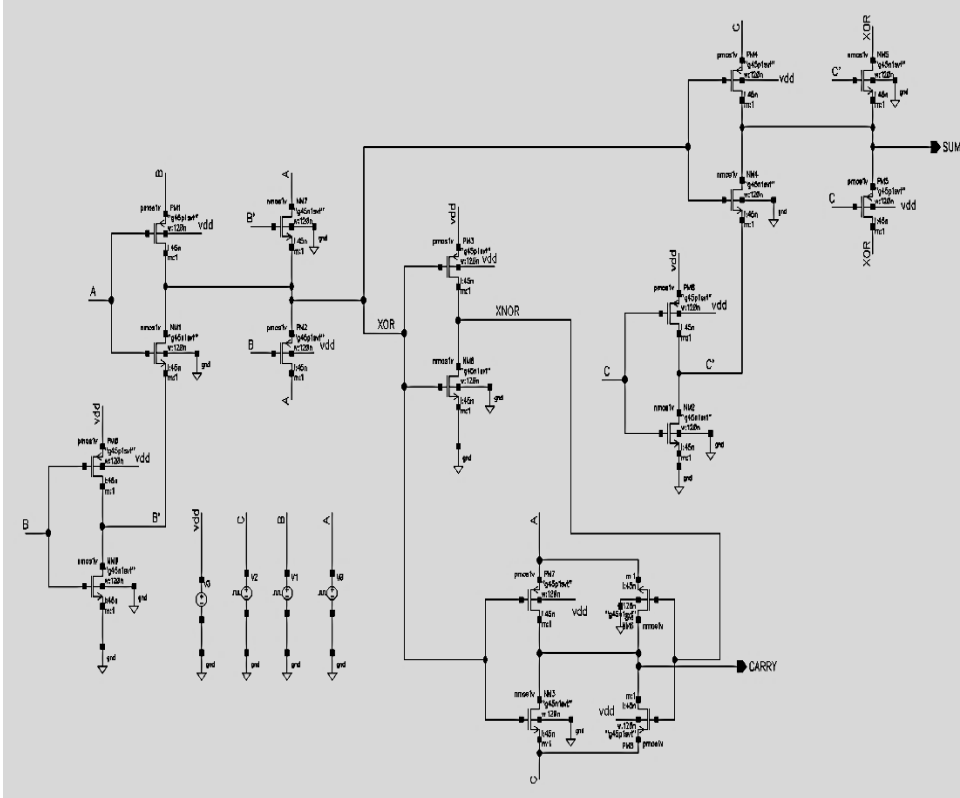


الشكل (11): مخطط دارة الجامع الكامل TG-FA.

• دارة الجامع الكامل الهجينة H-FA:

تمت محاكاة دارة الجامع الكامل الهجينة (H-FA) المبينة في الشكل (12) عند بارامترات تشغيل مشابهة لدارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA. تعتمد دارة الجامع الكامل الهجينة على استخدام

مجموعة من النواخب الهجينة  $2*1$ ، وتستخدم في بنيتها 18 ترانزستوراً [11]، تم استعراض نتائج المحاكاة في الجدول (3).

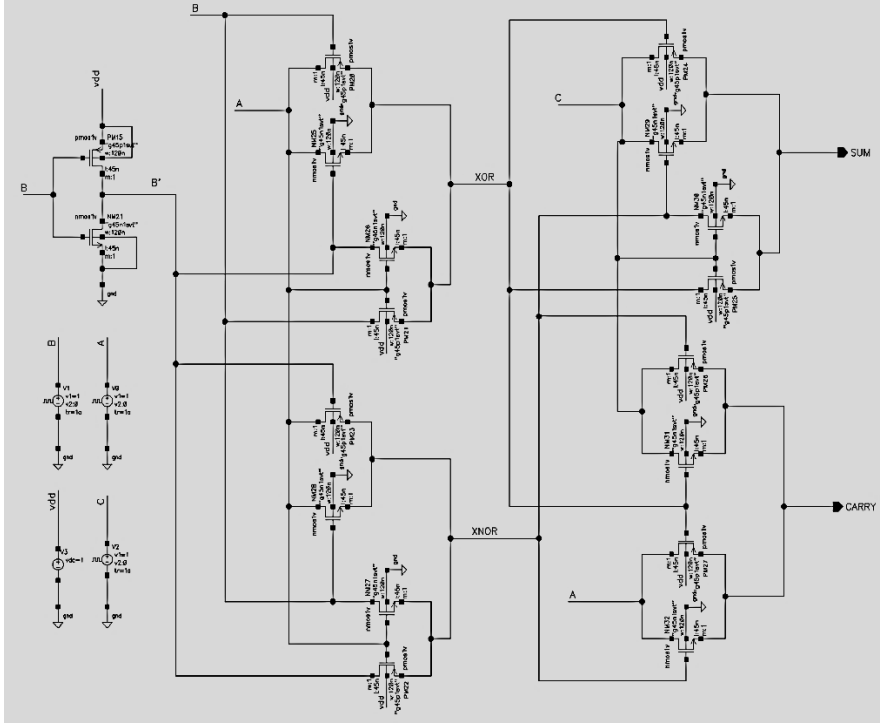


الشكل (12): محاكاة دارة الجامع الكامل الهجينة H-FA.

• دارة الجامع الكامل القائم على تقنية PTL (PTL-FA):

تمت محاكاة دارة الجامع الكامل PTL-FA المكونة من 18 ترانزستوراً كما هو مبين في الشكل (13)، وذلك عند بارامترات تشغيل مشابهة لدارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA. تعتمد هذه الدارة على استخدام تقنية PTL لتقليل عدد الترانزستورات المستخدمة في التصميم، ويتم تصميم

بوابتي XOR و XNOR بشكل منفصل لكي يعملان بشكل متوازٍ في نفس الوقت مما يقلل من التأخير، تم استعراض نتائج المحاكاة في الجدول (3).



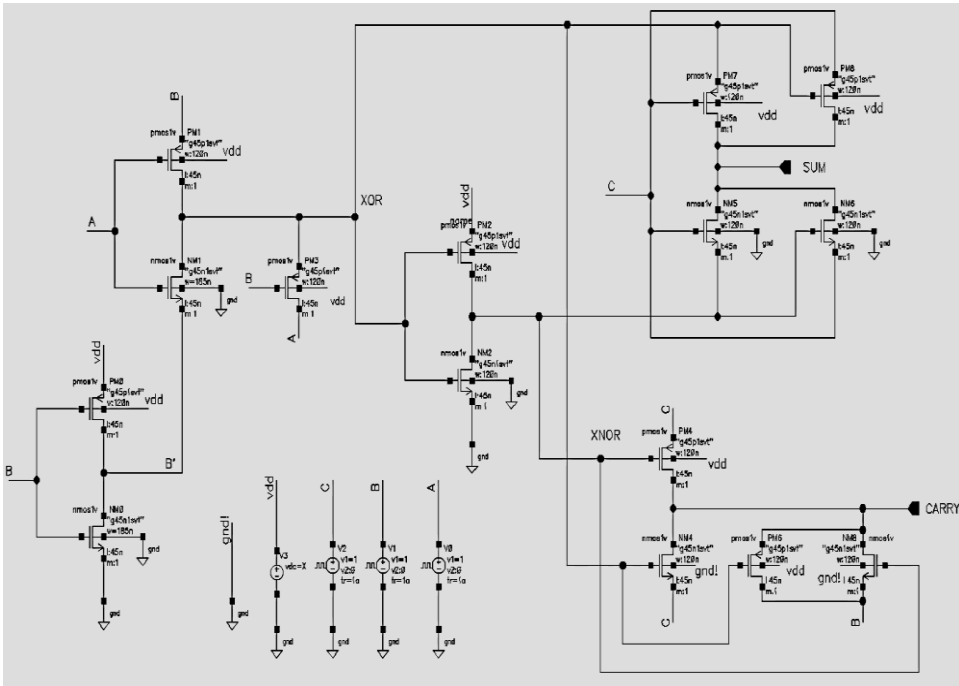
الشكل (13): مخطط دائرة الجامع الكامل PTL-FA.

• دائرة الجامع الكامل المقترح 15T-FA:

تمت محاكاة دائرة الجامع الكامل المقترح (15T-FA) المبينة في الشكل (14) عند بارامترات تشغيل مشابهة لدائرة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA، والتي تعتمد على استخدام التقنيات GDI و PTL و TG في بنيتها. وكشفت المحاكاة عن أن المسار الذي يضم ترانزستوري الـ NMOS (NM0, NM1) المستخدم في بنية XOR هو المسار الحرج الذي يحمل أقصى تأخير انتشار.

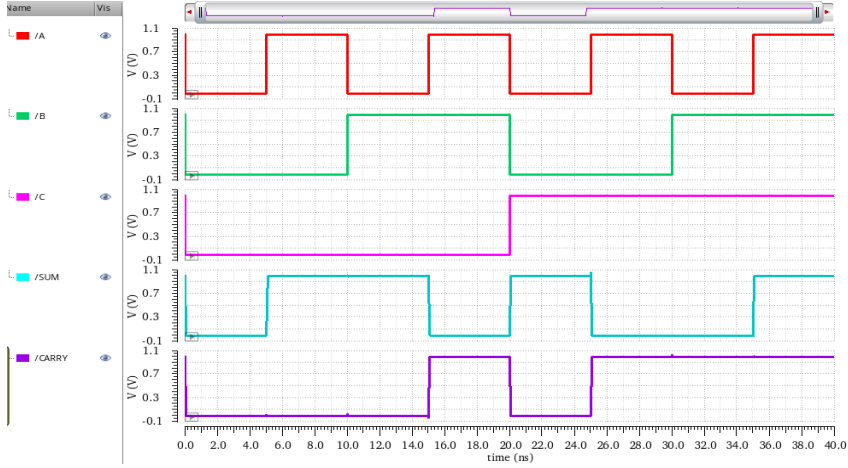
لمعالجة هذا المشكلة تم تحسين أبعاد هذين الترانزستورين من خلال زيادة العرض لكل منهما ليصبح  $(W/L) = 185/45 \text{ nm}$ .

أدت الزيادة في عرض هذين الترانزستورين إلى زيادة التيار المار في هذا المسار الحرج، مما أدى إلى انخفاض في زمن التأخير، إلا أنه وكما هو متوقع فإن هذا التحسين في التأخير أدى إلى زيادة طفيفة في استهلاك الاستطاعة والمساحة، ولكن دون أن تتأثر كفاءة الدارة الإجمالية بشكل سلبي وذلك بسبب الميزة الأساسية في التصميم، وهي استخدام عدد منخفض من الترانزستورات (15 ترانزستوراً فقط)، مما يضمن المحافظة على استهلاك منخفض للاستطاعة ومساحة صغيرة. تم استعراض نتائج المحاكاة العابرة في الشكل (15) ونتائج المحاكاة في الجدول (3).



الشكل (14): مخطط دارة الجامع الكامل المقترح 15T-FA.

## تصميم وتحليل دائرة جامع كامل منخفضة الاستطاعة والمساحة باستخدام تقنية CMOS 45 nm



الشكل (15): المحاكاة العابرة لمدخل ومخارج دائرة الجامع الكامل المقترح 15T-FA.

الجدول (3): نتائج محاكاة دارات الجامع الكامل 28T-FA و TG-FA و H-FA و PTL-FA و

FA و Proposed FA (15T-FA) عند جهد تغذية  $V_{dd}=1\text{ V}$

Proposed FA (15T-FA)	PTL-FA	H-FA	TG-FA	28T-FA	
172.306	189.073	175.601	225.331	256.253	الاستطاعة المتوسطة (nw)
37.1098	26.097	43.2587	50.4574	70.6453	تأخير إشارة المجموع Sum-Delay (ps)

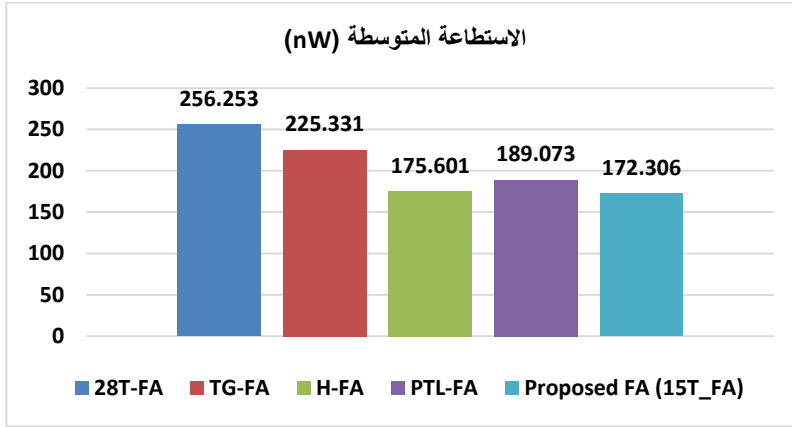
32.1969	33.0027	48.0519	39.5295	42.8188	تأخير إشارة الحمل Carry-(ps) Delay
37.1098	33.0027	48.0519	50.4574	70.6453	حالة التأخير الأسوأ - Worst case delay
6.3942	6.2399	8.4379	11.3696	18.103	مضروب التأخير بالاستطاعة PDP (aJ)
15	18	18	20	28	عدد الترانزستورات
4.701	5.5913	5.6304	6.2186	10.011	المساحة ( $\mu m^2$ )

## 6. الاستنتاجات:

عند إجراء المقارنة ما بين دارات الجامع الكامل التي تم دراستها في هذا البحث، وكما هو مبين من الجدول (3) فإننا نلاحظ ما يلي:

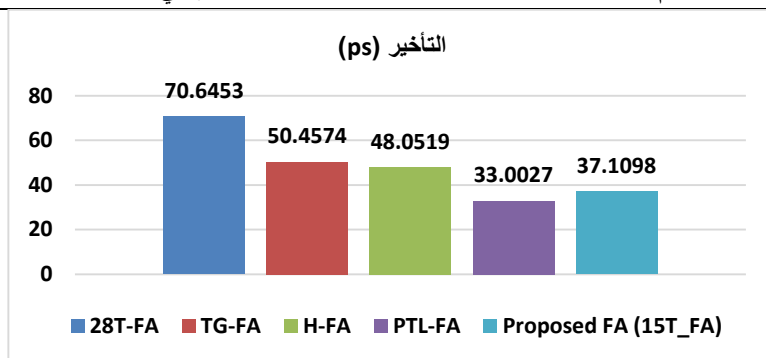
- يلاحظ من خلال المقارنة بين دارات الجامع الكامل المدروسة من حيث استهلاك الاستطاعة أن دارة الجامع الكامل 15T-FA المقترحة هي الأقل استهلاكاً للاستطاعة كما هو مبين

في الشكل (16)، حيث خفضت الدارة المقترحة من استهلاك الاستطاعة بالمقارنة مع الدارات 28T-FA و TG-FA و H-FA و PTL-FA بنسبة % 32.759 و % 23.532 و % 1.876 و % 8.868 على التوالي.



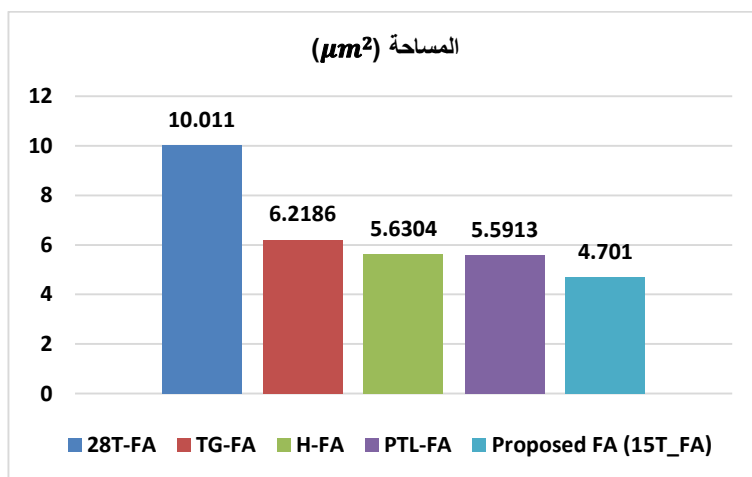
الشكل (16): مقارنة بين دارات الجامع الكامل المدروسة من حيث استهلاك الاستطاعة المتوسطة.

- يلاحظ من خلال المقارنة بين دارات الجامع الكامل المدروسة من حيث التأخير أن دائرة الجامع الكامل 15T-FA المقترحة تمتلك تأخيراً أقل بالمقارنة مع الدارات 28T-FA و TG-FA و H-FA بنسبة % 47.47 و % 26.453 و % 22.771 على التوالي، في حين تظهر الدارة PTL-FA تأخيراً أقل من الدارة المقترحة بنسبة % 11.06 كما هو مبين في الشكل (17).



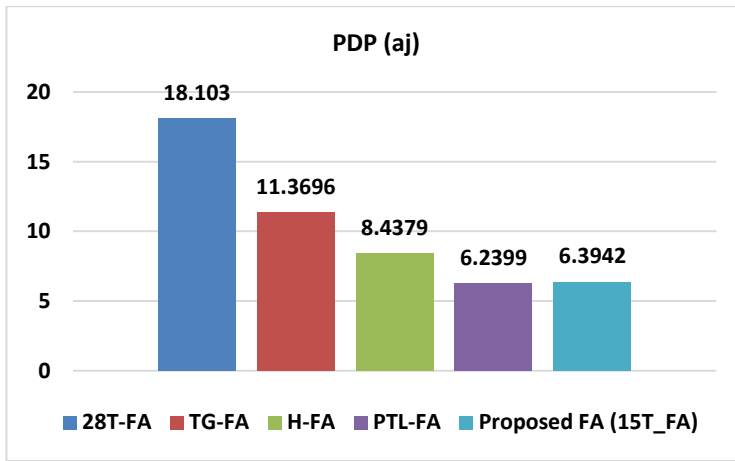
الشكل (17): مقارنة بين دارات الجامع الكامل المدروسة من حيث تأخير الانتشار.

- يلاحظ من خلال المقارنة بين دارات الجامع الكامل المدروسة من حيث المساحة كما هو مبين في الشكل (18)، أن دارة الجامع الكامل المقترحة 15T-FA هي الأقل مساحةً، وذلك بسبب استخدامها عدد أقل من الترانزستورات في بنيتها، حيث خفضت من المساحة المشغولة مقارنةً بالدارات 28T-FA و TG-FA و H-FA و PTL-FA بنسبة % 53.041 و % 24.404 و % 16.506 و % 15.922 على التوالي.



الشكل (18): مقارنة بين دارات الجامع الكامل المدروسة من حيث المساحة.

- يلاحظ من خلال المقارنة بين دارات الجامع الكامل المدروسة من حيث مضروب التأخير بالاستطاعة PDP، والذي يعبر عن كل من استهلاك الاستطاعة والتأخير معاً، أن الدارة المقترحة خفضت من الـ PDP بالمقارنة مع الدارات 28T-FA و TG-FA و H-FA بنسبة % 64.678 و % 43.76 و % 24.22 على التوالي، في حين تمتلك الدارة PTL-FA قيمة PDP أقل بشكل بسيط من الدارة المقترحة بنسبة % 2.413 كما هو مبين في الشكل (19).



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

يمكن أن نجد من خلال المقارنة السابقة ما يلي:

- أن دارة الجامع الكامل التقليدي 28T-FA هي الأكثر استهلاكاً للاستطاعة، والأكبر بتأخير الانتشار والمساحة، وذلك بسبب عدد الترانزستورات الكبير المستخدم في بنيتها (28 ترانزستوراً).

- نجد أن الدارة H-FA تتميز باستهلاك استطاعة منخفض، ومتساوٍ تقريباً مع استهلاك الاستطاعة في دارة الجامع الكامل المقترحة 15T-FA، إلا أن الدارة المقترحة تتفوق عليها بشكل واضح في كل من التأخير ومضروب التأخير بالاستطاعة (PDP) والمساحة.
- نجد أن الدارة PTL-FA تتميز بقيمة PDP منخفضة، ومتساوية تقريباً مع قيمة PDP لدارة الجامع الكامل 15T-FA المقترحة، إلا أن الدارة المقترحة تتفوق عليها بشكل واضح من حيث المساحة، وذلك بسبب استخدام عدد أقل من الترانزستورات في بنيتها.
- نجد من المقارنة السابقة ونتائج المحاكاة المبنية في الجدول (3) أن الدارة المقترحة 15T-FA تتميز بكفاءة عالية من حيث مضروب التأخير بالاستطاعة (PDP)، مما يدل على تحقيق التوازن ما بين التأخير واستهلاك الاستطاعة. كما تُعد الدارة المقترحة هي الأقل مساحةً واستهلاكاً للاستطاعة مقارنةً بالدارات الأخرى التي تم دراستها، مما يجعلها خياراً مثالياً للتطبيقات التي تتطلب مساحة صغيرة واستهلاكاً منخفضاً للاستطاعة، مثل الأجهزة المحمولة والأجهزة القابلة للارتداء وتطبيقات إنترنت الأشياء والأنظمة المدمجة وغيرها.

#### 7. الخاتمة:

تم في هذا البحث تصميم ودراسة ومحاكاة دارة جامع كامل مقترحة (15T-FA) باستخدام برنامج Cadence Virtuoso 6.1.7 عند تقنية تصنيع CMOS 45 nm، وتم مقارنتها مع عدة دارات جامع كامل أخرى، وهي 28T-FA و TG-FA و H-FA و PTL-FA من حيث استهلاك الاستطاعة والمساحة وتأخير الانتشار ومضروب التأخير بالاستطاعة (PDP).

أظهرت نتائج المحاكاة بأن الدارة المقترحة 15T-FA تتميز باستهلاك استطاعة منخفض ومساحة صغيرة مع الحفاظ على قيم منخفضة لكل من التأخير وال PDP، حيث خفضت الدارة المقترحة 15T-FA من قيمة الاستطاعة المستهلكة بالمقارنة مع الدارات 28T-FA و TG-FA و H-FA و PTL-FA و FA بنسبة 32.759 % و 23.532 % و 1.876 % و 8.868 % على التوالي. كما أظهرت نتائج المحاكاة أن الدارة المقترحة هي الأقل مساحةً بين الدارات المدروسة، حيث

خفضت من المساحة مقارنةً بالدارات 28T-FA و TG-FA و H-FA و PTL-FA بنسبة % 53.041 و % 24.404 و % 16.506 و % 15.922 على التوالي. بناءً على ذلك تعتبر الدارة المقترحة 15T-FA مناسبة جداً للتطبيقات التي تتطلب استهلاك استطاعة منخفض ومساحة صغيرة، مثل الأجهزة المحمولة والأجهزة القابلة للارتداء وتطبيقات الأنظمة المضمنة منخفضة الطاقة.

يمكن في الأعمال المستقبلية تطوير التصميم المقترح من خلال استخدام تقنيات تصنيع أحدث، مثل 32 nm أو 22 nm وغيرها. ويمكننا دراسة إمكانية استخدام أنواع متقدمة من الترانزستورات مثل FinFET و GnrFET و CNTFET بهدف تحسين الأداء وتقليل استهلاك الاستطاعة، نظراً لما تتمتع به هذه الترانزستورات من خصائص فيزيائية وإلكترونية مميزة تساهم في تعزيز الكفاءة الطاقية والسرعة التشغيلية للدارات الرقمية.

#### 8. المراجع:

1. VENKAT, D., MENDEZ, T., SAMANTH, R., & NAYAK, S. G. (2023, October)- Novel Design of Ripple Carry Adder using High Speed 12T Hybrid MOS Transistors. In Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. Vol. 2571, No. 1, p. 012025.
2. SINGH, S., & SHUKLA, Y. B. (2023)- Design of Low Power Full Adder for Portable Digital Applications (Doctoral dissertation, GUJARAT TECHNOLOGICAL UNIVERSITY AHMEDABAD).
3. ANAND, S., & INDU, S. (2020, February)- A low power and high speed 8-bit ALU design using 17T full adder. In 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), IEEE. pp. 514–519.
4. HEMANTH, B. S., & KUMAR, M. S. (2023, October)- Low power, less area, and highly efficient hybrid 1-bit full adder. In Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. Vol. 2571, No. 1, p. 012026.

5. YIN, N., PAN, W., YU, Y., TANG, C., & YU, Z. (2023)- Low-power pass-transistor logic-based full adder and 8-bit multiplier. *Electronics*, 12(15), 3209.
6. KUKRETI, K., KUMAR, P., BARTHWAL, S., JUYAL, A., & JOSHI, A. (2021, January)- Performance analysis of full adder based on domino logic technique. In 2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), IEEE. pp. 312–316.
7. DUANMU, Y., YANG, J., LI, J., XUE, X., JING, M., & ZENG, X. (2020, November)- A 16-bit arithmetic logic unit design by using gate diffusion input. In 2020 IEEE 15th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT), IEEE. pp. 1–3.
8. HONG, B., YOU, X., & HU, J. (2016)- A Low Power Full-Swing Hybrid Full Adder using Modified GDI Cells. *International Journal of Simulation – Systems, Science & Technology*, 17(49): 26.1–26.6.
9. AGGARWAL, P., & GARG, B. (2024)- Energy Efficient Full Swing GDI Based Adder Architecture for Arithmetic Applications. *Wireless Personal Communications*, 135(3), 1663–1678.
10. ARAÚJO, A. F. (2024)- Comparison of full-adder cell layouts for 90 nm CMOS technology (Master's thesis, UNIVERSIDADE DO PORTO (PORTUGAL)).
11. SRINIVAS, D., REDDY, N. S. S., & NAIK, B. R. (2023)- Design and analysis of hybrid 10T adder for low power applications. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 6(3), 100379.
12. SHIVAJI, C., PRIYA, G. H., VAMSI, G. V. V., DEVI, K. G., & RAMANI, J. R. (2022)- Power and delay optimization of 8 bit ALU using various techniques. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 11(6):335–341.
13. UPADHYAY, R. M., CHAUHAN, R. K., & KUMAR, M. (2022)- Performance evaluation of efficient low power 1-bit hybrid full adder.

- ADCAIJ: Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal, 11(4), 475–488.
14. YADAV, H., GOYAL, A. K., & KUMAR, A. (2020, March)- Design analysis and comparative study of GDI based full adder design. In 2020 6th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC), IEEE. pp. 319–321.
  15. ARULKARTHICK, V. J., THIRUVENGADAM, R., ARVIND, C., & SRIHARI, K. (2021)- Area and power delay product efficient level restored hybrid full adder (LR-HFA). Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 109(1), 165–172.
  16. WAIRYA, S., PANDEY, H., NAGARIA, R. K., & TIWARI, S. (2010, November)- Ultra low voltage high speed 1-bit CMOS adder. In 2010 International Conference on Power, Control and Embedded Systems, IEEE. pp. 1–6.
  17. HASAN, M., HUSSAIN, M. S., HOSSAIN, M., HASAN, M., ZAMAN, H. U., & ISLAM, S. (2021)- A high-speed and scalable XOR-XNOR-based hybrid full adder design. Computers & Electrical Engineering, 93, 107200.
  18. VENDHAN, A. M. (2020, March)- Impact of Temperature on Circuit Metrics of Various Full Adders. In International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems: Proceedings of ICCCES 2019, Singapore: Springer Singapore. pp. 517–524.
  19. KANDPAL, J., TOMAR, A., & AGARWAL, M. (2021)- Design and implementation of 20-T hybrid full adder for high-performance arithmetic applications. Microelectronics Journal, 115, 105205.