مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية والكهربائية والمعلوماتية

مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 3

1448 هـ - 2026 م

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

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

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

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص

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

. هاتف / فاكس : 2138071 31 963 ++

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

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

ISSN: 1022-467X

شروط النشر في مجلة جامعة حمص

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
- طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
- **اذا كان الباحث طالب دراسات عليا:**

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

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

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

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة البعث :**

يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.

- **اذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :**

يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.

- **يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):**

عنوان البحث . . ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1- مقدمة

2- هدف البحث

3- مواد وطرق البحث

4- النتائج ومناقشتها .

5- الاستنتاجات والتوصيات .

6- المراجع.

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

1. مقدمة.
2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
3. أهداف البحث و أسئلته.
4. فرضيات البحث و حدوده.
5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
7. منهج البحث و إجراءاته.
8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
9. نتائج البحث.
10. مقترحات البحث إن وجدت.
11. قائمة المصادر والمراجع.

7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:

أ- قياس الورق 17.5×25 B5.

ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 – يمين 2.5- يسار 2.5 سم

ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8

ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20

ـ كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي ـ العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.

ج . يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.

8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.

9- تقديم أي بحث للنشر في المجلة يدل ضمناً على عدم نشره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.

10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة

11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام وورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

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

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة ـ الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة ـ سنة النشر ـ وتتبعها معترضة (–) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة ـ دار النشر وتتبعها فاصلة ـ الطبعة (ثانية . ثالثة) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة.

وفيما يلي مثال على ذلك:

–MAVRODEANUS, R1986– **Flame Spectroscopy**. Willy, New York, 373p.

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

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

مثال على ذلك:

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

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

رسوم النشر في مجلة جامعة حمص

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

المحتوى

اسم البحث	اسم الباحث	الصفحة
تقييم أثر زوايا دوران الفجوات الهوائية في الطوب الاسمنتي المفرغ على أدائه الحراري	د.م. أنس حسن قرمو	42-11
كشف الغش في الامتحانات عبر الإنترنت بناءً على تحليل الفيديو باستخدام التعلم العميق	م. بشرى السطلي د. محمد بسام الكردي	80-43
دراسة عملية لخوارزميات تقريبية لمسألة البيان الجزئي الأصغري الممتد المضاعف الترابط للمجموعة T	رهام منصور د. رائد جابري	142-81
تصميم وحدة التخزين المؤقت في موجه الشبكات ضمن الرقاقة غير المتزامنة القائمة على المنطق NCL	م. رهف المصطفى أ.د. عبد الله غندور د. نبيل دحدوح	167-143

تقييم أثر زوايا دوران الفجوات الهوائية في الطوب الاسمنتي المفرغ على أدائه الحراري

د.م. أنس حسن قرمو

الملخص

إن التزايد المضطرد في عدد سكان العالم، رافقه زيادة في الطلب على الطاقة بأنواعها، لاسيما الطاقة الحرارية اللازمة لأغراض التدفئة والتكييف في المباني السكنية، فكان لابد من البحث عن حلول لتقليل من الطاقة المهدورة، يتمثل أحد محاور البحث في تحسين مواصفات جدران المباني السكنية، وأهم مكونات جدران المباني المطلوب تحسينها هو الطوب الاسمنتي المفرغ (البلوك المفرغ) المستخدم في بناء جدران المباني السكنية، وهو محور هذه الدراسة.

تم في هذا البحث دراسة تأثير زاوية دوران الفجوات الهوائية وتوضعها في الطوب الاسمنتي المفرغ على أدائه الحراري، أجريت هذه الدراسة بطريقة النمذجة العددية باستخدام برنامج ANSYS، حيث تمت دراسة ثلاثة نماذج من الطوب الاسمنتي يحتوي كل منها على سبع فجوات هوائية ذات شكل بيضوي، أُعطي كل نموذج زاوية دوران محددة لفجواته بالنسبة لطول الطوبة، حيث كانت زاوية دوران النموذج الأول 0° وللنموذج الثاني 45° وللنموذج الثالث 90°، تم تصميم النماذج باستخدام برنامج WORKS SOLID ومن ثم تصديرها لبرنامج النمذجة ANSYS، تم البدء بالنمذجة الحرارية بأخذ الشروط الحدية الموافقة لأجواء مدينة حمص السورية في فصلي الصيف والشتاء، ودراسة ست حالات نمذجية. بينت نتائج النمذجة بأن النموذج الأول يحقق أفضل أداء حراري في كلا الفصلين، حيث تفوق على النموذجين الثاني والثالث من ناحية التدفق الحراري ومعامل التوصيل الحراري المكافئ والمقاومة الحرارية، فكانت المقاومة الحرارية للنموذج الأول أكبر من مقاومة النموذج الثاني والثالث في فصل الصيف بنسبة 21.72% و 37.36% على التوالي، وفي فصل الشتاء بنسبة 17.049% و 34.19% على التوالي، أي أن النموذج ذي الفجوات بزاوية دوران 0° هو النموذج الأفضل حرارياً.

وبينت نتائج البحث أن انتقال الحرارة بالحمل له أثر هام على انتقال الحرارة الإجمالي في العينات المدروسة. وبالنتيجة كلما زادت زاوية دوران الفجوات الهوائية كلما قلت المقاومة الحرارية للطوب الاسمنتي المفرغ المستخدم في بناء جدران المباني السكنية، وبالتالي زيادة الفقد الحراري.

الكلمات المفتاحية: الطوب الاســـمنتي المفرغ – زاوية دوران الفجوات – النمذجة الحرارية – الفجوات البيضوية.

Evaluating the effect of rotation angles of air voids in hollow cement bricks on their thermal performance

Dr. Anas Qarmo

Abstract

The steady increase in the world's population has been accompanied by a rise in the demand for all types of energy, particularly thermal energy needed for heating and cooling in residential buildings. Therefore, it became necessary to find solutions to reduce wasted energy. One area of research focuses on improving the specifications of residential building walls, and the most important component of these walls requiring improvement is the hollow cement brick (hollow block) used in their construction, which is the focus of this study.

This research studied the effect of the rotation angle and position of air voids in hollow cement bricks on their thermal performance. This study was conducted using numerical modeling with the ANSYS program, where three cement brick models were studied, each containing seven oval-shaped air voids. Each model was given a specific rotation angle for its voids with respect to the length of the brick, where the rotation angle of the first model was 0º, for the second model 45º, and for the third model 90º. The models were designed using the SOLID WORKS program and then exported to the ANSYS modeling program. The thermal modeling was started by taking the limiting conditions corresponding to the atmosphere of the Syrian city of Homs in the summer and winter seasons, and six model cases were studied. The modeling results showed that the first model achieved the best thermal

performance in both seasons, outperforming the second and third models in terms of heat flow, equivalent thermal conductivity, and thermal resistance. The thermal resistance of the first model was 21.72% and 37.36% higher than the second and third models, respectively, in summer, and 17.049% and 34.19% higher in winter. This indicates that the model with 0º rotation angle gaps is the thermally superior model. The research also revealed that convection heat transfer has a significant impact on the overall heat transfer in the studied samples. Consequently, the greater the rotation angle of the air gaps, the lower the thermal resistance of the hollow cement bricks used in residential building walls, thus increasing heat loss.

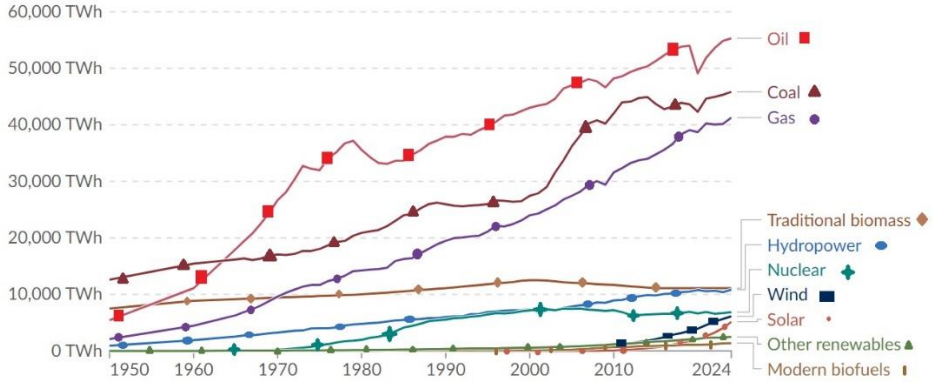
Key Words: Hollow cement bricks - angle of rotation of gaps - thermal modeling - oval gaps.

1.مقدمة:

تُعدّ الطاقة أحد الركائز الأساسية للتنمية في المجتمعات الحديثة، وترتبط ارتباطاً وثيقاً بالتطور الصناعي والتقني الذي يشهده العالم. أدى هذا التطور المتسارع إلى زيادة مطّردة في الطلب على مصادر الطاقة، ما أسهم في ارتفاع تكاليفها بشكل ملحوظ. وفي المقابل بدأت تظهر بوضوح مشكلة تناقص الموارد التقليدية للطاقة، وخاصة المصادر الأحفورية، الأمر الذي دفع الدول إلى تبنّي سياسات واستراتيجيات تهدف إلى ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءتها في مختلف القطاعات.

تُعد مسألة استهلاك الطاقة في المباني من أبرز القضايا التي تواجه دول العالم اليوم، إذ يمثل هذا القطاع النسبة الأكبر من إجمالي استهلاك الطاقة مقارنةً بقطاعات النقل أو الصناعة. ولم تكن الجمهورية العربية السورية بمعزل عن هذه التحديات، حيث يبرز فيها قطاع المباني بوصفه أحد أهم القطاعات التي تتطلب حلولاً فعّالة لتقليل الهدر الطاقي. يوضّح الشكل (1) الزيادة

العالمية في استهلاك الطاقة بأنواعها خلال الفترة الممتدة بين عامي 1950 و 2024 [1]، كما يبين الجدول (1) استهلاك الطاقة على مستوى العالم وبعض القارات وبعض البلدان الكبيرة. [2]



الشكل (1) يظهر الزيادة العالمية في استهلاك الطاقة (المقدرة بالتيرا واط ساعي) بأنواعها خلال الفترة الممتدة بين 1950 و 2024 [1]

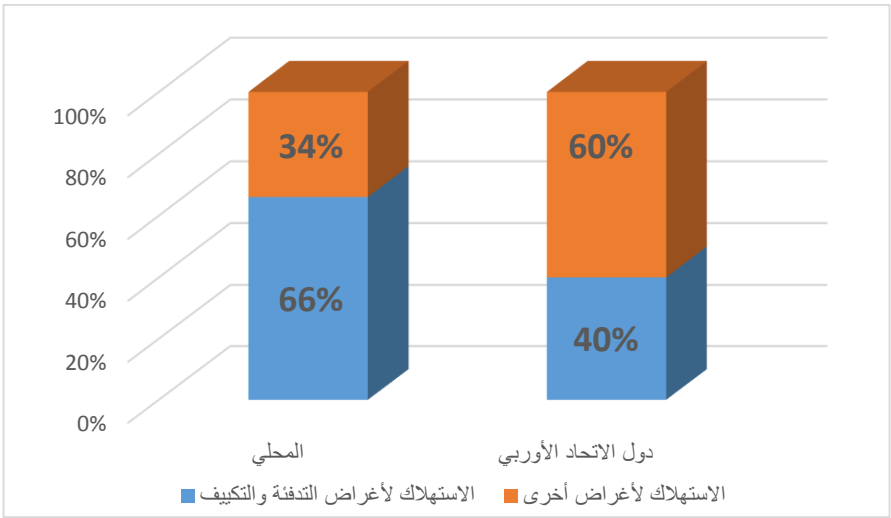
يتسم المناخ في بلدنا بوجود فترتين موسميتين رئيسيتين هما الصيف الحار والشتاء البارد، واللتان يجب دراستهما، في حين فترات الاعتدال المناخي، الربيع والخريف، تكون الشروط المناخية فيها مريحة نسبياً. أن التغيرات المناخية العالمية، ولا سيما ظاهرة الاحتباس الحراري، ساهمت في زيادة حدة الابتعاد عن درجات الحرارة الطبيعية بين الفصول (زيادة درجات الحرارة صيفاً وانخفاضها شتاءً). ونتيجة لذلك، يتم الاعتماد على منظومات التدفئة والتبريد الميكانيكية والكهربائية لضمان راحة المستخدمين وتوفير بيئة داخلية مستقرة في المباني. أن الاعتماد المتزايد على هذه المنظومات، أدى إلى ارتفاع كبير في معدلات استهلاك الطاقة ضمن قطاع الأبنية، وخاصة خلال العقدين الأخيرين. وتشير الدراسات إلى أن النسبة الأكبر من الطاقة المستهلكة في المباني السورية تُستخدم لأغراض التبريد صيفاً والتدفئة شتاءً، وهو ما يرتبط مباشرةً بطبيعة المناخ المحلي وعدم تطبيق تقنيات العزل الحراري في المباني [3].

الجدول (1) استهلاك الطاقة على مستوى العالم وبعض القارات وبعض البلدان الكبيرة المقدرة بالتيرا واط ساعي [2]

المكان	2024	2020	2010	2000

العالم	176,737	157,994	141,602	110,416
الولايات المتحدة الأمريكية	26,529	24,630	25,954	26,546
الصين	48,987	41,494	29,056	11,800
المملكة المتحدة	1937	1,983	2,475	2,664
قارة أوربا	19800	22,086	24,879	24,501
قارة أفريقيا	6140	5,413	4,460	3,197
قارة آسيا	97,910	84,083	64,320	36,891

يوضّـــح الشـــكل (2) توزع اســـتهلاك الطاقة لأغراض التدفئة والتكييف في الجمهورية العربية السورية ودول الاتحاد الأوروبي، مبيناً التفاوت في نسب الاستخدام وفعالية أنظمة العزل الحراري في كل منطقة.



الشكل (2) يبين توزع استهلاك الطاقة لأغراض التدفئة والتكييف محلياً ودول الاتحاد الأوروبي [4],[5]

انطلاقاً من المعطيات السابقة أصبح لزاماً علينا الاهتمام بالمواضيع التي تهدف لترشيد استهلاك الطاقة في المباني، لاسيما الطاقة الحرارية المصروفة لأغراض التدفئة والتكييف، وتبرز

لدينا هنا مفاهيم ترشيد الطاقة من خلال تطبيق تقنيات الجدران الذكية للمباني، من خلال تحسين هذه الجدران سواءً من ناحية مواد الصنع أو من الناحية التصميمية لها.

تم في هذا البحث إجراء دراسة على أحد المكونات المستخدمة في جدران المباني وهو الطوب الاسمنتي المفرغ، ودراسة أحد أهم العوامل التي تلعب دوراً أساسياً في عملية انتقال الحرارة بين طرفي الطوب المفرغ، وهو زاوية دوران الفجوات الهوائية الموجودة في الطوب الاسمنتي المفرغ بالنسبة لطولها، بهدف معرفة سلوك انتقال الحرارة بين طرفي الطوبة في حال تغير زاوية دوران الفجوات.

2. أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في دراسة سلوك انتقال الحرارة بين طرفي الطوب الاسمنتي المفرغ، وذلك عند زوايا مختلفة لفجواته، حيث سيؤثر اختلاف زوايا ميل الفجوات على انتقال الحرارة بين طرفي الطوبة كماً وكيفاً.

يقدم هذا البحث وصفاً لعملية انتقال الحرارة بين طرفي الطوب الاسمنتي المفرغ، من أجل حالات مختلفة لتوضع وميل زوايا فجوات الطوب في فصلي الصيف والشتاء، بطريقة النمذجة العددية باستخدام برنامج النمذجة الحرارية ANSYS، بهدف تقييم أثر تغيير زوايا ميل الفجوات على الخصائص الحرارية والطاقية.

ويهدف البحث ايضا للإجابة على عدة تساؤلات جوهرية تتعلق بالأداء الحراري للطوب الاسمنتي المفرغ عند تغيير زوايا ميل فجواته، ومنها:

1- تحديد كيف تؤثر زوايا ميل الفجوات على عملية انتقال الحرارة بين طرفي الطوب الاسمنتي المفرغ.

2- تحديد مدى تأثير زوايا ميل الفجوات على زيادة أو نقصان انتقال الحرارة بالحمل داخل الفراغات مقارنةً مع انتقالها بالتوصيل.

3- معرفة تغير قيم التدفق الحراري الكلي بين طرفي الطوبة مع تغير زوايا الفجوات.

4- تحديد الزاوية التي تحقق أكبر مقاومة حرارية، وبالتالي أفضـــل كفاءة طاقية للطوب الاسمنتي المفرغ.

5- تحديد أياً من الفصـــلين الشـــتاء أم الصـــيف يكون لتغيير الزوايا فيه أثراً أكبر في انتقال الحرارة.

3.الدراسات المرجعية:

شهدت الأدبيات العلمية خلال العقدين الماضيين وفرةً من الدراسات والأبحاث التي تناولت تقييم الأداء الحراري لمكونات البناء الأساسية، بهدف فهم سلوكها الحراري، ومن ثم تحديد السبل الكفيلة بتحسين هذا الأداء بما يحقق متطلبات العزل الحراري ويلبي المعايير والمواصفات المعتمدة في هذا المجال. ويُعد الطوب الإسمنتي المفرغ من أبرز هذه المكونات التي حظيت باهتمام الباحثين، نظراً لدوره المحوري في تكوين جدران الأبنية وتأثيره المباشر على الكفاءة الحرارية لها.

ركزت بعض الدراسات على تحسين الأداء الحراري للطوب الإسمنتي من خلال تطوير مواد تصنيعه، وذلك باقتراح خلطات إسمنتية مركبة تتضمن مواد إضافية تسهم في زيادة المقاومة الحرارية. وأولت دراسات أخرى اهتماماً بتحسين الأداء الحراري عبر تعديل عامل الشكل، حيث تناول عدد من الباحثين تصاميم مختلفة للفجوات الهوائية داخل الطوب الإسمنتي، ودراسة السلوك الحراري لكل تصميم لتحديد الشكل الأكثر كفاءة حرارياً. واتجهت دراسات أخرى لتحسين عامل الشكل من خلال تغيير أبعاد الفجوات الهوائية وتحليل تأثير كل حالة على حدة، إضافة إلى دراسة تأثير اتجاه توضع الفراغات الهوائية سواء كانت شاقولية أو أفقية.

ومن أبرز الأبحاث التي تناولت هذا المجال نذكر:

1- أجرى أوربان عام 2011 وذلك في الولايات المتحدة الأمريكية دراسة بحثية تناولت تأثير إضافة مواد عازلة إلى فجوات الطوب الإسمنتي (تم وضعها ضمن الفراغات الهوائية)، حيث اقترح ستة نماذج مختلفة للطوب الإسمنتي وقام بتحليلها باستخدام أسلوب الدراسة العددية. وأظهرت

نتائج الدراسة أن الطوب منخفض الكثافة يُعد أكثر ملاءمة من الطوب عالي الكثافة من حيث إمكانية تحسين أدائه الحراري [6].

2- في عام 2017، أجرى الغامدي والحارثي في جامعة ام القرى في المملكة العربية السعودية دراسة عددية تناولت تحليل ثلاثة نماذج من الطوب المفرغ، اختلفت فيما بينها في هندسة الفجوات الداخلية. وشملت الأشكال المدروسة فجوات سداسية، وأخرى ذات شكل مُعين، إضافة إلى فجوات مستطيلة. وأظهرت نتائج الدراسة أن تغيير شكل الفجوات يؤثر في قيمة الإيصالية الحرارية، إلا أن هذا التأثير كان محدوداً، إذ سُجل انخفاض في الإيصالية الحرارية بنسبة 8% للنموذج ذي الفجوات السداسية، وبنسبة 6% للفجوات ذات الشكل المُعين، بالمقارنة مع الشكل المستطيل. [7].

3- في عام 2017، قام وانغ وزانغ بدراسة تأثير العوامل التصميمية على الأداء الحراري للطوب المفرغ، وذلك في جامعة جيانغسو في الصين، حيث أُجريت الدراسة باستخدام أسلوب التحليل العددي بالاعتماد على برنامج MATLAB. وأظهرت نتائج الدراسة أن المقاومة الحرارية للطوب تتحسن مع زيادة عدد صفوف الفجوات، وكذلك مع تقليل عرض الأعصاب الفاصلة بينها [8].

4- قدم قرمو وزملائه في جامعة حمص في سوريا العام 2021 بحثاً عمل فيه على دراسة تحسين الأداء الحراري لطوب اسمنتي مفرغ مُصنع من إعادة تدوير الأنقاض، حيث قام بتحسين الأداء الحراري للطوب عن طريق اقتراح بعض الخلطات المكونة له واختبار كل خلطة على حدى لتحديد الخلطة الأفضل، عن طريق تحديد معامل التوصيل الحراري لكل خلطة تجريبياً، واستخدم بعض المواد العازلة لتحسين الخواص الحرارية للطوب، من أهمها حبيبات الستيريوبور السائبة وحبيبات البوليسترين. وقام الباحث بتحسين الأداء الحراري للطوب الاسمنتي عن طريق اعتماد اشكال مختلفة لفجوات الطوب، مع المحافظة على أحجام الفجوات الهوائية الموجودة فيه، واقتراح ستة أشكال لمقاطع الفجوات وهي: الدائرية، البيضوية، المستطيلة، المربعة، السداسية والمثلثية، كما عمل الباحث على دراسة عامل آخر هو ترتيب الفجوات، فتم دراسة نوعين من الترتيب هما

الترتيب المتوازي والترتيب الشطرنجي، حيث تم دراسة كل شكل من أشكال الفجوات المقترحة بترتيبين مختلفين، وبالتالي تم دراسة اثنا عشر نموذجاً، ستاً منها ذات ترتيب متوازي والستة الباقية ذات ترتيب شطرنجي. اعتمدت دراسة تحسين عامل الشكل على النمذجة العددية، حيث تم ادخال البيانات للبرنامج التي تم الحصول عليها بشكل تجريبي من خلال مرحلة الدراسة المتعلقة بتحسين الخلطة، فتم ادخال أفضل نتيجة تجريبية.

بينت نتائج الدراسة أن النموذج الأفضل هو النموذج ذو الفجوات البيضوية وترتيب شطرنجي، حيث حقق وفراً طاقياً نسبته 62.79% شتاءً و 63.09% صيفاً بالمقارنة مع العينات المتوافرة في السوق المحلية. [9].

4. طرائق البحث:

تم الاعتماد في هذا البحث على الطرق العددية (النمذجة العددية)، باستخدام برنامج نمذجة ومحاكاة معتمد عالمياً من معظم الشركات والمؤسسات البحثية، وهو برنامج انسيس ANSYS بالإضافة لسيرفراته، وذلك لإجراء نمذجة حرارية للتصاميم المدروسة، ومن أجل تصميم النماذج هندسياً فقد تم الاعتماد على برنامج سوليد وركس SOLID WORKS لهذا الغرض.

1.4.افتراضات الحل

تم في البداية افتراض بعض الشـــروط، واخذها بعين الاعتبار من أجل صـــحة اجراء النمذجة والبدء بالحل، وهي:

افتراضات تصميمية:

تم تصميم النماذج بالاعتماد على الفرضيات التالية:

1- شكل مقطع الفجوات هو بيضوي.

2-الأبعاد الخارجية لجميع العينات متساوية، وهي مشابهة لأبعاد الطوب المنتشرة في الأسواق المحلية، وهي (40X20X15 cm).

3- نسبة الفراغات الهوائية تساوي % 34 من مجمل حجم النموذج في جميع العينات.

4- عدد الفجوات الهوائية في جميع النماذج متساوي وهو 7 فجوات.

5- مساحة سطح مقاطع كل فجوة $31.5\ cm^2$ وحجمها $582.85\ cm^3$ متساوي في جميع النماذج.

افتراضات حرارية:

تم وضع بعض الافتراضات التي تتعلق بالأمور الحرارية وهي:

1- تم اجراء هذه الدراسة بالاعتماد على الشروط الحرارية التصميمية لمدينة حمص.

2- شكل انتقال الحرارة في النماذج هو بالتوصيل في الجزء المصمت، وبالحمل الحر ضمن الفجوات الهوائية.

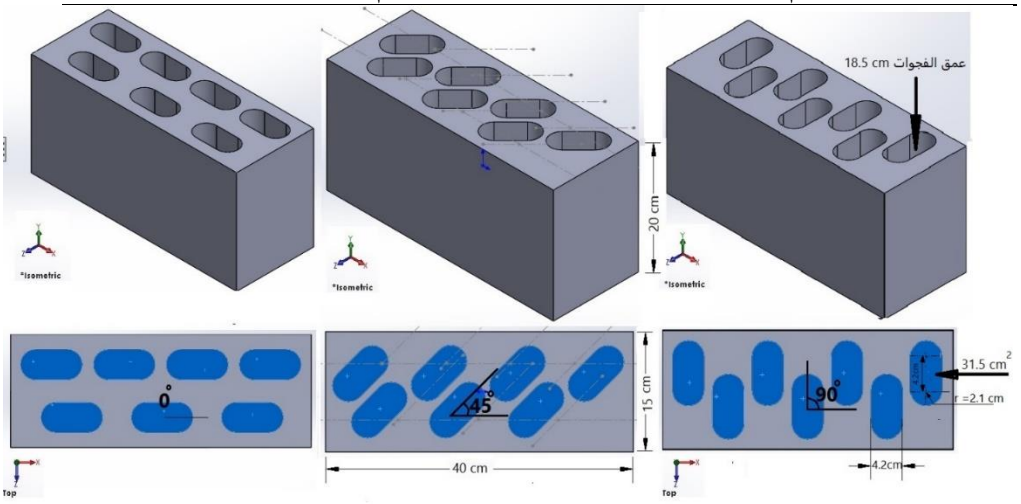
3- انتقال الحرارة يتم من الطرف ذو درجة الحرارة الأعلى إلى الطرف ذو دجة الحرارة الأدنى.

4- حالة انتقال الحرارة مستقرة.

2.4. مراحل العمل

1- اقتراح وتصميم النماذج:

تم تجهيز ستة نماذج هندسية (ثلاث عينات مكررة) وذلك بالاعتماد على برنامج سوليد وركس SOLID WORKS ، والنماذج المقترحة كانت على شكل طوب اسمنتي مفرغ، الفراغات كانت على شكل فجوات ذات مقطع بيضوي، كل نموذج كان يحتوي على سبعة فجوات، تشترك جميع النماذج في نفس مساحة المقطع ونفس الحجم، أما الأبعاد الخارجية للنماذج المقترحة فكانت 40X20X15 cm وهي ذات الأبعاد المعتمدة في معظم معامل تصنيع وإنتاج الطوب الاسمنتي، وكان الاختلاف بين النماذج هو زاوية دوران الفجوات الهوائية بالنسبة لطول الطوبة، حيث تم تصميم نموذجان لكل زاوية دوان، وكانت على النحو الآتي: نموذجان بزاوية دوران 0° ونموذجان بزاوية 45° والنموذجان الأخيران بزاوية 90° ، ويبين الشكل (3) النماذج المقترحة في الدراسة.



الشكل (3) يبين نماذج الطوب المقترحة التي تم تصميمها باستخدام برنامج SOLID WORKS

2- تصدير النماذج لبرنامج ANSYS

بعد الانتهاء من تصـــميم النماذج باســـتخدام برنامج SOLID WORKS ، يتم حفظ الملفات وتحضـيرها للمرحلة الثانية وهي تصـديرها لبرنامج النمذجة والمحاكاة، حيث تم حفظ كل ملف بصيغتين، الصيغة الأولى هي صيغة الحفظ التقليدية للبرنامج وهي (SLDPRT)، والثانية هي الصـيغة التي يمكن من خلالها تصـدير الملف لبرنامج النمذجة بسـهولة وهي (X_T)، حيث تم حفظ الملفات في مكان مخصـــص، ثم تم فتح أحد ســـيرفرات برنامج النمذجة ANSYS Workbench وتم اجراء اسـتيراد الملف المطلوب (Import)، وبذلك تم اسـتيراد الملف وتعريفه ببيئة العمل الجديدة، وهي بيئة عمل برنامج النمذجة المستخدم.

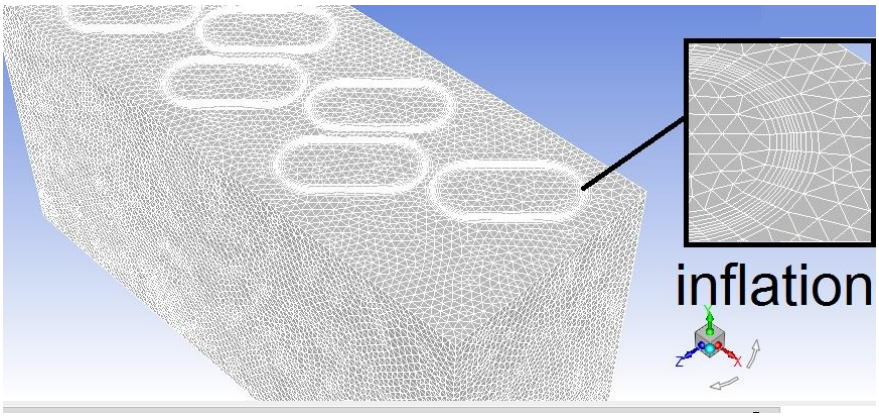
3- تقطيع النموذج باســـتخدام أداة التقطيع الشـــبكي (mesh) الخاصـــة ANSYS Workbench

تم تطبيق عملية التقطيع الشبكي للنماذج المدروسة باستخدام أداة التقطيع الشبكي (mesh) الخاصة بـ ANSYS Workbench. في هذه العملية تم تقطيع النموذج إلى خلايا

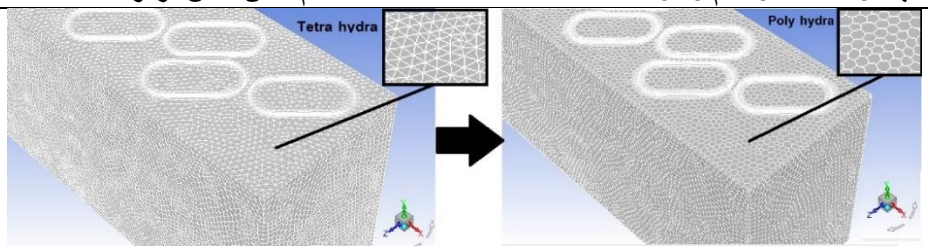
رباعية الوجوه من نوع (Tetra hydra)، ومن أجل تعزيز دقة الحسابات تم تطبيق تقنية التنعيم (inflation) على الطبقات القريبة من الجدار الملامس للمائع، وهو ما يساعد في تحسين دقة محاكاة التدرجات الحرارية وسرعات الجريان قرب السطح، وبالتالي تحسين موثوقية نتائج المحاكاة للمجالات الديناميكية الحرارية.

بعد إتمام عملية التقطيع الشبكي الأولية، تم تحويل خلايا (Tetra hydra) إلى خلايا (poly hydra) وذلك في عملية لاحقة باستخدام برنامج ANSYS Fluent. ويهدف هذا التحويل إلى تحسين جودة التقطيع الشبكي من خلال تقليل عدد الخلايا اللازمة لتغطية المجال المدروس مع الحفاظ على دقة النتائج. بالإضافة إلى ذلك، يوفر هذا النوع من الخلايا (poly hydra) استقراراً أكبر وأداءً محسناً في العمليات الحسابية مقارنة بالخلايا التقليدية ذات الأوجه الرباعية (Tetra hydra)، مما يؤدي إلى تقليل الوقت اللازم لإتمام الحسابات وتحسين الكفاءة العددية.

يوضح الشكل (4) عملية تقطيع أحد النماذج المدروسة بالإضافة لعملية التنعيم التي جرت بالقرب من الجدار الملامس للمائع، كما يوضح الشكل (5) عملية تحويل الخلايا من نوع (Tetra hydra) إلى (poly hydra).



الشكل (4) عملية تقطيع أحد النماذج المدروسة بالإضافة للتنعيم بالقرب من الجدار الملامس للمائع



الشكل (5) عملية تحويل الخلايا من نوع (Tetra hydra) إلى (poly hydra)

4- تحديد طريقة الحل:

من أجل تحديد طريقة الحل يجب معرفة طريقة انتقال الحرارة عبر النماذج المدروسة، حيث تم اعتبار أن انتقال الحرارة في الجزء الصلب يحصل بالتوصيل الحراري، أم في الفجوات الهوائية فيتم انتقال الحرارة بالحمل الحر.

تم اعتماد المعادلات الرياضية المستخدمة في جميع برامج النمذجة العددية، حيث يعتمد برنامج النمذجة عليها بشكل أساسي لإيجاد الحلول وهي [9]:

1- مبدأ حفظ الكتلة (معادلة الاستمرار):

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

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

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

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

على المحور X

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

على المحور Y

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

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

على المحور Z

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

μ: اللزوجة الحركية m^2/Sec

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

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

P: الضغط Pa.

3- مبدأ حفظ الطاقة (معادلة الطاقة):

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

$\frac{\lambda}{Cp.\rho}$: يمثل هذا الحد الانتشارية الحرارية m^2/s .

λ: معامل التوصيل الحراري W/m.K

Cp: السعة الحرارية J/kg.K

ρ: الكثافة kg/m^3

تم دراسة الحمل الحر ضمن الفجوات الهوائية بالاعتماد على معادلة كمية الحركة على المحور Y والمذكور سابقاً وهي:

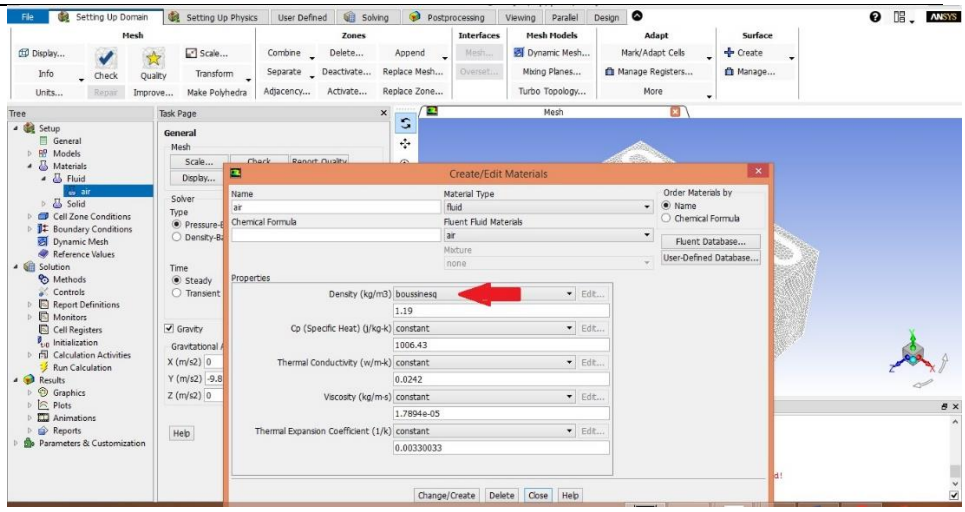
على المحور Y

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

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

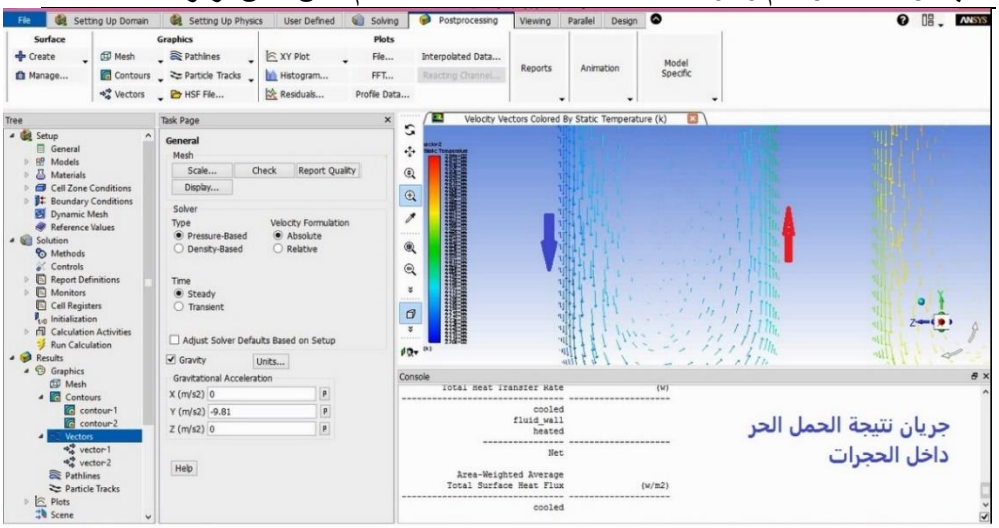
إن الحد الأيمن من المعادلة هو المسؤول عن الحل بالحمل الحر، وهو ضمن نموذج حل يدعى boussinesq يعتمده برنامج الأنسيس لحلول الحمل الحر، لأن الحمل الحر ناتج عن وجود فرق في الكثافات ووجود قوى الطفو الناتجة عن وجود فرق في الكثافات، وإن نموذج boussinesq يربط تغيرات الكثافة مع تغيرات درجة الحرارة على المحور الموجودة عليه الجاذبية g وهو المحور Y ، أما المحاور التي ليس لها علاقة بالجاذبية لا تدخل بالموضوع، لأن حركة الهواء بالحمل الحر الناتجة عن فرق الكثافات وتكون ضمن الحجرة الهوائية وفق المحور Y وتلعب الجاذبية دوراً ضمن هذا المحور.

ويبين الشكل (6) خيار النموذج boussinesq حيث يكون هذا النموذج موجود بشكل افتراضي ما لم يتم تبديل طريقة الحل واستخدام نموذج حل آخر (في حال وجود احمال قسرية على سبيل المثال).



الشكل (6) يبين ضبط خيار نموذج الحل boussinesq

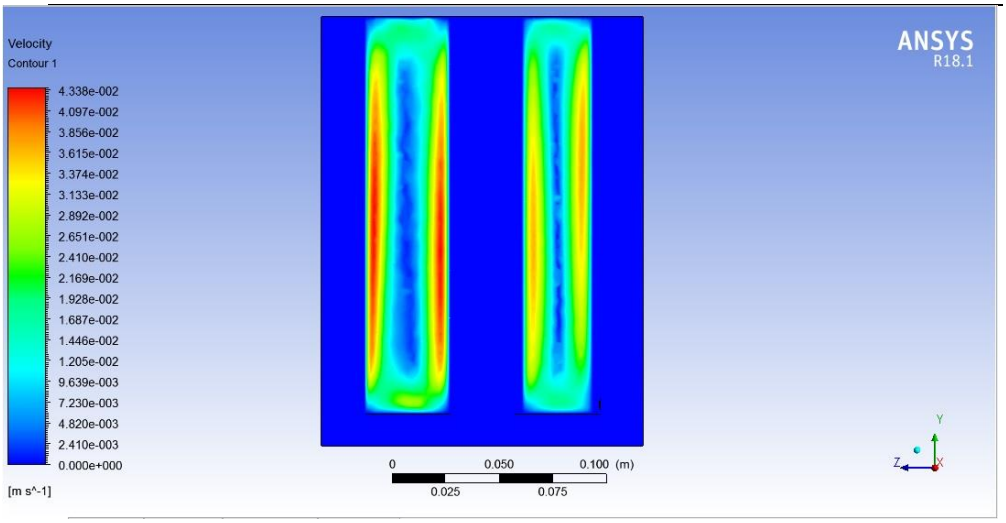
يحدث جريان للهواء داخل الفجوات الهوائية ضـمن الطوب، ويكون الجريان نتيجة فرق كثافات الهواء الناتج عن فرق درجات الحرارة في الهواء ضـمن الفجوات، فيتحرك الهواء السـاخن باتجاه الأعلى وفي ذات الوقت يتحرك الهواء البارد باتجاه بالأسـفل (في الجهة المقابلة ضـمن الفجوة) وبذلك يتشكل لدينا تيارات هوائية ناتجة عن حركة الهواء بالحمل الحر، ويبين الشكل (7) تيارات الحمل الحر، وتدل ألوان الأسهم على درجة حرارة التيار الهوائي ضمن الفجوات.



الشكل (7) يبين حركة الهواء داخل الفجوات نتيجة تيارات الحمل الحر

نلاحظ من الشكل أن الأسهم ذات درجات الحرارة الأعلى تتجه نحو الأعلى، والأسهم الأبرد تتجه نحو الأسفل، مشكلةً بذلك تياراً هوائياً ضمن الفجوة ناتج عن حركة الهواء بالحمل الحر.

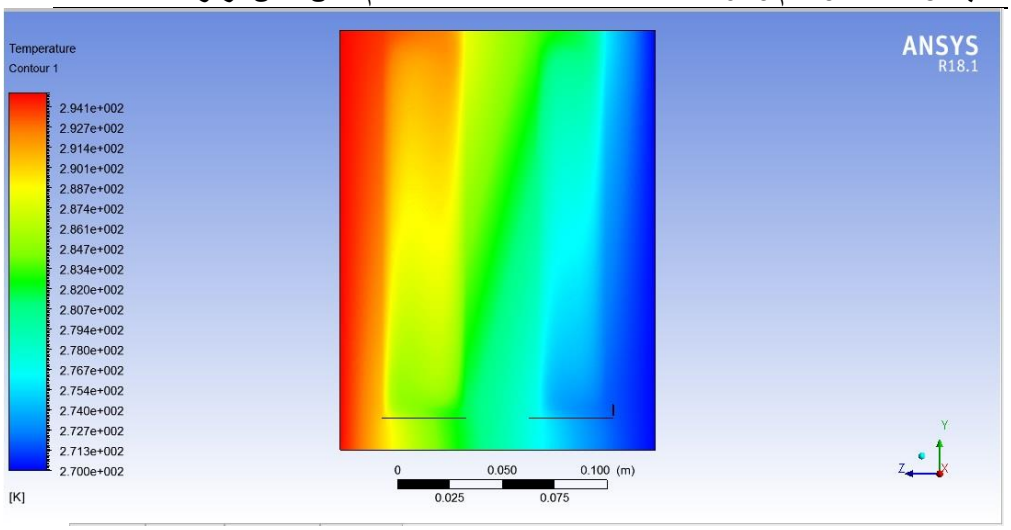
كما يبين الشكل (8) مخطط سرعة جريان الهواء ضمن مقطع الطوب الذي يحتوي على فجوات زاوية دورانها 0° والمدروسة في شروط فصل الشتاء، حيث تدل الألوان على سرعة جريان الهواء ضمن الفجوات.



الشكل (8) يبين مخطط سرعة جريان الهواء في مقطع طوب زاوية دوران فجواته 0° والمدروسة في شروط فصل الشتاء

نلاحظ من الشكل أن سرعة حركة الهواء داخل الفجوات تزداد كلما ابتعدت من المركز، وتتناقص السرعة كلما اقتربت منه حتى تصبح شبه معدومة في منتصف الفجوة، هذا يعني أن شكل الجريان هو محيطي بالقرب من جدران الفجوات الهوائية.

يبين لنا الشكل (9) التدرج الحراري ضمن مقطع الطوب الذي يحتوي على فجوات زاوية دورانها 0° والمدروسة في شروط فصل الشتاء، حيث يدل التدرج اللوني على تغيير درجة الحرارة.



الشكل (9) يبين التدرج الحراري ضمن مقطع الطوب الذي يحتوي على فجوات زاوية دورانها 0° والمدروسة في شروط فصل الشتاء

نلاحظ من الشكل (9) أن درجات الحرارة ضمن الجزء العلوي من الفجوات أعلى منها في الجزء السفلي، وهذا نتيجة تيارات الحمل الحر التي تعمل على رفع الهواء الساخن إلى الأعلى نتيجة فرق الكثافة.

5- تحديد خصائص المواد

بعد الانتهاء من عملية تقطيع النموذج تم حفظ النموذج بصيغتين الأولى صيغة (mesh) والثانية صيغة Fluent تمهيداً لتصديره إلى سيرفر آخر من سيرفرات برنامج ANSYS، حيث تم تصدير النموذج إلى برنامج ANSYS Fluent من ثم تحويل خلاياه إلى poly hydra كما ذكرنا في الخطوة السابقة، تم بعد ذلك ضبط خصائص المواد المكونة للطوب، والمواد هي الجزء الصلب من الطوب (خلطة الطوب الاسمنتية)، والهواء الموجود داخل الفجوات.

تم الاعتماد في تحديد خواص الجزء الصلب على نتائج دراسة تجريبية سابقة تم فيها تحديد الخواص بشكل تجريبي بالاعتماد على خلطات الطوب الخاصة بالسوق المحلية [9]، فتم وضع

قيمة لمعامل التوصيل الحراري بلغت 0.5101 W/m.K وقيمة الكثافة بلغت 1667.58 kg/m^3 وبلغت السعة الحرارية التي تم اعتمادها 1022 J/kg.K، أما خصائص الهواء فقد تم وضع قيم خاصة بفصل الصيف وأخرى خاصة بفصل الشتاء بما يتوافق مع أجواء مدينة حمص السورية (وفقاً لكود العزل الحراري السوري) وفيه درجة الحرارة التصميمية في فصل الصيف 38°C وفي فصل الشتاء 3°C− أما درجات حرارة الارتياح الحراري فهي 24−25°C صيفاً 22°C ، فتم وضع معامل تمدد حجمي بلغ $3.3X10^{-3}$ صيفاً و $3.54X10^{-3}$ شتاءً، وكثافة ثابتة بلغت 1.19 kg/m^3 ، أما باقي الخصائص فيقوم البرنامج باختيارها بشكل تلقائي وفقاً لعملية النمذجة الحاصلة.

6- تحديد الشروط الحدية

تم تحديد الشروط الحدية في عملية النمذجة الحالية، وهي درجات الحرارة التشغيلية في الصيف والشتاء، حيث كانت درجة الحرارة التشغيلية في فصل الصيف 304 K وفي فصل الشتاء282.5 K ، وتم أيضاً تحديد درجات الحرارة المعتمدة بين طرفي الطوب المدروس في فصلي الشتاء والصيف، ففي فصل الشتاء، الشروط الحدية هي درجة حرارة الارتياح الحراري داخل المبنى وهي 22 ° C ، ودرجة الحرارة التصميمية في فصل الشتاء في مدينة حمص وهي 3 ° C- ، أما في فصل الصيف فدرجة حرارة الارتياح الحراري داخل المبنى 24 ° C ، ودرجة الحرارة التصميمية هي 38 ° C .

الجدول (2) يبين الشروط الحدية المستخدمة في النمذجة

الموافقة لظروف مدينة حمص وفقاً لكود العزل الحراري السوري [10]

الفصل	درجة الحرارة الداخلية [°C]	درجة الحرارة الخارجية [°C]
الصيف	24	38
الشتاء	22	−3

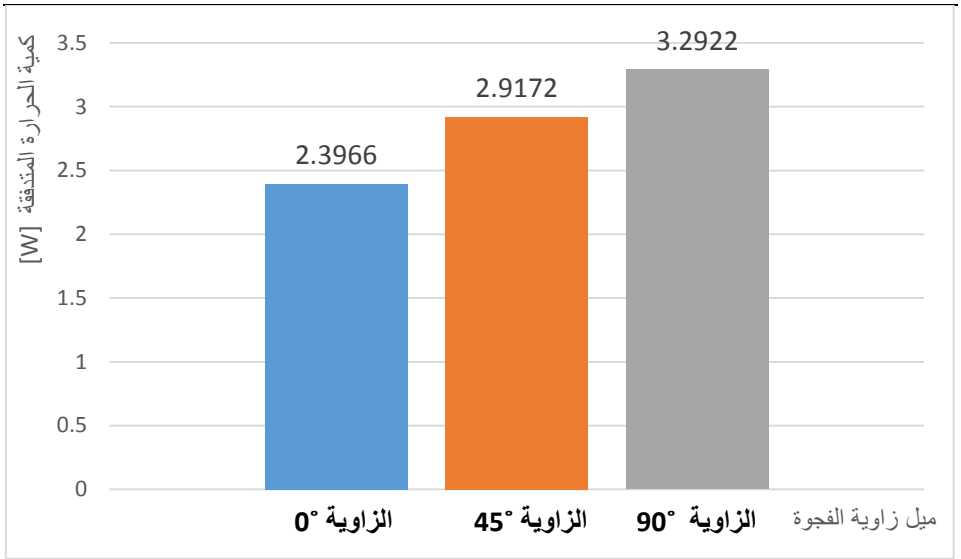
7- البدء بإجراء الحل والانتظار حتى الوصول إلى تقارب مناسب

بعد استكمال كامل اعدادات البرنامج وتحديد طريقة الحل وخصائص المواد والشروط الحدية، تم الانتقال إلى تبويب الحل والضغط على الزر الخاص بالبدء بالحل وذلك بعد تحديد

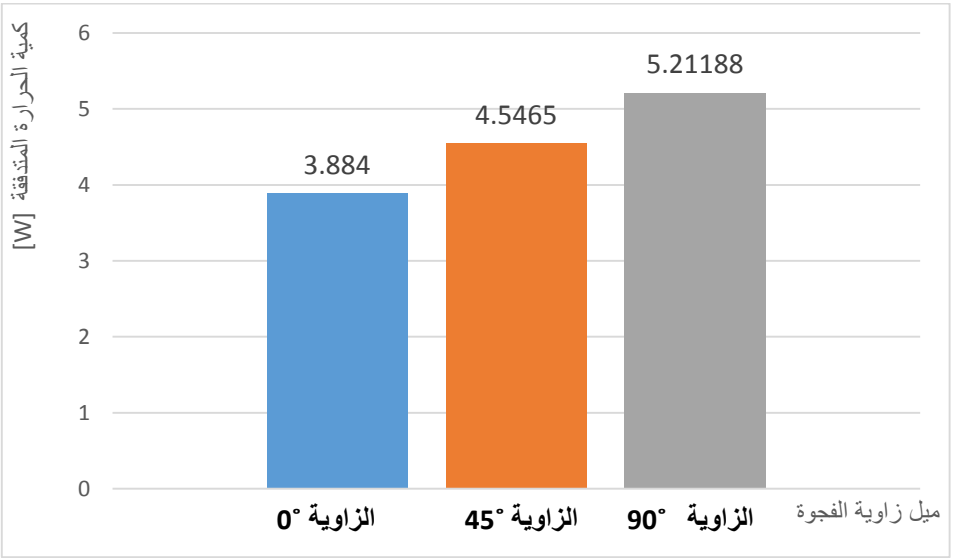
عدد الحلول، حيث استمرت عملية النمذجة فترة زمنية طويلة لكل نموذج مدروس حتى الوصول إلى تقارب مقبول، وتم الوصـــول إلى التقارب المطلوب وهو من مرتبة 10^{-14} في معادلة الطاقة والوصول لمرتبة 10^{-12} في معادلة الاستمرار ولمرتبة 10^{-12} في معادلات كمية الحركة، ويعتبر هذا التقارب جيد ومقبول في حلول النمذجة الحرارية. كُررت هذه العملية على كل نموذج من النماذج المدروسة في فصلي الصيف والشتاء، أي تمت هذه الإجراءات ستة مرات.

5. النتائج والمناقشة:

بعد الانتهاء من عملية النمذجة لجميع النماذج المدروســة، تم التأكد من صــحة الحل من خلال قيم التقاربات وقيمة توازن الطاقة، من ثم تم النظر إلى التدفقات الحرارية لجميع النماذج المدروسة في فصلي الصيف والشتاء، والتي تم الاعتماد عليها في تقييم كل نموذج، فتم تحديد كمية الحرارة العابرة لكل نموذج بشــكل مطلق، وتم تحديدها بالنســبة لواحدة المتر المربع، وذلك في فصلي الصيف والشتاء، حيث يعرض الشكلين (10) و (11) التدفق الحراري عبر كل نموذج في فصلي الصيف والشتاء على التوالي.

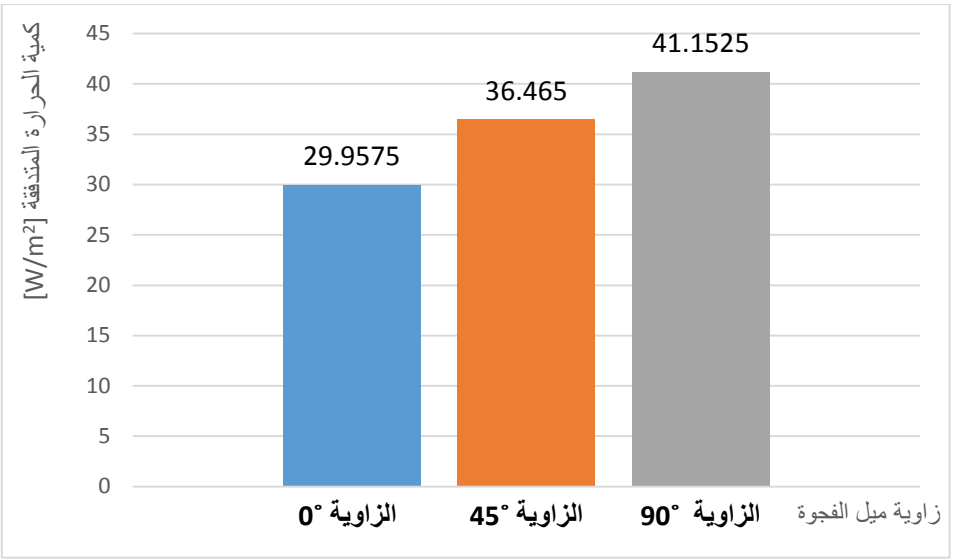


الشكل (10) يبين التدفق الحراري الحاصل عبر كل نموذج في فصل الصيف

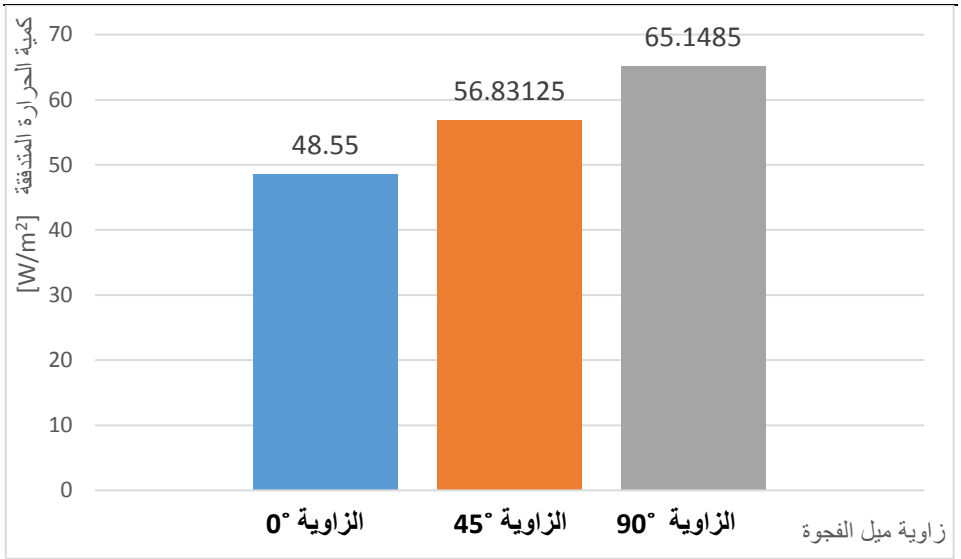


الشكل (11) يبين التدفق الحراري الحاصل عبر كل نموذج في فصل الشتاء

يبين الشكلين (12) و (13) كمية الحرارة العابرة للمتر المربع الواحد للنماذج المدروسة في فصلي الصيف والشتاء على التوالي.



الشكل (12) يبين التدفق الحراري الحاصل بالنسبة للمتر المربع الواحد في فصل الصيف



الشكل (13) يبين التدفق الحراري الحاصل بالنسبة للمتر المربع الواحد في فصل الشتاء

أظهرت نتائج النمذجة الحرارية للنماذج المدروسة، بأن الطوبة الاسمنتية ذات فجوات بزوايا ميل 45° يتدفق عبر طرفيها كمية حرارة تفوق تلك التي لها فجوات بزوايا ميل 0°، وأن الطوبة الاسمنتية ذات فجوات بزاوية ميل 90° يتدفق عبر طرفيها كمية حرارة تفوق كلاً من الطوب ذو زوايا الميل 45° و 0° وذلك في فصلي الشتاء والصيف، حيث بلغ التدفق الحراري عبر الطوب المدروس في فصل الصيف عبر كل نموذج 2.3966W و 2.9172W و 3.2922W للطوب ذو فجوات بزوايا ميل 0° و45° و 90° على الترتيب، كما بلغ ذلك التدفق في فصل الشتاء وبنفس الترتيب 3.884W و 4.5465W و 5.21188W ، وبذلك نجد بأن زاوية ميل 0° للفجوات تحقق أفضل أداء حراري من حيث عزلها للحرارة، لأن الحرارة المتدفقة عبر طرفيها هي الأقل من بين النماذج المدروسة، وتليها الطوبة ذات الفجوات المائلة بالزاوية 45° من ثم تأتي الطوبة ذات الفجوات بزاوية ميل 90° .

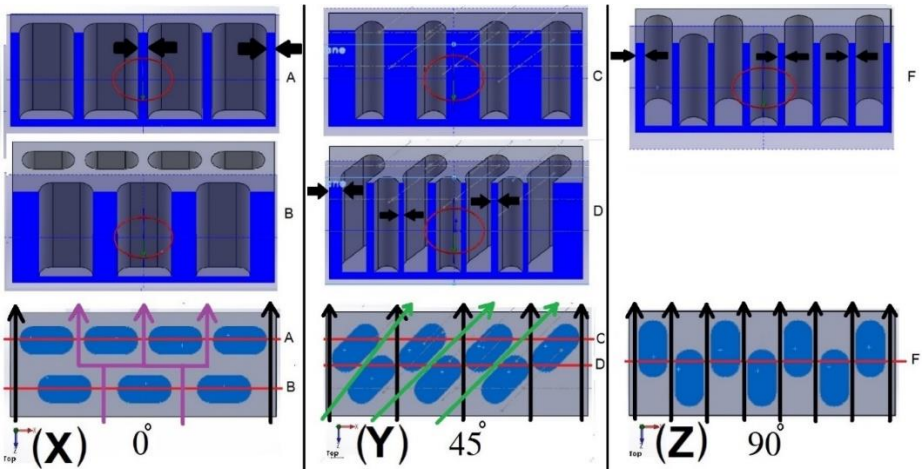
تم الاعتماد على عدة عوامل من أجل تحليل النتائج، وإيجاد تفسيرات لقيم التدفقات الحرارية للنماذج المدروسة، ومن أهم تلك العوامل:

1- عدد الأعصاب التي تنقل الحرارة بالتوصيل بين طرفي كل نموذج.

2- طول وشكل مسار انتقال الحرارة بالتوصيل ضمن الأعصاب التي تقوم بتوصيل الحرارة.

3- عدد صفوف الفجوات الهوائية بين طرفي النموذج.

4- مجموع مساحات مقاطع الأعصاب الكلية التي تنتقل عبرها الحرارة بالتوصيل بين طرفي النماذج المدروسة.



الشكل (14) يبين مقاطع عرضية مأخوذة للنماذج المدروسة، ومسارات انتقال الحرارة في كل نموذج

تم أخذ مقاطع في كل نموذج مدروس، وذلك من أجل سهولة فهم وتحليل العوامل المذكورة.

نجد من خلال الشكل X (14) أن عدد الأعصاب التي تقوم بتوصيل الحرارة بين طرفي الطوب في النموذج ذو فجوات مائلة بزاوية 0° ومن خلال رسم مساراتها هو خمسة أعصاب، حيث تنتقل الحرارة إلى الطرف الثاني عبر هذه الأعصاب، بينما نجد أن عدد الأعصاب في النموذج ذو الفجوات المائلة بزاوية 45° والمبين بالشكل Y (14) هو ثمانية أعصاب، خمسة منها مباشرة وثلاثة مائلة، وتم تحديدها من خلال رسم مسارات تلك الأعصاب، بينما بلغ عدد الأعصاب في النموذج ذو زوايا ميل فجوات 90° درجة ثمانية أعصاب جميعها مباشرة. من خلال دراسة عامل عدد الأعصاب التي تقوم بنقل الحرارة بالتوصيل نجدا بأن أفضل نموذج يحقق أكبر مقاومة حرارية هو النموذج ذو زاوية ميل فجوات 0° لأن عدد أعصابه هو الأقل وهو خمس أعصاب،

يليه النموذج ذو الفجوات بزوايا دوران 45º حيث يمتلك ثمانية أعصاب، ويليه النموذج ذو الفجوات المائلة بزاوية 90º والذي يملك ثمان أعصاب، ومن خلال ملاحظة أن عدد الأعصاب في النموذج الثاني والثالث متساويان حيث يملك كل منهما ثمانية أعصاب إلا أن النموذج ذو الفجوات بزاوية 45º فيه ثلاث أعصاب مائلة وهذا يعطيه أفضلية على النموذج الثالث ذو الفجوات المائلة بزاوية 90º .

أما من ناحية طول مسار انتقال الحرارة، فبالنظر للشكل (14) يمكن القول أن النموذج الذي زوايا دوران فجواته 0º درجة هو الأفضل من هذه الناحية، لأن مسارات انتقال الحرارة فيه هي الأطول، وشكل مساراته المتعرجة يعمل على تشتيت الحرارة المنتقلة بالتوصيل وتوزيعها بعدة اتجاهات وفقاً لاتجاهات التعرج في المسار، بالإضافة إلى أن الحرارة المنتقلة بالتوصيل سيذهب قسم كبير منها ويصطدم بجدار الفجوات الهوائية ليتحول انتقال الحرارة لشكل ثاني ضمن الفجوة الهوائية (بالحمل الحر)، وبذلك يتولد لدينا مقاومة حرارية إضافية هي مقاومة الهواء لانتقال الحرارة للطرف الاخر ضمن الفجوات الهوائية. يأتي في المرتبة الثانية من هذه الناحية هو النموذج ذو فجوات بزوايا دوران 45º درجة، حيث تكون فيه المسارات طويلة ومائلة بالنسبة لاتجاه انتقال الحرارة، وهذا يعمل على تشتيت الحرارة المنتقلة على طرفي العصب الذي تمر منه بسبب ميوله عن اتجاه انتقال الحرارة الفعلي، كما يعمل على نقل جزء كبير من الحرارة إلى جدران الفجوات وبالتالي إلى داخل الفجوات ليتحول انتقال الحرارة إلى شكل ثاني من أشكال انتقال الحرارة (بالحمل الحر)، وإن وجود الهواء داخل الفجوات يعمل على تشكيل مقاومة حرارية إضافية. وجاء في المرتبة الثالثة والأخيرة من هذه الناحية هو النموذج الذي يحتوي على فجوات زوايا دورانها 90º ، حيث تكون فيه مسارات انتقال الحرارة مباشرة وهي الأقصر.

بالنسبة لعدد صفوف الفجوات الهوائية للنماذج المدروسة، فيظهر لنا مباشرةً من خلال الشكل (14) أن النموذج الأول ذو فجوات زاوية دورانها 0º يمتلك صفين من الفجوات الهوائية وهذا يعمل على مضاعفة طبقات الهواء التي تزيد من المقاومة الحرارية للنموذج ككل، على خلاف النموذجين الباقيين اللذان يملك كل منهما صف فجوات واحد، يكون هذا الصف مائلاً في

النموذج الثاني ذو فجوات مائلة بالزاوية°45 ، بينما يكون بشكل متراصف مع وجود تقدم وتأخر في الفجوات في النموذج ذو الفجوات المائلة بزاوية °90 درجة، وبالتالي فإن النموذج الأول هو الأفضل والذي يمتلك صفين من الفجوات الهوائية.

تم حساب مجموع مساحات مقاطع الأعصاب الكلية التي تنتقل عبرها الحرارة بالتوصيل في كل نموذج، وهذه المساحة تعطينا تصوراً واضحاً لأي النماذج الذي يتم عبره انتقال أكبر كمية حرارة بالتوصيل. فبلغت في النموذج الأول $0.0208\ m^2$ ، وبلغت هذه المساحة في النموذج الثاني $0.027275\ m^2$ ، وبلغت المساحة في النموذج الثالث $0.0282\ m^2$ ، أي أن النموذج الأول هو النموذج الأفضل من هذه الناحية، وهذا ما يعطيه تفوقاً من ناحية مقاومته لانتقال الحرارة.

بالمحصلة ومن خلال دراسة العوامل المذكورة نجد أن تفوق النموذج الأول ذو فجوات مائلة بزاوية °0 أمر طبيعي وذلك لتفوقه على باقي النماذج من خلال العوامل الهندسية التي تم دراستها.

تم حساب معامل توصيل الحرارة المكافئ (يتم اعتبار انتقال الحرارة للجملة كاملةً بالتوصيل) والمقاومة الحرارية للنماذج المدروسة بالاعتماد على نتائج النمذجة الحرارية (التدفق الحراري لكل نموذج)، وعلى العلاقات التالية:

- **المقاومة الحرارية.**

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\Delta T}{Q}$$

حيث:

Q : التدفق الحراري عبر المتر المربع الواحد و تقدر بـ $[W/m^2]$

ΔT : فرق درجات الحرارة بين طرفي الجدار وتقدر بـ [K]

R : المقاومة الحرارية وتقدر بـ $[m^2.K/W]$

تم ترتيب النتائج في الجدول (3)

الجدول (3) يبين معاملات التوصيل الحراري المكافئة والمقاومات الحرارية للنماذج المدروسة

الرقم النموذج	زاوية ميل الفجوة	النمذجة في فصل	التدفق الحراري $[w/m^2]$	المقاومة الحرارية للنموذج $[m^2.K/W]$
1	0°	الصيف	29.9575	0.4673
		الشتاء	48.55	0.5149
2	45°	الصيف	36.465	0.3839
		الشتاء	56.83125	0.4399
3	90°	الصيف	41.1525	0.3402
		الشتاء	65.1485	0.3837

نلاحظ من خلال نتائج الجدول (3) أن قيمة معامل التوصـــيل الحراري المكافئ لأي نموذج في فصل الصيف تختلف عنها في فصل الشتاء بالرغم من أن معامل التوصيل الحراري للمادة الصلبة (المادة البيتونية) ثابتة، على سبيل المثال في النموذج ذو فجوات مائلة بزاوية 90° ، فنلاحظ قيمة معامل التوصـيل الحراري المكافئ في فصـل الصـيف 0.4409 W/m.K بينما كانت في فصـــل الشـــتاء 0.3909 W/m.K . ونلاحظ أيضـــاً أن قيمة المقاومة الحرارية لأي نموذج من النماذج المدروسة في فصل الصيف تختلف عن قيمتها في الفصل الشتاء، وذلك مع المحافظة على خواص المادة الصلبة المكونة للطوب.

6. الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال ما تم تحقيقه بالبحث يمكن صياغة بعض الاستنتاجات على النحو الآتي:

1- أدى تغيّر زاوية دوران الفجوات الهوائية ذات الشكل البيضوي في الطوب الاسمنتي المفرغ، إلى تغيّر في قيم التدفق الحراري ومعامل التوصـــيل الحراري المكافئ والمقاومة الحرارية لهذا الطوب.

2- تفوق النموذج الأول ذو الفجوات المائلة بزاوية 0° درجة على النموذجين الثاني والثالث التي لها زوايا ميل فجوات 45° و 90° درجة من حيث التدفق الحراري، حيث كان التدفق الحراري عبر النموذج الأول $29.9575W/m^2$ صيفاً و $48.55W/m^2$ شتاءً، بينما كان التدفق الحراري عبر النموذج الثاني $36.465W/m^2$ صيفاً و $56.83W/m^2$ شتاءً، وكانت في النموذج الثالث $41.1525W/m^2$ صيفاً و $65.1485W/m^2$ شتاءً، وبالتالي النموذج الأول الأفضل الذي فيه التدفقات الحرارية أقل.

3- أظهرت النتائج أن زيادة زاوية دوران الفجوات من 0° إلى 45° ثم إلى 90° تؤدي إلى زيادة تدريجية في كمية الحرارة المنتقلة بين طرفي الطوبة، سواء في فصل الصيف أو الشتاء، وهو ما يعكس تراجع الكفاءة الحرارية مع زيادة زاوية الدوران.

4- لعب انتقال الحرارة بالحمل دوراً أساسياً في عملية انتقال الحرارة الكلية ضمن النماذج المدروسة، حيث أن تغيير زوايا دوران الفجوات الهوائية يؤدي إلى تغيير سلوك انتقال الحرارة بالحمل.

5- أدى تغيير الشروط الحدية والعوامل التشغيلية في عملية النمذجة الحرارية لكل النماذج المدروسة إلى تغيير قيم معاملات التوصيل الحراري المكافئة بين الصيف والشتاء، بالرغم من ثبات معامل التوصيل الحراري للجزء الصلب، مما أدى إلى تغيير المقاومة الحرارية للنموذج ذاته بين الصيف والشتاء، وهذا يبين الدور الهام لعملية انتقال الحرارة بالحمل في النماذج المدروسة.

6- بناءً على ما سبق، يمكن اعتبار التحكم بزاوية دوران الفجوات الهوائية أحد الحلول الفعّالة والبسيطة لتحسين الكفاءة الطاقية للطوب الإسمنتي المفرغ، دون الحاجة إلى تغيير المواد أو زيادة التكاليف الإنتاجية، الأمر الذي يجعله مناسباً للتطبيق في الأبنية السكنية ضمن الظروف المناخية المحلية.

التوصيات:

من خلال ما سبق يمكن أن نوصي بما يلي:

1- استخدام النموذج ذو فجوات بزاوية دوران 0° درجة والذي يحقق أفضل أداء حراري من ناحية مقاومته الحرارية.

2- ضرورة إجراء دراسات من هذا النوع مع الاهتمام بتحسين المقاومة الحرارية للمادة الصلبة المكونة للطوب.

3- ضرورة اجراء دراسات تهدف للتأكد من المقاومة الميكانيكية الجيدة للنماذج المقترحة.

7. المراجع

1- **Statistical Review of World Energy (2025)** - *Energy Institute, https://ourworldindata.org/grapher/global-energy-consumption-source?time=1950..2024*

2. Ritchie H, Rosado P, and Roser M. 2025- **Global Energy Databases-** *https://ourworldindata.org/energy.*

3. Al-Auqeily W. and Al-Yousif I**.,** 2015- **Reduction cooling load using intelligent envelope system.** *Journal of the Technological University of Engineering Sciences, 7(2), page 154-175* .

4. Qarmo A et al. 2016- **Determination of Mechanical and Thermal Characteristics of some Waste Materials in Order to Be Used for Thermal Insulation Purposes.** *Research Journal of Aleppo University, Engineering Science Series (2), 2016.129.*

5. Giama E and Papadopoulos A**.,** 2007- **Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building.** *Journal of Building and Environment,* 42(5), 2178-2187.

6. Urban B , 2011 - **Arranging Insulation For Better Thermal Resistance In Concrete And Masonry Wall Systems.** *Nordic Symposium on Building Physics, Vol.3.*

7. Alghamdi A and Alharthi H. 2017 - **Multiscale 3D Finite-Element Modeling Of The Thermal Conductivity Of Clay Brick Walls**. *Construction and Building Materials, Vol.157, Page 1-9.*

8. Wang Q and Zhang Y. 2017 - **Influence Of Hollow Block's Structural Configuration On The Thermal Characteristics Of Hollow Block Wall**. *Procedia Engineering Vol 205, Page 2341-2348.*

9. Qarmo A. et al 2021- **The study of improving thermal performance of bricks manufactured from the recycling of rubble.** *PhD thesis, Homs University.*

10. Syrian Arab Code for the design and implementation of installations in reinforced concrete.

كشف الغش في الامتحانات عبر الإنترنت بناءً على تحليل الفيديو باستخدام التعلم العميق

طالبة الدراسات العليا: م. بشرى السطلي ماجستير علوم الويب – الجامعة الافتراضية

اشراف الدكتور: محمد بسام الكردي

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نظام ذكي لرصد حالات الغش في الامتحانات الإلكترونية بالاعتماد على تحليل الفيديو المباشر باستخدام تقنيات التعلم العميق والرؤية الحاسوبية. تم تطوير ثلاثة نماذج تصنيفية مستقلة تختلف في نوع المدخلات والبنية المعمارية، ثم تحويلها إلى صيغة ONNX (Open Neural Network Exchange) لضمان قابلية التشغيل عبر بيئات مختلفة.

ولتحقيق استجابة زمنية فورية، نُشر النظام عبر واجهة ويب تفاعلية متعددة المسالك (Multithreading)، مع دمج وحدات إضافية لكشف الكائنات المشبوهة باستخدام YOLOv9بعد تدريبها على قاعدة بيانات خاصة بالامتحانات مما حسّن دقة الكشف والتعرف على سلوكيات الغش. كما تم تتبع حركة الفم عبر مؤشر MAR (Mouth Aspect Ratio) لرصد إذا كان الطالب يتحدث أثناء الامتحان.

أظهرت النتائج تفوق النموذج الهجين على النماذج الأخرى محققاً دقة تصنيف بلغت 98.8% مع غياب كامل للأخطاء السلبية (False Negative=0) مما يعزز موثوقية النظام في بيئات الامتحانات الحساسة ويدعم اعتماده في البيئات التعليمية الرقمية.

الكلمات المفتاحية:

كشف الغش، الامتحانات عبر الانترنت، تحليل الفيديو، YOLOv9، مؤشر نسبة أبعاد الفم MAR

Online exams cheating detection based on video analysis using deep learning

Abstract

This study aims to develop of an intelligent system for detecting cheating in online examinations through real-time video stream analysis using deep learning and computer vision techniques. Three independent classification models were developed, each differing in input types and architectural structures, and subsequently converted into the ONNX (Open Neural Network Exchange) format to ensure cross-platform compatibility.

To achieve real-time responsiveness, the system was deployed through a multi-threaded interactive web-based interface. Additional modules were integrated to enhance functionality. These include suspicious objects detection using YOLOv9, retrained on a custom examination dataset to improve detection accuracy and better identify cheating behaviours, as well as mouth movement tracking based on the Mouth Aspect Ratio (MAR) indicator to determine whether students were speaking during the exam.

The experimental results demonstrated that the hybrid model outperformed the other models, achieving a classification accuracy of 98.8% with a complete absence of false negatives. These findings reinforce the reliability of the system in sensitive examination settings and support its adoption in digital educational platforms.

Keywords

Cheating detection, Online exams, Video Analysis, YOLOv9, Mouth Aspect Ratio (MAR).

1. مقدّمة:

2. هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى تطوير نظام ذكي ومتكامل لرصد حالات الغش في الامتحانات الإلكترونية بالاعتماد على تقنيات التعلم العميق والرؤية الحاسوبية، وذلك من خلال تحقيق الأهداف التالية:

- **تطوير ثلاثة نماذج تصنيفية مستقلة** تختلف في نوع المدخلات والبنى المعمارية، تشمل نموذجاً يعتمد على السمات الهندسية المستخرجة من النقاط المرجعية للوجه، ونموذجاً يعتمد على الصورة الأصلية للوجه مدعوماً بآلية انتباه قنوي لاستخلاص السمات البصرية، إضافة إلى نموذج هجين متعدد المسارات يجمع بين المدخلين.
- **دمج وحدات إضافية داعمة** تشمل كشف الكائنات المشبوهة (مثل وجود أشخاص، هواتف، كتب) باستخدام YOLOv9 وتتبع حركة الفم باستخدام مؤشر نسبة أبعاد الفم (MAR) لرصد حالات التحدث غير المصرّح بها وحساب وتتبع اتجاه الرأس (Head Pose: Yaw/Pitch/Roll) لرصد حالات الانحراف غير الطبيعي أثناء الامتحان.
- **تقييم أداء النماذج وفق مقاييس معيارية** مثل الدقة (Accuracy) والاستدعاء (**Recall**)، وتحديد النموذج الأكثر فعالية في بيئات الامتحانات الحساسة مع التركيز على تقليل الأخطاء السلبية (False Negative) التي قد تؤثر على مصداقية النظام.
- **اختبار قابلية النظام للتطبيق العملي في بيئات تعليمية حقيقية** من خلال قياس زمن الاستجابة (Latency) ومعدل الإطارات في الثانية (FPS) لضمان ملاءمته للاستخدام الفعلي في الزمن الحقيقي.

وبناءً على ذلك يسعى هذا البحث إلى تعزيز النزاهة الأكاديمية من خلال توفير حل عملي وموثوق يحد من محاولات الغش ويدعم اعتماد البيئات التعليمية الرقمية مع قابلية التوسع والتخصيص بما يتناسب مع متطلبات المؤسسات التعليمية المختلفة.

3. دراسات مرجعيّة:

تزايد الاهتمام في السنوات الأخيرة بتطوير أنظمة ذكية لرصد حالات الغش في الامتحانات الإلكترونية نتيجة الانتشار الواسع للتعليم عن بُعد والاختبارات الرقمية. وقد تنوعت الدراسات في هذا المجال بين نماذج هندسية تعتمد على السمات الوجهية وأخرى بصرية تعتمد على الصور إضافة إلى نماذج هجينة تجمع بين أكثر من مصدر بيانات وأنظمة متكاملة تسعى إلى دمج وحدات متعددة في إطار واحد.

الدراسات الهندسية:

في دراسة [3] تم تطوير نظام لرصد السلوك غير الطبيعي في الامتحانات الإلكترونية باستخدام تحليل الفيديو عبر Mediapipeحيث تم تحويل النقاط المرجعية للوجه وتحويلها إلى متجه سمات هندسية مكون من 171 بُعداً باستخدام المسافات الاقليدية بين النقاط. وقد حقق النظام دقة بلغت 77.9% مع زمن استدلال منخفض جداً 0.01 ثانية لكل إطار، مما يتيح المعالجة في الزمن الحقيقي. ورغم سرعة النظام إلاّ أنّ دقته تبقى محدودة نسبياً ولا يتضمن وحدات داعمة مثل كشف الأغراض أو تتبع التحدث مما يحد من شموليته. بينما ركزت الدراسة [5] على التحقق من هوية الطالب باستخدام KNN وكشف الهاتف عبر YOLOV3 وتتبع العين باستخدام Mediapipe Iris وحققت دقة بلغت 93.9% في الكشف عن جميع أنواع الغش بمعدل FAR ثابت 5% ورغم أن الشبكة العصبونية الالتفافية CNN توفر دقة أعلى بكثير منKNN ، إلا أنه لم يتم استخدامها في هذا النظام بسبب متطلباته المحدودة مثل إضاءة جيدة في قاعة الامتحان ومسافة محددة بين الطالب والكاميرا مما يجعل KNN مناسبة للعمل ضمن هذه المتطلبات.

الدراسات البصرية:

اقترحت دراسة [4] بنية متعددة المراحل تشمل التحقق من الهوية باستخدام FaceNet وتتبع حركة الرأس عبر خوارزمية Lucas Kanade وتقدير اتجاه النظر باستخدام نموذج AAM

(Active Appearance Model)، وقد حقق النظام F1-Score=0.94 على بيانات مأخوذة من أكثر من 1000 جلسة امتحانية. ومع ذلك لم تقدم الدراسة تفاصيل دقيقة حول زمن المعالجة أو معدل الأخطاء السلبية، كما أنّ اعتمادها على خوارزميات متفرقة دون دمج ضمن نموذج موحد يحد من كفاءتها في الزمن الحقيقي. في المقابل أجرى [9] تحليلاً مقارناً شاملاً لمجموعة من نماذج التعلم العميق المطبقة في بيئات المراقبة الإلكترونية للامتحانات حيث تم اختبار نماذج مثل EfficientNet، ResNet، MobileNetV2 وYOLOv5 على مجموعتي بيانات متخصصتين OEP,OP وقد أظهرت النتائج أنّ نموذج EfficientNetB1 حقق أعلى دقة بلغت 94.59% على مجموعة بيانات OP بينما حقق YOLOv5 أداءً متميزاً بمعدل98.3%= mAP@0.5 كما حقق ResNet50-CBAM دقة بلغت 93.61% على مجموعة OEP. ورغم أن هذه الدراسة وفرت مؤشرات كمية دقيقة وأظهرت قوة النماذج في الكشف عن سلوكيات الغش، إلا أنها اقتصرت على المقارنة النظرية للأداء دون تقديم نظام متكامل قابل للتطبيق المباشر في بيئات امتحانية فعلية.

الدراسات الهجينة:

أظهرت دراسة [6] فعالية عالية في دمج البيانات المرئية والصوتية باستخدام الشبكات العصبونية الالتفافية (CNN) حيث حققت دقة بلغت 99.8% للكاميرا الأمامية و98.7% للكاميرا الخلفية. ورغم قوة الدمج بين المصادر المتعددة إلاّ أنّ النظام يعاني من تعقيد البنية والحاجة لموارد حسابية كبيرة، مع غياب تفاصيل دقيقة حول زمن المعالجة أو قدرة التوسع للتعامل مع عدد كبير من المستخدمين بشكل متزامن. أما دراسة [8] فقد أكدت على أهمية دمج تقنيات متعددة مثل Deep Learning وMachine Learning لتحقيق دقة أعلى وصلت إلى نحو 96%، إلاّ أنّ هذا الدمج زاد التعقيد الحسابي وصعّب التطبيق في الزمن الحقيقي، كما لم تُذكر تفاصيل عن زمن الاستجابة أو قدرة النظام على التوسع مما يحد من إمكانية تطبيقه في بيئات امتحانية واسعة النطاق. من ناحية أخرى طور [10] إطاراً هجيناً

يجمع بين YOLOv7 لكشف الأغراض وDeepFace للتعرف على الوجه ضمن تطبيق ويب تفاعلي في الزمن الحقيقي ويدعم تعدد الكاميرات والتوسع الافقي. وقد أظهر النظام دقة عالية مع زمن معالجة منخفض نسبياً. ورغم أنّ هذه الدراسة لا تستهدف كشف الغش في الامتحانات الإلكترونية بشكل مباشر، إلاّ أنها تقدم نموذجاً تقنياً متقدماً يمكن الاستفادة من بنيته في هذا المجال وخصوصاً فيما يتعلق بآليات التكامل بين وحدات الرؤية الحاسوبية والواجهات التفاعلية في بيئات تعليمية رقمية.

الأنظمة المتكاملة:

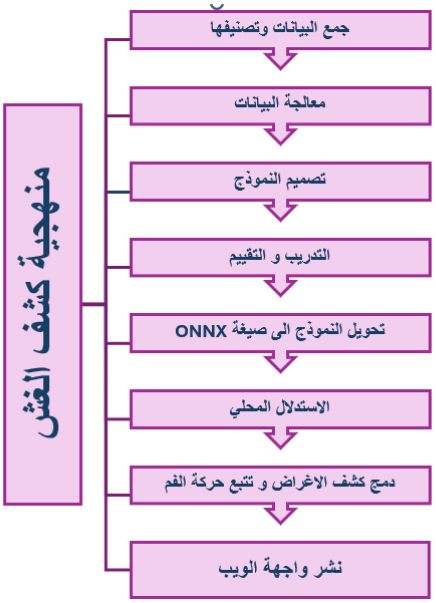
قدمت دراسة [7] نظاماً شاملاً يعتمد على YOLO لكشف الهواتف والكتب إضافة إلى تحليل النظر وحالة الفم. ركّز النظام على الاكتشاف المباشر للسلوكيات المشبوهة دون تصنيف الطلاب، ولم يقدم مؤشرات دقيقة للأداء (مثل الدقة أو زمن الاستجابة) مما يحد من إمكانية تقييم كفاءته بشكل كامل.

من خلال مراجعة الأدبيات يتضح أن أنظمة كشف الغش في الامتحانات الإلكترونية شهدت تطوراً ملحوظاً باستخدام تقنيات الذكاء الصنعي والرؤية الحاسوبية، حيث تنوعت بين نماذج تعتمد على السمات الهندسية وأخرى على الصور البصرية، إضافة إلى محاولات دمج البيانات المتعددة لتحقيق دقة أعلى. ورغم أنّ هذه الدراسات قدمت نتائج جيدة، إلا أنها مازالت تعاني من قيود واضحة مثل محدودية السمات المدخلة، غياب التكامل بين الوحدات المختلفة، الحاجة إلى موارد حسابية كبيرة، أو التركيز على المقارنة النظرية دون تقديم نظام متكامل قابل للتطبيق العملي في البيئات التعليمية. هذه الفجوات البحثية تبرز الحاجة إلى نظام شامل يجمع بين الدقة العالية والقدرة على العمل في الزمن الحقيقي مع قابلية التوسع والنشر في بيئات امتحانية فعلية. ومن هنا تأتي أهمية هذا البحث الذي يسعى إلى تقديم إطار عملي متكامل يعتمد على نموذج هجين يدمج بين المدخلات الهندسية والبصرية، ومدعوماً بوحدات إضافية مثل كشف الكائنات وتتبع حركة الفم، بما يعزز النزاهة الاكاديمية ويوفر حلاً موثوقاً وقابلاً للتطبيق في المؤسسات التعليمية الرقمية.

4. مواد وطرق البحث:

4.1 منهجية البحث:

تم تنفيذ هذه الدراسة وفق منهجية تجريبية تعتمد على تحليل الفيديو المباشر باستخدام نماذج تصنيفية مبنية على تقنيات التعلم العميق بالإضافة إلى وحدتين داعمتين: وحدة لكشف الأغراض المشبوهة باستخدام YOLOووحدة تتبع حركة الفم باستخدام مؤشرMAR نسبة أبعاد الفم. وقد شملت مراحل البحث جمع البيانات، المعالجة المسبقة، تصميم النماذج، تدريبها وتقييمها، تحويلها إلى صيغة قابلة للنشر، وأخيراً دمجها ضمن واجهة تشغيل تفاعلية تعمل في الزمن الحقيقي. تم التركيز على بناء نظام متكامل يجمع بين الدقة، الكفاءة الزمنية، والمرونة التشغيلية مع قابلية التوسع والتكامل في بيئات الامتحانات الرقمية.



الشكل 1 المخطط العام لمنهجية كشف الغش

- **المخطط العام للمنهجية:**

يوضح الشكل 1 المنهجية العلمية والتطبيقية لبناء نظام ذكي لكشف حالات الغش في الاختبارات عبر الانترنت، بالاعتماد على تحليل الفيديو المباشر للجلسة وتوظيف تقنيات التعلم العميق. تشمل المنهجية مراحل متكاملة تبدأ بجمع البيانات وتصنيفها، مروراً بالمعالجة المسبقة واستخراج السمات الهندسية للوجه، ثم تصميم النموذج التصنيفي وتحويله إلى صيغة معيارية قابلة للنشر ONNX، وصولاً إلى دمج آليات كشف الأغراض وتتبع حركة الفم، وانتهاءً بمرحلة الاستدلال الفوري ونشر النظام عبر واجهة ويب تفاعلية.

4.2 الأدوات والمكتبات والتعاريف اللازمة

تم تطوير المنهجية المقترحة باستخدام لغةPython (الإصدار3.8 أو أعلى) ضمن بيئة تطوير تشملVS Code وJupyter Notebook مع دعم وحدة معالجة رسومية (GPU(CUDA على نظام التشغيل Windows. اعتمدت التجارب على مكتبات الذكاء الصنعي ومعالجة الفيديو والصور، بما في ذلك مكتبة PyTorch لتصميم وتدريب النموذج، ONNX Runtime للتشغيل عبر منصات متعددة، وYOLOv9لاكتشاف الوجوه والكائنات. كما استخدمت OpenCV وDlib *لمعالجة الفيديو والصور* واستخراج النقاط المرجعية للوجه، *إضافة إلى* Pandas وSeaborn/*Matplotlib لحفظ النتائج وتحليلها وعرض مؤشرات الأداء*. ساهم هذا التكامل بين الأدوات والمكتبات في تحقيق أداء عالٍ في الزمن الحقيقي مع قابلية التوسع والتطبيق في بيئات تعليمية متنوعة.

4.3 جمع البيانات وتقسيمها:

تم استخدام مجموعة بيانات عامة تُعرف باسم OEP [12] والتي تحتوي على تسجيلات فيديو ل 24 طالباً من جامعة ولاية ميشيغان أثناء أداء امتحان رياضيات وتشمل حالات غش وغير غش. تتضمن المجموعة تسجيلات من كاميرتين wearcam وwebcam وقد تم الاعتماد في هذه الدراسة على فيديوهاتwebcam فقط بمتوسط زمن قدره 17 دقيقة لكل طالب. بلغت نسبة الإطارات المستخرجة من قاعدة البيانات العامة حوالي 90% تقريباً بينما مثلت الإطارات المحلية الخاصة ما يقارب 10% من إجمالي البيانات وذلك لتغطية سيناريوهات إضافية مثل استخدام الكتب والأوراق. تم استخراج الإطارات من الفيديوهات وتصنيفها يدوياً باستخدام واجهة تفاعلية تم تطويرها خصيصاً لهذا الغرض. ثم حفظ الإطارات المصنفة في مجلدات منفصلة حسب الفئة (غش/ ليس غش).

أما عملية التقسيم فقد اعتمدت على خوارزمية مخصصة تضمن استقلالية المجموعات وتمنع تسرب المعلومات بين بيانات التدريب والاختبار. حيث جُمعت الإطارات في مجموعات متسلسلة استناداً إلى الأرقام المدرجة في أسماء الملفات بحيث تمثل كل مجموعة سلسلة زمنية لمشارك واحد. بعد ذلك تم خلط عشوائي على مستوى المجموعات (وليس على مستوى الإطارات الفردية) لضمان توزيع غير متحيز، وتم توزيع المجموعات بالكامل على أحد التقسيمين حتى الوصول إلى

النسبة المستهدفة وهي 70% للتدريب و30% للاختبار. وبذلك بلغ عدد عينات التدريب 2718 غش و1699 ليس غش بينما بلغ عدد عينات الاختبار 1665 غش و1314 ليس غش وهو ما يعكس درجة من التوازن النسبي بين الفئتين. ولضمان عدالة النموذج بشكل أكبر أثناء التعلم تمت إضافة أوزان للفئات داخل دالة الخسارة واستخدام WeightedRandomSampler في مرحلة التدريب لمعالجة أي انحياز متبقٍ.

4.4 المعالجة المسبقة للبيانات:

خضعت الصور لعدة خطوات معالجة تهدف إلى تحسين جودة المدخلات وتوحيدها، وقد تم اعتماد ثلاث منهجيات مختلفة بحسب طبيعة النموذج المستخدم:

- **النموذج الهندسي:**

في هذا النموذج شملت المعالجة المسبقة إعادة تحجيم الإطارات إلى أبعاد موحدة، تدويرها لمحاكاة زوايا التقاط مختلفة، تم استخدام كاشف Haarلاستخراج الوجه[13] ،حيث يعتمد على خصائص بسيطة من المستطيلات السوداء والبيضاء تستخدم لتمييز الفروقات في شدة الإضاءة بين مناطق الوجه (مثل العينين، الأنف، والفم). تُحسب هذه الخصائص بكفاءة عالية باستخدام ما يعرف بالصورة التكاملية، ثم تدمج عبر خوارزمية AdaBoost في مصنّف قوي منظم على شكل Cascade of Classifiers لزيادة سرعة التنفيذ. بعد تحديد المستطيل المحيط بالوجه باستخدام كاشف Haar جرى استخراج النقاط المرجعية (landmarks) وحساب المسافات الإقليدية بين النقاط المختارة لتكوين متجه سمات هندسية ثابت الطول، مع استبعاد العينات غير الصالحة التي لم يُكشف فيها وجه أو لم تُستخرج منها معالم صحيحة.

- **النموذج البصري:**

في هذا النموذج لم يتم استخدام كاشف Haar أو استخراج السمات الهندسية بل تم الاعتماد على مكتبة RetinaFace لكشف الوجه بدقة أعلى، بعد اقتصاص الوجه، يتم إعادة تحجيمه إلى أبعاد ثابتة (224*224) ثم تطبيع قيم البكسلات وتحويلها إلى صيغ مناسبة لإدخالها في الشبكة

العصبونية. تم حفظ العينات الصالحة فقط في ملفات npz مع التصنيفات، بينما استُبعدت الصور التي لم يُكشف فيها الوجه.

- **النموذج الهجين:**

في هذا النموذج جرى المزج بين منهجيات حديثة وكلاسيكية، حيث استخدم RetinaFace لكشف الوجه بدقة عالية ثم تمرير الوجه بعد اقتصاصه إلى وحدة استخراج السمات التي تعتمد على dlib لاستخراج النقاط المرجعية (مع استخدام كاشفHaar كخطة بديلة عند فشل الكشف). بعد ذلك يتم حساب المسافات الإقليدية بين النقاط المختارة لتكوين متجه سمات هندسية ثابت الطول. وبذلك يجمع النموذج بين قوة الكشف الحديثة والتمثيل الهندسي المبسط للوجه.

4.5 تصميم النماذج التصنيفية:

تم تطوير ثلاث بنى معمارية مختلفة تختلف في نوعية المدخلات وطريقة المعالجة:

- **النموذج الهندسي (Geometric Feature-Based Model)**

يعتمد على متجه السمات العددية المستخرجة من النقاط المرجعية للوجه (15 بُعداً) باستخدام شبكة التفافية أحادية البُعد (1D-CNN) مع كتل ResidualSE ويتميز بقدرته على تفسير القرار بناءً على العلاقات الهندسية الواضحة.

- **النموذج البصري (Image-Based CNN Model)**

يعتمد على الصورة الاصلية للوجه دون معالجة هندسية باستخدام شبكة ثنائية البُعد (2D-CNN) مع كتل ResidualSE ويتيح التعلم المباشر من الأنماط البصرية الدقيقة.

- **النموذج الثالث: (Hybrid Model)**

يجمع بين المدخلين عبر مسارين CNN لمعالجة الصورة ومسار MLP للسمات الهندسية يتم دمجهما في طبقة تصنيف مشتركة (Fully Connected) لإنتاج القرار النهائي مما يوفر توازناً

بين قابلية التفسير والدقة والمرونة. يوضح الجدول 1 الفروقات الأساسية بين النماذج من حيث نوع المدخلات، البنية، قابلية التفسير، والمرونة، حيث يظهر النموذج الهندسي تفوقاً في الشفافية، بينما يحقق النموذج البصري دقة أعلى في اكتشاف الأنماط، ويقدم النموذج الهجين تكاملاً بين الاثنين.

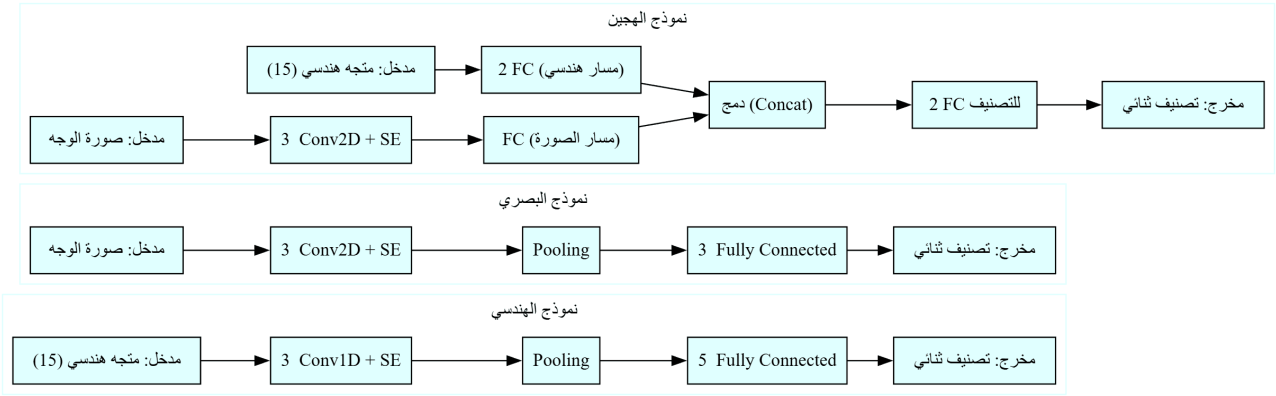
العنصر	النموذج الهندسي	النموذج البصري	النموذج الهجين
المدخلات	متجه هندسي (15 بُعداً)	صورة الوجه الأصلية	صورة الوجه+ متجه هندسي
نوع الشبكة	1D CNN+ ResidualSE	2D CNN+ ResidualSE	2D CNN+MLP
عدد الطبقات	3 Conv1D + 5 FC	3 Conv2D +3 FC	3Conv2D (مسار البصري) +2 FC (مسار الهندسي) +2 FC دمج + (للتصنيف)
حجم المرشحات	32,64,128	32,64,128	32,64,128
حجم النوافذ	3	3*3	3*3
حجم النموذج (ملف الوزن)	4.90 MB	13.69MB	7.52 MB
عدد المعاملات	1270480	3579312	1959152
زمن التنفيذ	الأسرع	الأبطأ	متوسط
قابلية التفسير	عالية	منخفضة	متوسطة–عالية

قابلية التطبيق	يتطلب معالجة مسبقة	مباشر على الصور	مرن وقابل للتكيف
المرونة والتكامل	محدود	محدود	عالي
الفرق الأساسي	يعتمد على العلاقات العددية بين النقاط المرجعية	يتعلم من الأنماط البصرية الدقيقة في الصور	يدمج السمات العددية والبصرية في قرار واحد

جدول 1 مقارنة النماذج الثلاث

الرسم المعماري للنماذج:

يوضح الشكل 2 البنية المعمارية لكل نموذج على حدة بدءاً من نوع المدخل مروراً بمراحل المعالجة وصولاً إلى الإخراج النهائي (تصنيف ثنائي: غش /ليس غش).



الشكل 2 الرسم المعماري للنماذج

4.6 التدريب والتقييم:

تم تدريب النماذج المقترحة باستخدام خوارزمية الانحدار العكسي (Backpropagation) مع خوارزمية التحسين Adam وقد تم ضبط المعلمات الأساسية على النحو التالي:

معدل التعلم (Learning Rate) =0.0001 لضمان استقرار عملية التدريب وتقليل احتمالية تخطي القيم المثلى.

حجم الدفعة (Batch Size) =64 لتحقيق توازن بين سرعة التدريب واستقرار التدرجات.

عدد الحقب (Epochs)=450 مع استخدام آلية التوقف مبكر Early Stopping لتجنب الإفراط في التدريب.

أما بالنسبة لدالة خسارة فقد تم اعتماد تقاطع الانتروبي (Cross-Entropy Loss) مع أوزان للفئات (Class Weights) لمعالجة مشكلة عدم التوازن بين العينات. ورغم أن هذه الدالة معيارية في مهام التصنيف متعدد الفئات إلا أنها تُستخدم أيضاً في حالة التصنيف الثنائي عندما يكون للنموذج مخرجان (غش/ ليس غش). في هذه الحالة تطبق داخلياً دالة Softmax لتحويل المخرجات إلى احتمالات ثم تحسب الخسارة. هذا الاختيار لا يعني أن المهمة متعددة الفئات بل هو متوافق تماماً مع تصميم النموذج الحالي الذي يعتمد على مخرجين ويُعد مكافئاً رياضياً لاستخدام Sigmoid مع Binary Cross-Entropy مع ميزة إضافية في سهولة تطبيق أوزان للفئات وتوسعة النموذج لاحقاً إذا تطلب الامر.

مؤشرات التقييم:

تم تقييم النموذج بعد كل حقبة تدريبية بالاعتماد على مصفوفة الارتباك (Confusion Matrix) وهي مصفوفة ثنائية الأبعاد من الشكل 2*2 في حالة التصنيف الثنائية، وتُستخدم مصفوفة الارتباك لمقارنة التنبؤات بالقيم الحقيقية.

الحقيقة/التنبؤ	القيمة الحقيقية=1	القيمة الحقيقية=0
تنبؤ=1	True Positive (TP)	False Positive (FP)
تنبؤ=0	False Negative (FN)	True Negative (TN)

حيث تم حساب مؤشرات الأداء التالية من مصفوفة الارتباك:

الدقة (Accuracy): هي نسبة العينات المصنفة بشكل صحيح إلى اجمالي العينات:

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{عدد التنبؤات الصحيحة}}{\text{إجمالي عدد العينات}} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

مقياس (F1 Score): وهو المتوسط التوافقي بين الدقة والاسترجاع، ويُستخدم لتقييم الأداء في حالة عدم توازن الفئات:

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \qquad \text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

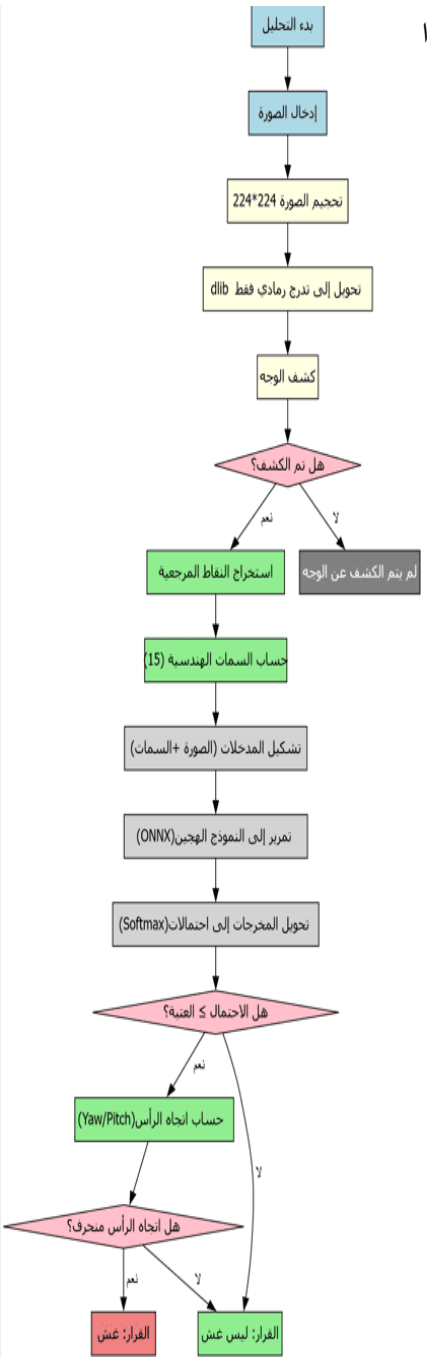
لتفادي الإفراط في التعلّم، تم تطبيق تقنية التوقف المبكر (Early Stopping) حيث يُنهى التدريب تلقائياً إذا لم يتحسن الأداء خلال عدد محدد من الحقبات المتتالية، كما تمت مراقبة ديناميكية التعلم عبر رصد قيم انحدار التدرج (GradientNorms) ولضمان تعميم النتائج وعدم اعتمادها على تقسيم معين للبيانات، تم تطبيق التحقق المتقاطع (Cross-Validation) باستخدام طريقة K-Fold بعدد الطيات=10.وقد جرى التقسيم على مستوى الجلسة/الفيديو لكل طالب بحيث يُخصص كل فيديو بالكامل إما للتدريب أو للاختبار مما يضمن استقلالية الأشخاص والجلسات ويمنع أي تداخل أو تسرب للمعلومات بين المجموعتين. في كل طية، يتم تدريب النموذج على 90% من البيانات وتقييمه على 10% المتبقية، ثم يُحسب متوسط دقة الطيات. بعد اكتمال التدريب تم حفظ أداء النموذج في ملف بصيغة CSV، وتوثيق أفضل حقبة تدريبية بناءً على أقل خسارة اختبار وأعلى دقة اختبار. ثم تحويلها إلى صيغة معيارية ONNX لتسهيل النشر والتكامل مع بيئات مختلفة ودعم التشغيل على محركات استدلال متعددة بكفاءة عالية.

4.7 الاستدلال المحلي:

يعتمد الاستدلال المحلي على معالجة الصورة المدخلة واستخراج مجموعة من السمات الهندسية للوجه باستخدام نموذج كشف المعالم الوجهية القائم على الانحدار.

تبدأ العملية بتحجيم الصورة إلى أبعاد قياسية (224*224) وتحويلها إلى صيغة تدرج رمادي بهدف تبسيط عملية الكشف عن المعالم وتقليل الضوضاء البصرية وهو ما يتناسب مع نموذج dlib المستخدم لاستخراج النقاط المرجعية. أما النماذج الأخرى مثل RetinaFace و YOLOv9 فقد استُخدمت بصيغتها الأصلية مع الصور الملونة (RGB) دون تعديل وذلك للحفاظ على دقتها في الكشف عن الوجوه والأجسام حيث أن هذه النماذج

تعتمد على المعلومات اللونية في إعداداتها الافتراضية. بعد تحديد موقع ا



الشكل 3 مخطط Flowchart للاستدلال

النقاط المرجعية الخاصة بالعينين والفم ويُحسب منها مجموعة من العلاقات الهندسية مثل المسافة بين مركزي العينين، عرض وارتفاع الفم ومتوسط المسافات داخل كل عين بالإضافة إلى مسافات إضافية بين العينين والفم. ينتج عن هذه العمليات متجه سمات هندسية مكون من 15 قيمة يستخدم مع الصورة الاصلية كمدخلات للنموذج الهجين بصيغة ONNX. تُمرر هذه البيانات إلى النموذج بعد إعادة تشكيلها، وتحول المخرجات إلى توزيع احتمالي باستخدام دالة Softmax، مما يتيح تفسيراً احصائياً للنتائج. وفي مرحلة الاستدلال لا يقتصر القرار النهائي على مخرجات النموذج فقط بل يُضاف شرط يعتمد على اتجاه الرأس المستخرج من النقاط المرجعية (Yaw, Pitch)فإذا أظهر التحليل أن الرأس منحرف بشكل واضح (يمين، يسار، أعلى، أسفل) تصنّف الحالة ضمن فئة "غش" حتى لو كان الاحتمال الإحصائي أقل من العتبة المحددة. أما في الحالات الطبيعية فيُتخذ القرار بناءً على مقارنة الاحتمال الناتج مع العتبة، حيث تُصنّف الصورة ضمن الفئة غش أو ليس غش وفقاً لذلك. الشكل 3 يوضح مراحل الاستدلال المحلي (inference) بدءاً من ادخال الصور وصولاً إلى القرار النهائي غش/ليس غش.

4.8 دمج كشف العناصر وتحليل النشاط الفموي:

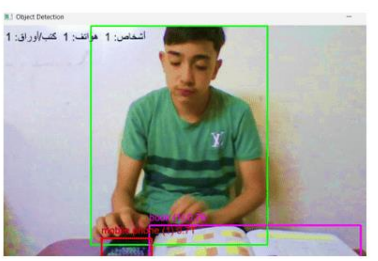
- ***كشف الأغراض:***

في هذه المرحلة، يُنفذ النظام عملية الكشف البصري على الإطارات الواردة من الكاميرا، حيث تُحلل الصورة وتُستخرج الكائنات ذات الصلة وفقاً لعتبات ثقة محددة لكل صنف إذ تم اعتماد 0.5 للأشخاص، 0.3 للهواتف المحمولة، 0.2 للكتب والأوراق وذلك بعد تجارب تحقق أولية لضبط التوازن بين الدقة والاستدعاء لكل فئة. بعد تصنيف الكائنات المكتشفة وتحديد مواقعها داخل

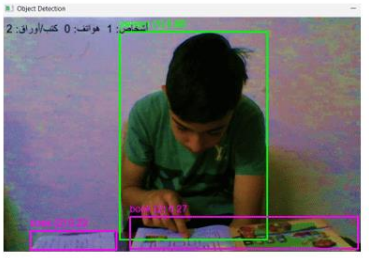
الإطار، تعرض النتائج بصرياً عبر مربعات محيطة وتسميات توضيحية ملوّنة، كما يُضاف ملخص عددي للكائنات في أعلى الشاشة مع مراعاة الترتيب الصحيح للنص العربي وشكل الحروف لضمان وضوح العرض ودقته اللغوية.

تم الاعتماد في هذه المرحلة على تقنية التعلم بالنقل (Transfer Learning) من خلال إعادة تدريب نموذج YOLOv9 المدرب مسبقاً على مجموعة COCO بشكل مخصص لفئة الكتب/الأوراق باستخدام قاعدة بيانات خاصة بالبحث جرى تجميعها وتوسيمها يدوياً عبر أداة LabelImg بينما فئات الأشخاص والهواتف المحمولة تم الاعتماد فيها مباشرة على النموذج الأصلي المدرب مسبقاً على مجموعةCOCO دون إعادة تدريب إضافي. وقد تم تقسيم قاعدة البيانات بنسبة 70% للتدريب، 20% للتحقق، 10% للاختبار لضمان تقييم مستقل للنموذج على بيانات غير مستخدمة في التدريب أو التحقق. هذا الإعداد ساهم في تحسين قدرة النموذج على التعرف بدقة أكبر على العناصر المرتبطة بسلوكيات الغش في الامتحانات [14]

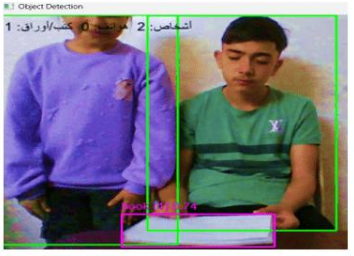
الاشكال 4-6 أمثلة على نتائج الكشف البصري، حيث تم التعرف على الأشخاص، الهاتف، والكتاب ضمن الإطار، مع عرض الثقة والتسميات باللغة العربية.



الشكل 4 كشف شخص وكتاب وهاتف



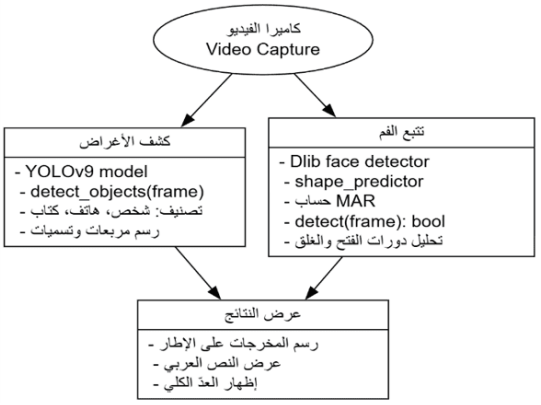
الشكل 5 كشف شخص وكتب/أوراق عدد2



الشكل 6 كشف شخصين وكتاب

- **تحليل حركة الفم:**

في هذه المرحلة، يُعتمد على تحليل الهندسي لمعالم الوجه بهدف الكشف عن نشاط فموي الذي قد يرتبط بالكلام أو السلوكيات غير المرغوبة في سياقات المراقبة. يتم اولاً استخراج وجه المستخدم من الإطار المرئي، ثم تحديد النقاط المرجعية المحيطة بالفم، ليُحسب مؤشر نسبة فتح الفم (MAR) باستخدام معادلة رياضية تعتمد على المسافات الاقليدية بين النقاط الرأسية والجانبية للفم.



الشكل7 دمج كشف الاغراض مع تحليل حركة الفم

يُعرف هذا المؤشر وفق العلاقة:

$$MAR = \frac{A + B + C}{2D}$$

حيث:

- A المسافة بين النقطة 61 و67، وتمثل الجزء الداخلي العلوي والسفلي للشفة اليمنى.
- B المسافة بين النقطة 62 و 66، وتمثل الجزء الأوسط الداخلي للشفتين.
- C المسافة بين النقطة 63 و 65، وتمثل الجزء الداخلي الايسر للشفتين.
- D عرض الفم من الزاوية اليمنى إلى الزاوية اليسرى.

تعكس القيم A,B,C مدى فتح الفم عمودياً، بينما تمثل القيمة D اتساع الفم افقياً. وبناءً على هذه النسبة يتم تحديد حالة الفم (مفتوح أو مغلق) وفق عتبة محددة مسبقاً قيمتها 0.25 فإذا تجاوزت قيمة MAR هذه العتبة يُعتبر الفم في حالة فتح، وإذا كانت أقل منها يُعتبر الفم مغلقاً. ولم يقتصر التحليل على قيمة MAR وحدها، بل تم الاعتماد على النمط الزمني لحركة الفم مما أتاح التمييز بين الحالات المختلفة:

- فم مغلق: عندما تكون قيمة $MAR \leq 0.25$ ولم تُسجل أي دورات فتح/إغلاق.

- فم مفتوح طبيعي: عندما تتجاوز قيمة MAR العتبة لفترة قصيرة أو بشكل غير متكرر.
- تحدث: عندما يُرصد تكرار دورات فتح وإغلاق الفم بشكل متتابع خلال فترة زمنية قصيرة.

يتيح هذا النهج التمييز بين السلوكيات الطبيعية (مثل التثاؤب أو فتح الفم بشكل طبيعي دون تحدث) والسلوكيات المرتبطة بالكلام مما يعزز دقة النظام ويمنع تفسير الحركات الطبيعية أو غير الإرادية كحالات غش.

الشكل 8حالة الفم مفتوح لفترة زمنية قصيرة وبشكل غير مكرر

الشكل 9 يوضح حالة التحدث حيث تم رصد دورات فتح وإغلاق بشكل مكرر

الشكل 10حالة الفم مغلق قيمة مؤشر MAR≤0.25

توضح الأشكال (8–10) تحليل حركة الفم باستخدام مؤشر MAR حيث تُظهر الصورة الأولى قيمة MAR=0.29 لفترة زمنية قصيرة ودون رصد تكرار دورات فتح/إغلاق مما يدل على أن الفم مفتوح بشكل طبيعي دون تحدث. بينما تُظهر الصورة الثانية قيمة المؤشر MAR=0.28 مع رصد ثلاث دورات فتح/إغلاق الفم متتابعة وهو ما يدل على حالة التحدث. أما الصورة الثالثة ظهر مؤشر MAR=0.03وهو أقل من العتبة المحددة مما يعكس حالة الفم المغلق.

4.9 نشر النظام عبر واجهة ويب تفاعلية:

تعتمد المنهجية في هذا النظام على تصميم خط معالجة متكامل لمراقبة الامتحانات عبر الفيديو وتحليل السلوك البصري بهدف كشف حالات الغش. يبدأ النظام بالتقاط الإطارات من كاميرا الويب وإرسالها إلى وحدة المعالجة، حيث يخضع كل إطار لسلسلة من العمليات تشمل: تصغير حجم الإطار، كشف العناصر (أشخاص، هواتف، كتب)، وتحليل حركة الفم. بعد ذل ك يتم الاستنتاج السلوكي باستخدام نموذج التصنيف.

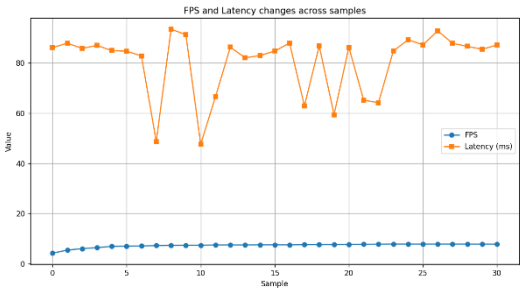
تشمل معايير القرار النهائي: وجود أكثر من شخص في الإطار، ظهور هاتف أو كتاب، التحدث، ونتيجة النموذج السلوكي. تحفظ النتائج في ملف بصيغة CSV يحتوي على المعلومات التالية: توقيت الإطار– رقم الإطار– عدد العناصر المكتشفة – معدل الإطارات في الثانية– وزمن الاستجابة.

يوفر النظام واجهة ويب تفاعلية تتيح تسجيل الدخول، بدء الامتحان، عرض الفيديو المباشر، وإنهاء الامتحان، مع بث فوري لنتائج المعالجة، كما يعتمد على المعالجة المتزامنة (multithreading) لضمان الأداء في الزمن الحقيقي. ويُظهر هذا التصميم كيف يمكن لتقنيات الرؤية الحاسوبية والتعلم العميق ان تتكامل لتقديم حلول عملية قابلة للتطبيق في بيئات تعليمية، مع تعزيز مرونة النشر عبر تحويل النموذج إلى صيغة ONNX وإتاحة إمكانيات التوسع والتكامل مع أنظمة متعددة.

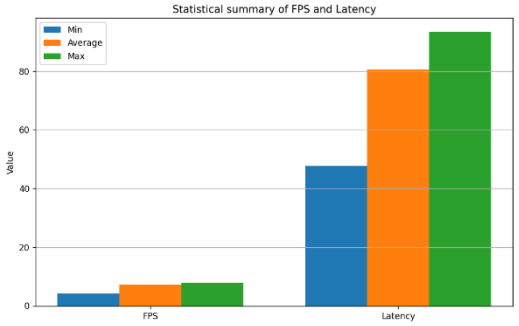
5. النتائج ومناقشتها:

في هذه الفقرة يتم عرض نتائج الاختبارات العملية التي أجريت على النظام المقترح بعد الانتهاء من تطويره وتنفيذه وفقاً للمنهجية الموضحة سابقاً. تهدف هذه النتائج إلى تقييم أداء النظام في بيئة واقعية، من خلال تحليل قدرته على كشف الكائنات المرتبطة بسلوكيات الغش الأكاديمي، ورصد المؤشرات السلوكية مثل التحدث أثناء الامتحان وذلك باستخدام تقنيات الرؤية الحاسوبية والنماذج الذكية المدربة مسبقاً.

تم قياس معدل الإطارات في الثانية (FPS) وزمن الاستجابة (Latency) أثناء التشغيل الفعلي للنظام حيث أظهرت النتائج أن النظام يعمل بزمن شبه لحظي محققاً معدل إطارات يتراوح بين 5–8 إطار/ثانية بمتوسط يقارب 8 إطار/ثانية بينما تراوح زمن الاستجابة بين 47–93 مللي ثانية بمتوسط يقارب 80 مللي ثانية. كما هو موضح في الشكلين (11–12) تم تلخيص القيم الدنيا والعظمى والمتوسطة لكل من FPS و Latency.



الشكل 11 مخطط خطي يوضح تغير قيم معدل الإطارات (FPS) وزمن الاستجابة (Latency) عبر العينات أثناء التنفيذ الفعلي للنظام



الشكل 12مخطط أعمدة يوضح القيم الإحصائية الدنيا والعظمى والمتوسطة لكل من معدل الإطارات (FPS) وزمن الاستجابة (Latency)

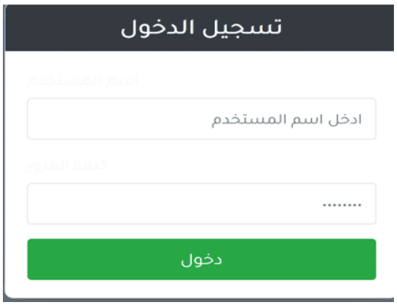
هذه النتائج تؤكد قدرة النظام على العمل في الزمن الحقيقي ومتابعة سلوك الطالب بشكل مستمر أثناء الامتحان.

5.1 صفحات الويب في النظام:

تم تطوير واجهة ويب تفاعلية لتمكين المستخدم من التفاعل المباشر مع النظام، بدءاً من تسجيل الدخول وحتى إنهاء الجلسة. توضح الصور المرفقة المراحل المختلفة لتشغيل النظام وتشمل:

أ- صفحة تسجيل الدخول login/:

تتيح للمستخدمين الدخول إلى النظام باستخدام بيانات اعتماد بسيطة (اسم المستخدم وكلمة مرور).



الشكل 13 صفحة تسجيل الدخول

ب- الصفحة الرئيسية /:

تظهر بعد تسجيل الدخول وتوفّر خيارات لبدء الامتحان أو تسجيل الخروج.

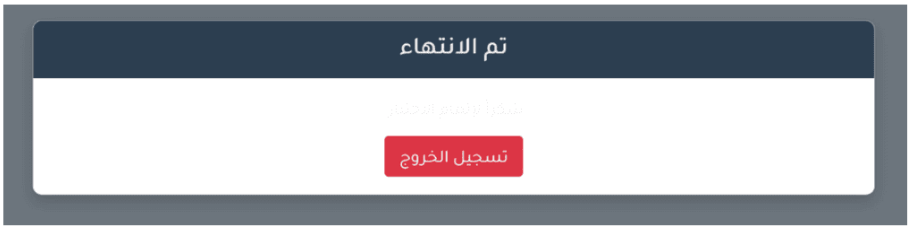
الشكل 14 الصفحة الرئيسية لنظام كشف الغش

ت- صفحة الامتحان exam/:

يتم تفعيل الكاميرا وتحليل الإطارات باستخدام YOLOو MARو Inference مع عرض مباشر للفيديو وتوصيف الحالة (غش / ليس غش) باللغة العربية.

ث- صفحة إنهاء الامتحان end_exam/:

تستخدم لإيقاف جميع العمليات (الكاميرا، المعالجة، الكتابة) ومسح الجلسة وتوجيه المستخدم إلى صفحة النهاية.



الشكل 15 صفحة إنهاء الامتحان

ج- صفحة تسجيل الخروج logout/:

تستخدم لمسح الجلسة يدوياً بحيث تعيد المستخدم إلى صفحة تسجيل الدخول وتوقف النظام. وحفظ جميع النتائج في ملف inference_records.csv حيث يتضمن عدد الأشخاص، وجود الهاتف أو الكتاب، حالة الفم، نتيجة النموذج، والتصنيف النهائي.

أظهرت الصور المرفقة حالات الغش في الزمن الحقيقي، حيث يتم تصنيف الإطارات تلقائياً، وتُعرض الحالة بشكل مرئي واضح، مما يعكس فعالية النظام في بيئة تشغيل واقعية.

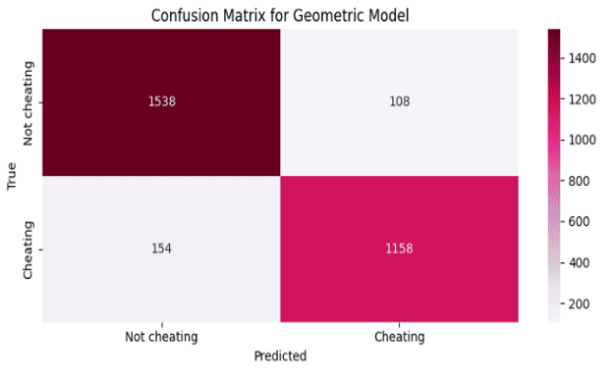
5.2 التقييم:

في هذه المرحلة يتم تحليل الأداء وذلك من خلال المؤشرات كمية ونوعية حيث يتم تقييم كل نموذج على مجموعة الاختبار بعد الوصول إلى أفضل أداء خلال التدريب وتم توثيق النتائج النهائية لكل نموذج على حدا وحفظها في ملفات بصيغة CSV.

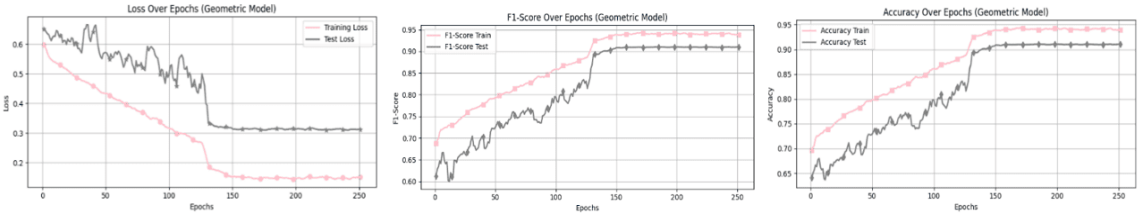
- **تقييم أداء النموذج الهندسي:**

أظهر النموذج الهندسي أداءً جيداً نسبياً في التمييز بين حالات الغش والحالات الطبيعية حيث بلغت دقة الاختبار 91.1% ومعامل F1-score نحو 89.9% مما يعكس توازناً مقبولاً بين الدقة النوعية والاسترجاع.

كما توضح مصفوفة الارتباك الشكل 16 توزيع التنبؤات الصحيحة والخاطئة، حيث حقق النموذج استرجاعاً (Recall) بنسبة 88.3% مع معدل الإنذارات كاذب منخفض بلغ 6.5%.



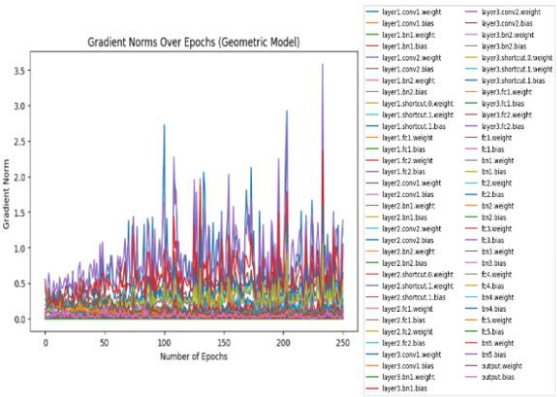
الشكل 16 مصفوفة الارتباك (النموذج الهندسي)



الشكل 17 منحنيات الأداء للنموذ

وتبين منحنيات الأداء (الشكل 17) الخاصة بالدقة والخسارة و F1 استقراراً تدريجياً بعد منتصف التدريب حيث استقرت قيم الدقة حول 0.91 على بيانات الاختبار مع انخفاض ملحوظ في الخسارة التدريبية.

أما منحنيات التدرجات الشكل18 قد اظهر استقراراً واضحاً عبر الطبقات وغياباً لمشكلات التلاشي أو

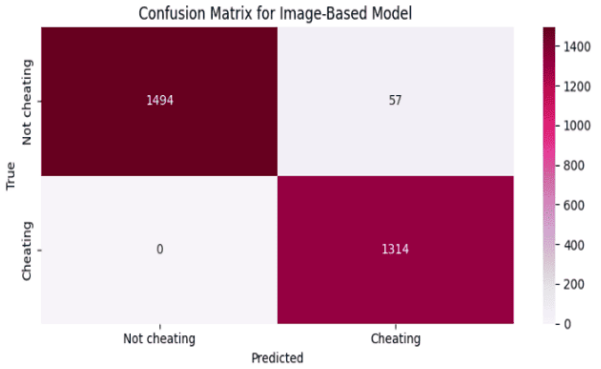


الشكل 18 منحنيات التدرجات النموذج الهندسي

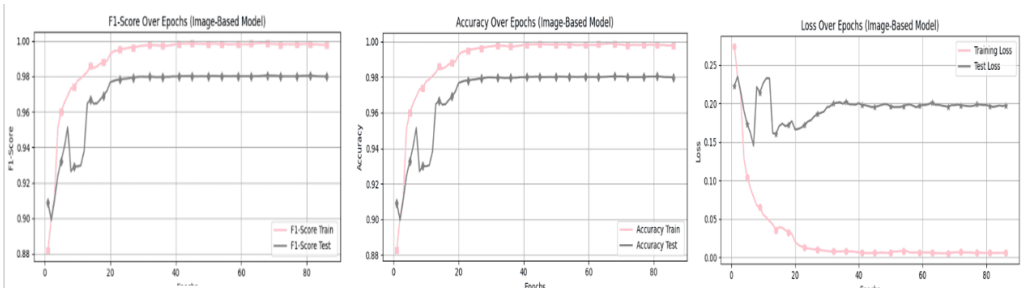
الانفجار مما يعزز الثقة في البنية الداخلية للنموذج. ورغم كفاءته التشغيلية العالية، الا أن النموذج أقل دقة في التعامل مع الحالات المعقدة.

- **تقييم النموذج البصري:**

حقق النموذج المعتمد على الصور اداءً متفوقاً مقارنة بالنموذج الهندسي، حيث بلغت دقته الكلية 98% ومعامل F1 نحو 97.9% مع استرجاع مثالي Recall=100% ودقة نوعية Precision=95.8% وتوضح مصفوفة الارتباك (الشكل 19) أن النموذج لم يُغفل أي خالة غش (FN=0) بينما بقيت الإنذارات الكاذبة منخفضة (FP=57) مما يعزز موثوقيته في البيئات الحساسة.



الشكل 19 مصفوفة الارتباك (النموذج البصري)



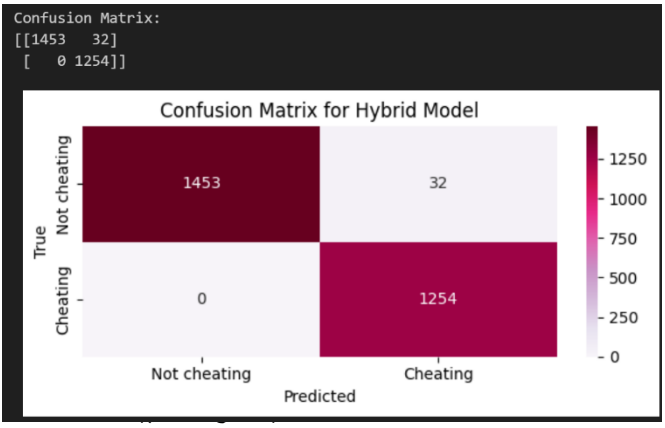
الشكل 20 منحنيات الأداء (النموذج البصري)

كما تبين منحنيات الأداء (الشكل 20) أن النموذج يتعلم بسرعة ويستقر تدريجياً، حيث ارتفعت قيم الدقة و F1 بشكل واضح مع انخفاض الخسارة دون مؤشرات على فرط التعلّم. ويظهر تحليل التدرجات الشكل 21 ديناميكية تعلم متوازنة مع بعض التذبذبات في طبقات BatchNorm لكنها لم تؤثر على الاستقرار العام للنموذج.

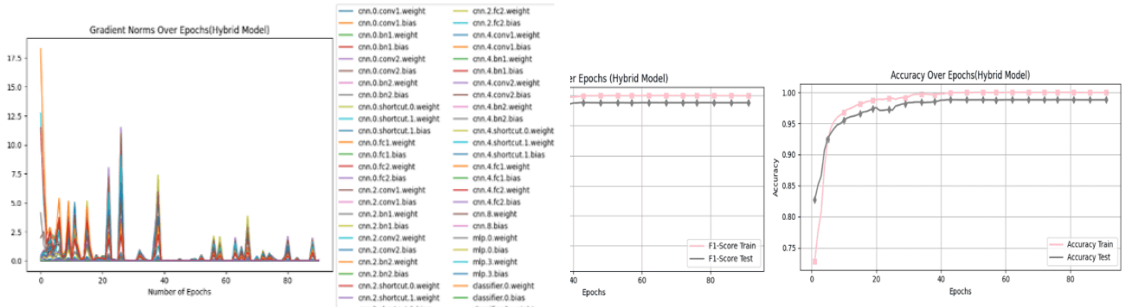
هذا الأداء القوي يجعله خياراً ممتازاً في التطبيقات التي تتطلب دقة عالية رغم حاجته إلى موارد حسابية كبيرة.

- **تقييم النموذج الهجين:**

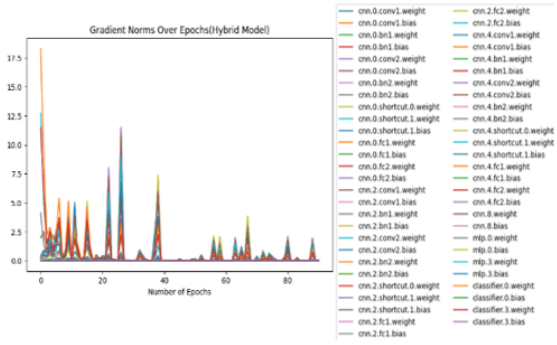
اظهر النموذج الهجين أفضل أداء بين النماذج الثلاثة حيث بلغت دقته 98.8% ومعامل F1 نحو 98.7% مع استرجاع مثالي 100% ودقة نوعية بلغت 97.5% وتوضح مصفوفة الارتباك الشكل 22 أن النموذج لم يغفل أي حالة غش (FN=0) مع عدد إنذارات كاذبة منخفض (FP=32) مما يعكس قدرة فائقة في التمييز بين الفئتين.



الشكل 22 مصفوفة الارتباك (النموذج الهجين)



الشكل 23 منحنيات الأد



الشكل 24 تحليل التدرجات (النموذج الهجين)

تبين منحنيات الأداء (الشكل 23) أن النموذج تعلّم بسرعة واستقر مبكراً حيث انخفضت الخسارة بشكل ملحوظ خلال أولى الحقبات التدريبية، بينما ارتفعت قيم الدقة و F1 إلى مستويات شبه مثالية.

ويؤكد تحليل التدرجات الشكل 24 ان عملية التعلم موزعة بشكل متوازن عبر مكونات النموذج المختلفة دون علامات على الاشي أو انفجار التدرجات. هذا التوازن بين دقة عالية وكفاءة تشغيلية يجعل النموذج الهجين الخيار الأمثل للتطبيقات التي تتطلب استجابة موثوقة وسرعة تنفيذ مع الحفاظ على أعلى مستويات الأداء.

- **المقارنة الكمية بين النماذج:**

النموذج	نوع المدخلات	الدقة Accuracy	الاسترجاع Recall	الدقة النوعية Precision	F1 Score
النموذج الهندسي	سمات هندسية	%91.1	%88.3	%91.5	%89.9
النموذج البصري	صور الوجه	%98	%100	%95.8	%97.9
النموذج الهجين	صورة+ سمات	%98.8	%100	%97.5	%98.7

جدول 2 المقارنة الكمية بين النماذج

أظهرت النماذج الثلاثة (الهندسي، البصري، والهجين) اداءً متبايناً يعكس اختلاف بنيتها ومدى تعقيدها. النموذج الهندسي تميز بكفاءة تشغيلية عالية وسرعة في التنفيذ مما يجعله مناسباً للأنظمة محدودة الموارد او التطبيقات التي تتطلب استجابة سريعة دون الحاجة إلى معالجة بصرية معقدة. ورغم أن دقته بلغت 91.1% إلا أنه أظهر بعض القصور في اكتشاف الحالات المعقدة. في المقابل النموذج المعتمد على الصور حقق اداءً قوياً حيث بلغ معامل F1 نحو 97.9% مع استرجاع مثالي 100% وغياب كامل للأخطاء السلبية (FN=0) مما يجعله خياراً ممتازاً في البيئات التي تتطلب دقة عالية في كشف الغش خاصة عندما تكون الصور متاحة بجودة مناسبة. ومع ذلك يتطلب موارد حسابية أكبر وزمن تنفيذ أطول. أما النموذج الهجين جمع بين مزايا النموذجين السابقين حيث حقق أعلى دقة كلية بلغت 98.8% واسترجاعاً مثالياً وغياب كامل للأخطاء السلبية (FN=0) إضافة إلى توازن واضح في توزيع التدرجات عبر مكوناته المختلفة. كما أظهر النموذج استقراراً تدريجياً في الأداء منذ الحقب الأولى مما يدل على فعالية التصميم البنيوي في دمج السمات البصرية والهندسية. ويجعل هذا التوازن النموذج الهجين الخيار الأمثل للتطبيقات التي تتطلب دقة عالية واستقراراً سريعاً دون التضحية بالكفاءة التشغيلية.

وبناءً على هذه النتائج يمكن اختيار النموذج الأنسب وفقاً لمتطلبات النظام وقيود الموارد مع مراعاة طبيعة البيانات المتاحة وأهمية تقليل الأخطاء في التصنيف لضمان موثوقية الأداء.

5.3 المقارنة مع الدراسات الحديثة:

بعد عرض نتائج التقييم يقدّم هذا القسم مقارنة موجزة بين النظام المقترح وبعض الدراسات المماثلة في المجال وذلك لتوضيح الفروقات الأساسية في الأداء والبنية التنفيذية.

يوضح الجدول 3 أن النظام المقترح يتفوق من حيث دقة التصنيف، التكامل بين الوحدات، ودعم التشغيل في الزمن الحقيقي إضافة إلى مرونته العالية في التوسع مقارنة بالدراسات السابقة.

الوظيفة	دراسة [3]	دراسة [4]	دراسة [8]	دراسة [9] مقارنة نظرية	النظام المقترح في هذا البحث
دقة التصنيف	%77.9	F1 =0.94	%96	93- %98	%98.8 الهجين %98 البصري %91.1 الهندسي
Precision	%81.4	-	_	_	%97.5 الهجين %95.8 البصري %91.5 الهندسي
Recall	%76.51	-	_	_	%100 الهجين+ البصري %88.3 الهندسي
الأخطاء السلبية (FN)	غير موضحة	غير موضحة	غير موضحة	غير موضحة	FN=0 غياب كامل للأخطاء السلبية في كل من النموذج البصري والهجين
نوع المدخلات	نقاط مرجعية للوجه باستخدام Mediapipe	صورة الوجه+ حركة الرأس+ اتجاه النظر	مدخلات متعددة (DL+ML)	صور+ نماذج CNN/+ YOLO	صورة الوجه أو السمات الهندسية أو كليهما حسب النموذج المختار
التحقق من الهوية	لا يوجد تحقق من الهوية	نعم باستخدام FaceNet	غير مذكور	غير مذكور	تحقيق مبدئي عبر بيانات اعتماد ثابتة

	النظام يبدأ من تحليل الفيديو مباشرة				(اسم المستخدم، كلمة المرور)
الوحدات الداعمة	–	تتبع الرأس والنظر	–	–	كشف الأغراض + تتبع حركة الفم + تتبع اتجاه الرأس
التكامل	محدود (فقط نقاط الوجه)	متوسط (عدة خوارزميات متفرقة)	جزئي	نظري	عالي جداً
دعم التزامن بين المهام	لا	لا	غير مدعوم بسبب التعقيد الحسابي وصعوبة التطبيق في الزمن الحقيقي	غير مذكور (مقارنة نظرية فقط)	نعم عبر فصل التقاط الإطارات، التحليل، والعرض

بنية التنفيذ	خطية بدون فصل بين المهام	غير مذكور	معقدة (دمج تقنيات متعددة دون إطار موحد)	غير مذكور (تحليل نظري للأداء)	متعددة المسارات Multi-threaded
قابلية النشر في الزمن الحقيقي	مدعوم (تم اختبارها على 20 مستخدماً افتراضي)	غير موضحة	غير مدعوم	غير موضح	مدعومة عبر ONNX وFlask مع معدل إطارات تقريباً 8 إطار/ثانية وزمن استجابة يقارب 80 مللي ثانية
مرونة التوسع والتخصيص	محدودة	متوسطة	ضعيفة	متوسطة	عالية مع قابلية إضافة وحدات جديدة بسهولة

جدول 3 جدول المقارنة بين الدراسات السابقة والنظام المقترح

تظهر المقارنة بين الدراسات السابقة والنظام المقترح ان التطور الحقيقي في مجال كشف الغش في الامتحانات الإلكترونية لا يتحقق عبر الاعتماد على نماذج بسيطة او خوارزميات متفرقة بل من خلال تصميم متكامل يجمع بين الرؤية الحاسوبية والتحليل السلوكي ضمن بنية تنفيذية متعددة المسارات.

وقد انعكس هذا التكامل في تفوق النموذج الهجين من حيث دقة التصنيف، والقدرة على الاسترجاع، إضافة إلى مرونته العالية في التوسع وامكانية دمج وحدات جديدة بسهولة. وبذلك يقدّم النظام

المقترح خطوة عملية نحو بيئة امتحانية أكثر عدلاً وموثوقية مع جاهزية تشغيلية تميزه عن النماذج السابقة.

6. التوصيات والخاتمة:

6.1 التوصيات:

استناداً إلى نتائج التقييم والمقارنة، يمكن تقديم التوصيات التالية لتطوير أنظمة كشف الغش في الامتحانات الإلكترونية:

- **تعزيز التكامل بين النماذج:** يُوصى باعتماد بنى هجينة تجمع بين السمات الهندسية والبصرية والسلوكية لما لها من أثر واضح في تحسين دقة التصنيف وتقليل الأخطاء السلبية.
- **دمج وحدات داعمة ذكية:** مثل كشف الأغراض باستخدام نماذج YOLO الحديثة وتتبع حركة الفم باستخدام مؤشرات هندسية مثل MARبالإضافة إلى حساب وتتبع اتجاه الرأس مما يتيح رصد أنماط الغش غير المباشرة بشكل أكثر دقة وموثوقية.
- **اعتماد بنية تنفيذية متعددة المسالك (Multi-threaded):** لضمان كفاءة زمنية واستجابة لحظية خاصة في البيئات متعددة المستخدمين او ذات الحمل العالي.
- **التركيز على تقليل الإنذارات الكاذبة (False Positives):** من خلال تحسين خوارزميات التصنيف وتوسيع قاعدة البيانات التدريبية لتشمل سيناريوهات متنوعة.
- **توسيع نطاق التقييم:** ليشمل اختبارات في بيئات واقعية متعددة بما يضمن التحقق من فعالية النظام في ظروف التشغيل المختلفة.
- **توفير واجهات تفاعلية مرنة:** تتيح للمراقب البشري التدخل عند الحاجة دون الاعتماد الكامل على القرار الالي مما يعزز من موثوقية النظام.
- **تصميم قابل للتوسعة والتحديث:** يُفضل اعتماد بنية برمجية مرنة تسمح بدمج نماذج أحدث مستقبلاً (مثل إصدارات YOLO المستقبلية او مؤشرات سلوكية إضافية) مما يضمن استدامة النظام وتطوره دون الحاجة لإعادة بناءه من الصفر.

6.2 الخاتمة:

في ختام هذا البحث تم تطوير نظام ذكي متكامل لكشف حالات الغش في الامتحانات الإلكترونية من خلال الجمع بين تقنيات الرؤية الحاسوبية والتحليل السلوكي ضمن بنية تنفيذية متعددة المسالك. لتحقيق ذلك تم تصميم وتقييم ثلاثة نماذج تصنيفية (هندسي، بصري، هجين) إلى جانب دمج وحدات داعمة لكشف الأغراض وتتبع التحدث. وقد أظهرت النتائج أن النموذج الهجين المقترح يحقق أداء تصنيفي قوي مع استرجاع مثالي ودقة نوعية مرتفعة مما يعكس قدرته على التمييز بين السلوكيات الطبيعية والغش في بيئات الامتحانات الرقمية. كما اثبتت البنية متعددة المسالك كفاءتها في تقليل زمن الاستجابة مما يجعل النظام مناسباً للتطبيق العملي حيث بلغ متوسط معدل الإطارات حوالي 8 إطار/ثانية ومتوسط زمن الاستجابة يقارب 80 مللي ثانية وهو ما يجعل النظام قادراً على العمل في الزمن الحقيقي حتى في البيئات التعليمية ذات الحمل التشغيلي المرتفع.

يمثل هذا النظام اساساً متقدماً لتطوير أدوات مراقبة ذكية أكثر شمولاً ومرونة، قادرة على رصد أنماط الغش المباشرة وغير المباشرة. ويمكن البناء على هذه النتائج مستقبلاً لتوسيع نطاق التطبيق نحو بيئات تعليمية أكثر تعقيداً مع دمج تقنيات إضافية مثل تحليل الصوت، تتبع العين، والتعلم التكيفي بما يعزز من موثوقية وكفاءة أنظمة كشف الغش في العصر الرقمي.

7. المراجع:

[1] MAHLANGU, V.P. 2018–The Good, the Bad, and the Ugly of Distance Learning. IntechOpen.

[2] KADTHIM, R.K. & ALI, Z.H. 2022– Survey: Cheating Detection in Online Exams. International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT), Vol. 8, No. 1, DOI: 10.31695/IJERAT.2022.8.1.1

[3] NGO, D.A., NGUYEN, T.D., DANG, T.L.C., LE, H.H., HO, T.B., NGUYEN, V.T.K. & NGUYEN, T.T.H. 2024–Examining Monitoring System: Detecting Abnormal Behavior. arXiv preprint arXiv:2402.12179, 19 Feb. 2024 .

[4] GOPANE, S., KOTECHA, R., OBHAN, J. & PANDEY, R.K. 2024– Cheat Detection in Online Examinations Using Artificial Intelligence. ASEAN Engineering Journal, Vol. 14, No. 1, pp. 121–128.

[5] ASKER, B.H. & AL-ALLAF, A.F. 2022– Detecting Cheating in Electronic Exams Using the Artificial Intelligence Approach. International Journal of Mechanical Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 999–1007.

[6] KADDOURA, S. & GUMAEI, A. 2022– Towards Effective and Efficient Online Exam Systems Using Deep Learning-Based Cheating Detection Approach. Intelligent Systems with Applications, Vol. 16.

[7] KUMAR, B.S., DIVYA SRI, M., VINAY, K.R., SRI, K.S.K. & JESSICA, K. 2024– Online Proctoring with Face Analysis and Object Recognition Using YOLO. Journal of Advanced Zoology, Vol. 45, Issue S2, pp. 18–24 .

[8] ERDEM, B. & KARABATAK, M. 2025– Cheating Detection in Online Exams Using Deep Learning and Machine Learning. Applied Sciences (MDPI), Vol. 15, No. 1, Article 400, pp. 1–21, 3 Jan. 2025 .

[9] ESSAHRAUI, S., LAMAAKAL, I., MALEH, Y., ELMAKKAOUI, K., BOUAMI, M.F., OUAHBI, I., ALMOUSA, M., ALQAHTANI, A.A.S. & EL-

LATIF, A.A.A. 2025– Deep Learning Models for Detecting Cheating in Online Exams. Computers, Materials & Continua, Vol. 85, No. 2, pp. 3152–3183, 23 Sep. 2025 .

[10] RAMAMOORTHY, R., ADITHI, S., ANTONY, J., ASHIKA, K. & BASAVARAJ, B. 2025– Design and Implementation of an AI–Powered Hybrid Detection Framework for Real–Time Object and Face Analysis. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE), Vol. 14, Issue. 11.

[11] ONNX RUNTIME DOCUMENTATION. 2025– ONNX Runtime Official Documentation. Available at: https://onnxruntime.ai/docs/

[12] ATOUM, Y., LIN, X., LIU, S., DING, H., HAN, H. & XU, L. 2015– Automated Online Exam Proctoring. IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 19, No. 7, pp. 1609–1624, Dec. 2015 .

[13] SAFFOUR, W., MUFDI, F. & HAMMOUD, T. 2021– Improving Viola–Jones Algorithm's Performance in Face Detection for Digital Images and Videos. Homs University Journal, Vol. 43, No. 12, pp. 99–128 .

[14] SAAD ELDIN, N. & AL–ATASSI, Y.A.S. 2020– Applying Transfer Learning in Image Classification. Homs University Journal, Vol. 42, No. 23, pp. 11–52 .

دراسة عملية لخوارزميات تقريبية لمسألة البيان الجزئي الأصغري الممتد المضاعف الترابط للمجموعة T

رهام منصور اشراف: د.رائد جابري

الملخص

مسألة إيجاد بيان جزئي أصغري ممتد مضاعف الترابط للمجموعة T هي مسألة مهمة في علوم الحاسب نظراً لتطبيقاتها الواسعة وأهميتها في مجال تصميم الطرق وإعادة توجيه حركة المرور في حال وجود نقاط مفصلية قوية او حوادث او مناطق اخلاء.

يمتاز البيان الجزئي الأصغري الممتد المضاعف الترابط للمجموعة T بقدرته على الحفاظ على خواص الاتصال بقوة في حال حدوث عطل في وصلة وفي حال حدوث عطل في عقدة من مجموعة عقد T. وعلى الرغم من كون مسألة إيجاد هذا النوع من البيانات الجزئيّة هو مسألة NP−complete. فإنّ من الممكن إيجاد حلول تقريبيّة من خلال خوارزميات تقريبيّة وفعالة. وهذا ما سنركز عليه خلال هذا البحث.

الكلمات المفتاحية : البيان الموجه، البيان الجزئي، البيان المتصل بقوة، الخوارزميات التقريبية، البيان المضاعف الترابط وصلياً، البيان الأصغري مضاعف الترابط وصلياً ، البيانات مضاعفة الترابط للمجموعة T.

An experimental study of approximation algorithms for minimum 2−T connected spanning subgraph problem

Abstract

The problem of computing a minimum 2−T connected spanning subgraph is an important problem in computer science due to its wide applications and significance in road design and traffic rerouting in the presence of strong articulation points, accidents, or evacuation zone. The minimum 2−T connected spanning subgraph is distinguished by its ability to preserve strong connectivity properties in the event of a edge failure or a vertex failure within the set of vertices T. Although finding this type of subgraphs is NP−complete, approximate solutions can be obtained through efficient approximation algorithms. This will be the main focus of this research.

Keywords: directed graph, subgraph, strongly connected graph, approximation algorithms, 2−edge−connected graph, minimum 2−edge−connected graph, 2−T connected graph.

1. مقدمة :

الكثير من المسائل التي تهم حياتنا اليومية تم حلها من خلال خوارزميات البيان على سبيل المثال مسألة إيجاد طريق بأقل تكلفة ممكنة للوصول إلى مطعم ما ضمن مدينة. وفي حالات حدوث الكوارث الطبيعية وغير الطبيعة يكون من المهم جداً معرفة إمكانية الحفاظ على الاتصال بين العقد في حال فشل وصلة او عقدة ما. ففي قسم البرمجيات ونظم المعلومات في كلية الهندسة

المعلوماتية بجامعة اللاذقية تمت دراسة مسائل تهتم بخاصية الاتصال المضاعف في البيانات الموجهة من قبل الباحث جابري في عمله [10] واحمد دنده[6] وعزام حبيب[15] ونور الكنج [7].

تدعى البيانات الموجهة التي تمتلك ميزة وجود طريق بين أي عقدتين فيها بالبيانات المتصلة بقوة. نقول عن بيان موجه انه مضاعف الترابط وصلياً اذا كان البيان الجزئي المتبقي بعد إزالة أي وصلة من وصلاته هو بيان متصل بقوة. ونقول انه مضاعف الترابط عقدياً اذا كان البيان الجزئي المتبقي بعد إزالة أي عقدة من عقده هو بيان متصل بقوة.

في عام 1979 برهن كيري وجونسون [1] ان مسألة ايجاد بيان جزئي ممتد واصغري يحقق خاصية الترابط المضاعف عقدياً وان مسألة ايجاد بيان جزئي ممتد واصغري يحقق خاصية الترابط المضاعف وصلياً هي مسألة NP−complete. الخوارزميات التقريبية الأولى المعروفة لهذه المسألتين تعتمدان على نتائج مادر[4] وادمونس [23] حيث تم برهان ان عدد وصلات البيان المضاعف الترابط عقدياً أو وصلياً وغير القابل للتخفيض minimal لايتجاوز أربعة اضعاف عدد العقد. في عام 2000 قدم شيريان واخرون [2] خوارزميات تقريبية افضل من المعروفة سابقا لهاتين المسألتين من حيث جودة الحل. و قام جورجيادس واخرون [24,25] في عام 2020 بتحسين النتائج السابقة لمسألة البيان الجزئي الممتد والمضاعف الترابط عقدياً.

من المصطلحات التي تم طرحها في البيان الموجه في عام 2018 من قبل Gevigney وآخرون[3] هو مصطلح البيانات الموجهة المضاعفة الترابط للمجموعة T وهي البيانات التي تحافظ على إمكانية الاتصال بقوة في حال حدوث عطل في وصلة وكما تحافظ على على إمكانية الاتصال بقوة في حال فشل أي عقدة من عقد المجموعة T. فمثلاً في البيان الموجه الموجود في الشكل 2 للجزء الذي يمثل منطقة من حي الوعر في مدينة حمص والموجود في الشكل 1. نلاحظ ان هذا البيان يمتاز بهذه الميزة. اذا كانت T تتضمن العقدتين التاليتين: عقدة لبرج النجاح وعقدة تمثل نقطة تقاطع شارع تشرين مع شارع الفردوس. لاحظ البيان الموجه المرسوم في الشكل 2 إن فشل أي وصلة لا يؤثر على إمكانية الاتصال بقوة وكذلك فشل أي عقدة من العقد الموجودة في المجموعة T لا يؤثر على إمكانية الاتصال بقوة في هذا البيان.

الشكل (1) جزء من حي الوعر في حمص

الشكل(2) بيان موجه يمثل جزء من حي الوعر في حمص

يركز هذا البحث على إيجاد بيان جزئي اصغري ممتد في البيانات مضاعفة الترابط للمجموعة T. هذه المسألة هي مسألة NP−complete ولذلك فإنه من غير المعلوم حتى وقتنا هذا اذا كان بالإمكان حل مثل هذه المسائل بزمن كثير حدود. سنركز في بحثنا على تصميم وتحقيق خوارزميات تقريبية لهذه المسألة.

2. مشكلة البحث :

يمكن تعريف مشكلة البحث كما يلي:

الدخل بيان موجه $G = (V, E)$ حيث G مضاعف الترابط للمجموعة T

المطلوب: حساب مجموعة جزئية من الوصلات E^*باقل عدد ممكن من الوصلات بحيث ان البيان الجزئي الموجه (V, E^*) هو بيان مضاعف الترابط للمجموعة T.

ان هذه المسألة هي مسألة NP−complete وذلك لان مسألة إيجاد البيان الجزئي الاصغري الممتد المضاعف الترابط عقديا هي حالة خاصة من مسألتنا عندما تكونT=V. سنركز في بحثنا على تصميم وتحقيق خوارزميات تقريبية بزمن كثير حدود لهذه المسألة.

3. أهمية البحث وأهدافه ومبرراته:

إن البيانات الموجهة مضاعفة الترابط للمجموعة T تمتاز بالقدرة على المحافظة على إمكانية الاتصال بين العقد في حال حدوث عطل او فشل في أي عقدة من عقد المجموعة T وفي حال حدوث أي عطل او فشل في أي وصلة من وصلاتها. وهذا الميزة مفيدة جدا في حال حدوث الأعطال والكوارث ضمن المدن. في هذا البحث نهتم بمسألة حساب بيان جزئي ممتد مضاعف الترابط للمجموعة T بحيث يكون عدد وصلات هذا البيان الجزئي اقل ما يمكن. وهذه المسألة هي مسألة NP−complete.

إن الخوارزميات التقريبية التي تم دراستها في بحث احمد دنده [6] وفي الخوارزميات المدروسة في بحث نور الكنج [7] غير قادره على ايجاد حلول تقريبية لهذه المسألة. كما ان الحلول الناتجه

عن الخوارزميات المدروسة من قبل شيريان واخرون [2] وجورجيادس واخرون [24,25] لا تشكل حلولاً لمسألة البحث. ,لذلك لابد من العمل على تصميم خوارزميات جديدة.

نهدف في هذا البحث الى تصميم خوارزميات لايجاد حلول تقريبية لمسألة البيان الجزئي الأصغري الممتد والمضاعف الترابط للمجموعة T بزمن كثير حدود ثم تحقيق هذه الخوارزميات والمقارنة بينها من حيث عدد الوصلات وزمن التنفيذ. ثم سندرس إمكانية الإجابة على السؤال التالي: هل يمكن تحديد عامل التقريب للخوارزميات المحققة في الحالة العامة ؟

4. مواد وطرق البحث :

قمنا في هذا البحث بدراسة مجموعة من المفاهيم الأساسية المتعلقة بخصائص الاتصال في البيانات الموجهة وهي: البيانات المتصلة بقوة [5,13]، البيانات المضاعفة الترابط عقدياً [8]، البيانات المضاعفة الترابط وصلياً [2] والبيانات المضاعفة الترابط للمجموعة T [3]. ان الخوارزميات التقريبية التي تمت دراستها وتحقيقها في [6] لإيجاد حلول تقريبية لمسألة البيان الجزئي الاصغري الممتد والمضاعف الترابط عقدياً غير قادرة على إيجاد حلول لمسألة بحثنا لان بيان الدخل ليس بالضرورة ان يكون مضاعف الترابط عقدياً. كما ان الخوارزميات التقريبية لمسألة البيان الجزئي الممتد والمضاعف الترابط وصليا التي تمت دراستها في [7] غير قادرة على إيجاد حلول لمسألة بحثنا لان خرج هذه الخوارزميات لا يحقق بالضرورة خاصية الترابط المضاعف للمجموعة T. بالإضافة الى ذلك فان جميع الخوارزميات التقريبية التي تعتمد على الدراسات المرجعية [2,4,23,24,25] وغيرها من المسائل المشابهة تفشل في إيجاد حلول لمسألة بحثنا. لذلك قمنا بتصميم خوارزميات تقريبية تعتمد على مفهوم البيان مضاعف الترابط للمجموعة T غير قابل للتخفيض[3] . وقمنا بتحقيق هذه الخوارزميات بلغة Java وقمنا بتجريبها على حاسب يمتلك المواصفات التالية :

Processor: AMD A6-9200 RADEON R4, 5 COMPUTE CORES 2C+3G 2.00 GHz

RAM: 8GB

Operating system: Windows 10

System type : 64-bit operating system with an x64-based processor

و قارنا بين هذه الخوارزميات من حيث زمن التنفيذ ومن حيث جودة الحل. وبرهنا عامل تقريب هذه الخوارزميات في الحالة التي يكون عدد العقد ضمن T مساوياً 4.

البيان الموجه المتصل بقوة strongly connected graph [5,13] : نقول عن بيان موجه G=(V,E) أنه متصل بقوة strongly connected اذا كان يحقق ما يلي: من أجل كل عقدتين v,w ∈ V يوجد طريق من v الى w وطريق من w الى v في البيان G

البيان مضاعف الترابط عقدياً 2−vertex connected graph [8]: نقول عن بيان متصل بقوة G=(V,E) أنه مضاعف الترابط عقدياً 2−vertex connected اذا كان يحقق :من اجل كل عقدة v ∈ V يكون البيان الجزئي G\{v} متصل بقوة.

البيان مضاعف الترابط وصلياً 2−edge connected graph [2]: ليكن G=(V,E) بيان متصل بقوة نقول عن G انه مضاعف الترابط وصلياً
2−edge connected اذا كان يحقق ما يلي : من اجل اي وصلة e ∈E يكون البيان الجزئي G\{e} متصل بقوة.

البيانات الموجهة المضاعفة الترابط للمجموعة T [3]:

ليكن G=(V,E) بيان متصل بقوة ، من أجل T ⊆ V
نقول عن G أنه مضاعف الترابط للمجموعة T (2−T connected graph)
اذا كان يحقق الشرطين التاليين :

- ✓ Gمضاعف الترابط وصلياً 2−edge connected
- ✓ من اجل اي عقدة v Є T فإن البيان G\{v} متصل بقوة

خوارزميات تقريبية لحل مسألة البيان الجزئي الموجه الأصغري والمترابط من الدرجة الثانية [6]: البيانات الموجهة مضاعفة الترابط عقدياً هي البيانات الموجهة المتصلة بقوة التي تخلو من عقد يؤدي حذفها الى المساس بخاصية الاتصال بقوة.

في العمل [6]، تم إعداد دراسة مفصلة وتجريبية لخوارزميات تقريبية للمسالة التالية:
الدخل : بيان مضاعف الترابط عقديا 2−vertex connected G=(V,E)
المطلوب : ايجاد مجموعة جزئية $E^* \subseteq E$ حجمها اقل ما يمكن بحيث يكون البيان (V, E^*) هو بيان مضاعف الترابط عقدياً
هذه المسألة هي مسألة[1] NP−Complete. لكن جميع الخوارزميات التي تمت دراستها في [6] لا تناسب مسألة بحثنا لان هذه الخوارزميات تتطلبا دخلاً مضاعف الترابط عقدياً.

خوارزميات تقريبية لحساب بيان جزئي موجه ومضاعف الترابط وصلياً بحجم أصغري[7]

:عندما يكون البيان الموجه متصلاً بقوة ولا يتضمن أي وصلة يؤدي حذفها الى فقدان خاصية الاتصال بقوة ، فإننا نسمي هذا النوع من البيانات بيانات مضاعفة الترابط وصلياً.

في العمل [7] تمت دراسة عدة خوارزميات تقريبية لإيجاد حلول تقريبية للمسألة التالية:
الدخل : بيان مضاعف الترابط وصلياً 2−edge connected
G=(V,E)
المطلوب : ايجاد مجموعة جزئية $E^* \subseteq E$ حجمها اقل ما يمكن
بحيث أن البيان الجزئي (V, E^*) هو بيان مضاعف الترابط وصلياً
هذه المسألة هي مسألة [1] Np_complete
الخوارزميات التي تم دراستها في [7] غير قادرة على إيجاد حلول تقريبية لمسألة بحثنا.

البيانات المضاعفة الترابط وصلياً غير القابلة للتخفيض [4] :

وفقاً للنتائج التي تم التوصل اليها في [4,23] فإن البيانات المضاعفة الترابط وصلياً وغير القابلة للتخفيض لا يمكن ان تمتلك اكثر من أربعة اضعاف عدد عقدها. وبالتالي يمكن

الحصول على خوارزميات تقريبية عامل تقريبها 2 للمسألة المدروسة في [7]. أي ان خرج هذه الخوارزميات يتضمن عدداً من الوصلات لا يتجاوز ضعفي الحل المثالي.

البيان مضاعف الترابط للمجموعة T غير قابل للتخفيض[3] :

نقول عن بيان$G=(V,E)$ مضاعف الترابط للمجموعة T أنه غير قابل للتخفيض اذا حقق مايلي :

- ✓ G مضاعف الترابط للمجموعة T
- ✓ من اجل أي وصلة e فإن البيان $G\backslash\{e\}$ هو بيان لا يحقق 2−T connected

تمكن الباحث في [3] من برهان أن: البيانات من هذا النوع تتضمن عقدة على الأقل بحيث

indegree = outdegree =2

ولكن لا توجد أي دراسة مرجعية تحدد الحد الاعظمي لعدد الوصلات لهذا النوع من البيانات وبالتالي يبقى السؤال هل بالإمكان الاستفادة من نتائج العمل [3] في تصميم خوارزمية تقريبية لمسألة بحثنا.

فحص خاصية مضاعف الترابط وصلياً وخاصية مضاعف الترابط عقدياً

نستعرض في هذه الفقرة خوارزمية بسيطة للتحقق من ان بيان الدخل مضاعف الترابط وصلياً والتي تعتمد على أمرين أساسين هما: ان بيان الدخل يجب ان يكون محققاً لخاصية الاتصال بقوة. وان البيان الناتج عن إزالة أي وصلة من بيان الدخل لايزال بيان متصل بقوة، يوضح الشكل (3) الخطوات التفصيلية لهذه الخوارزمية:

```
1  Algorithm Test_2edge_connected
2  Input: a directed graph G = (V, E)
3  if G is not strongly connected graph then
4        return false
5  for each edge (i, j) ∈ E do
6     if the subgraph (V, E\{(i, j)}) is not strongly connected then
7           return false
8  return true
```

الشكل (3) خوارزمية لفحص اذا كان بيان الدخل مضاعف الترابط وصليا"

ايضاً خوارزمية للتحقق من ان بيان الدخل مضاعف الترابط عقدياً والتي تعتمد على امرين اساسين هما: ان بيان الدخل يجب ان يكون محققا لخاصية الاتصال بقوة. وان البيان الناتج عن إزالة أي عقدة من بيان الدخل لايزال بيان متصل بقوة. الخوارزمية Test_2vertex _connected تعمل كما يلي: في البداية نقوم بالتحقق من ان بيان الدخل بالفعل متصل بقوة. لأننا نعلم ان البيان في حال لم يكن متصل بقوة فانه لا يمكن ان يكون مضاعف الترابط عقدياً. بعد ان نتأكد من امتلاك بيان الدخل لخاصية الاتصال بقوة. نقوم بالتحقق من ان البيان لايزال متصل بقوة بعد حذف أي عقدة من عقد البيان. فاذا كان البيان بعد حذف عقدة ما ليس متصل بقوة فانه ليس مضاعف الترابط عقدياً.

يوضح الشكل (4) الخطوات التفصيلية لهذه الخوارزمية.

```
1  Algorithm Test_2vertex _connected
2  Input: a directed graph G = (V, E)
3  if G is not strongly connected graph then
4        return false
5  for each vertex v ∈ V do
6     if the subgraph (V\{v}, E) is not strongly connected then
7           return false
8  return true
```

الشكل (4) خوارزمية لفحص اذا كان بيان الدخل مضاعف الترابط عقدياً

إيجاد بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض

نستعرض في هذه الفقرة خوارزمية لإيجاد بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected والتي تشكل حلاً مقبولاً ولكن ليس بالضرورة ان يكون مثالياً لمسألة البحث. تعتمد هذه الخوارزمية على مفهوم البيانات من النوع 2−T−connected غير القابلة للتخفيض 2−T− Minimal[3] connected graph والتي هي تعد تعميما لمفهوم البيانات غير القابلة للتخفيض المضاعفة الترابط عقديا و وصليا والتي تم دراستها من قبل مادر [4] وادمونس [23].

ليكن $G = (V, E)$ بيانا موجها محققا لخاصية 2−T−connected. نقول عن البيان G انه غير قابل للتخفيض اذا كان هذا البيان يفقد خاصية 2−T−connected عند حذف أي وصلة من وصلاته. يبين الشكل (5) خوارزمية بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض زمن تنفيذها كثير حدود.

```
1 | Algorithm Find_ minimal 2-T-connected subgraph
2 | Input: a directed graph G = (V, E)
3 | for each edge (i, j) ∈ E do
4 |     delete the edge (i, j) from E
5 |     if the subgraph (V, E\{(i, j)}) is not 2-T-connected then
6 |         add the edge (i, j) to E
7 | output the subgraph (V, E) and the number of its edges
```

الشكل (5) خوارزمية إيجاد بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض

ان الخوارزمية السابقة لايجاد بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض لا تراعي أي ترتيب للوصلات عند إزالة الوصلات غير الضرورية للمحافظة على خاصية 2− T−connected.

لقد قمنا بتصميم خوارزميات معدلة لايجاد بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected حيث تتضمن هذه الخوارزميات اكثر من مرحلة والهدف من هذه المراحل دراسة تأثير هذه المرحلة على

شكل البيان الناتج وعدد وصلاته. لا شك ان وجود هذه المراحل سينعكس سلباً على زمن التنفيذ والفائدة الحقيقة هي تخفيض عدد وصلات الخرج، إن تعقيد جميع الخوارزميات التي حققناها هو زمن كثير حدود وهذه الخوارزميات التي صممناها هي :

- **خوارزمية معدلة للحصول على بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected تعتمد على ثلاث مراحل.**

في المرحلة الأولى يتم إيجاد وصلات بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض وفي المرحلة الثانية ندرس الوصلات الناتجه عن المرحلة الأولى ونقوم بإزالة الوصلات غير الضرورية للحفاظ على خاصية 2−T−connected ثم في المرحلة الثالثة نقوم بدراسة الوصلات المتبقية وإزالة منها ما هو غير ضروري من الوصلات للحفاظ على خاصية 2−T−connected. هذه الخوارزمية تحتاج الى زمن $O(m^2(m+n))$.

```
1  Algorithm Three_phases_minimal 2-T-connected subgraph
2  Input: a 2-T-connected directed graph G = (V, E)
3  Phase 1
4  Find a minimal 2-T-connected subgraph of G and let I be its edge set.
5  Phase 2
6  for each edge (i, j) ∈ I do
7      delete the edge (i, j) from E
8      if the subgraph (V, E\{(i, j)}) is not 2-T-connected then
9              add the edge (i, j) to E
10 Phase 3
11 for each edge (i, j) ∈ E\I do
12     delete the edge (i, j) from E
13     if the subgraph (V, E\{(i, j)}) is not 2-T-connected then
14             add the edge (i, j) to E
15 output the subgraph (V, E) and the number of its edges
```

الشكل (6) خوارزمية معدلة للحصول على بيان جزئي محقق
لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض على ثلاث مراحل

- **خوارزمية معدلة للحصول على بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected تعتمد على اربعة مراحل:**

نقدم في هذه الفقرة خوارزمية تعتمد على أربعة مراحل. في المرحلة الأولى يتم إيجاد وصلات بيان جزئي غير قابل للتخفيض يحقق خاصية 2−T−connected ويتم تنفيذ خوارزمية البحث بالعمق على بيان الدخل وفي المرحلة الثانية ندرس الوصلات الناتجة عن المرحلة الأولى والتي لا تشكل وصلات شجرية ونقوم بإزالة الوصلات غير الضرورية للحفاظ على خاصية 2−T−connected ثم في المرحلة الثالثة نقوم بدراسة الوصلات المتبقية من البيان من الوصلات غير

الشجرية وإزالة منها ما هو غير ضروري من الوصلات للحفاظ على خاصية ثم يتم في المرحلة النهائية اختبار الوصلات الشجرية وإزالة الوصلات غير الضرورية منها.

```
1  Algorithm four_phases_minimal_2Tconnected_graph
2  Input: a 2-T-connected directed graph G = (V, E)
3  Phase 1
4  Find a minimal 2-T-connected subgraph of G and let I be its edge set.
5  Run dfs on G and classify edge
6  Phase 2
7  for each edge (i, j) ∈ I do
8    if (i, j) is not tree edge then
9      delete the edge (i, j) from E
10     if the subgraph (V, E\{(i, j)}) is not 2-T-connected then
11           add the edge (i, j) to E
12 Phase 3
13  for each edge (i, j) ∈ E\I do
14   if (i, j) is not tree edge then
15     delete the edge (i, j) from E
16     if the subgraph (V, E\{(i, j)}) is not 2-T-connected then
17           add the edge (i, j) to E
18 phase 4
19 for each tree edge (i, j) do
20     delete the edge (i, j) from E
21     if the subgraph (V, E\{(i, j)}) is not 2-T-connected then
22           add the edge (i, j) to E
23 output the subgraph (V, E) and the number of its edges
```

الشكل (7) خوارزمية معدلة للحصول على بيان جزئي محقق
لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض على أربعة مراحل

- **خوارزمية معدلة للحصول على بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected مؤلفة من خمسة مراحل:**

نقدم في هذه الفقرة خوارزمية من خمسة مراحل. في المرحلة الأولى يتم إيجاد وصلات بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected وفي المرحلة الثانية يتم فحص الوصلات التي حصلنا عليها في المرحلة الأولى ونقوم بحذف الوصلات غير الضرورية منها للحفاظ على خاصية 2−T− connected ثم في المرحلة الثالثة نقوم باختبار الوصلات المتبقية وحذف الوصلات غير الضرورية للحفاظ على خاصية 2−T−connected. وفي المرحلة الرابعة يتم فحص الوصلات شكلت خرج المرحلة الأولى والثالثة وصلة تلوى الأخرى ويتم حذف منها الوصلات التي لا تفيدنا في الحفاظ على خاصية 2−T−connected. ثم يتم في المرحلة الخامسة والأخيرة اختبار الوصلات التي لا تنتمي الى خرج المرحلة الأولى والثالثة لإزالة الوصلات غير الضرورية منها. الخطوات التفصيلية لهذه الخوارزمية:

Algorithm Five_phases minimal 2−T−connected subgraph

Input: a 2−T−connected directed graph $G = (V, E)$

Phase 1

calculate a minimal 2−T−connected subgraph of G and let I be its edge set.

Phase 2

for each edge $(i, j) \in I$ do

remove the edge (i, j) from E

if the subgraph $(V, E\backslash\{(i, j)\})$ is not 2−T−connected then

add the edge (i, j) to E

Phase 3

for each edge $(i, j) \in E\backslash I$ do

remove the edge (i, j) from E

if the subgraph $(V, E\backslash\{(i, j)\})$ is not 2−T−connected then

add the edge (i, j) to E

Phase 4

For each edge e in E do

Add e to I

Let E be the edge set of the input graph

for each edge $(i,j) \in I$ do

remove the edge (i,j) from E

if the subgraph $(V, E\backslash\{(i,j)\})$ is not 2−T−connected then

add the edge (i,j) to E

Phase 5

for each edge $(i,j) \in E\backslash I$ do

remove the edge (i,j) from E

if the subgraph $(V, E\backslash\{(i,j)\})$ is not 2−T−connected then

add the edge (i,j) to E

Output the subgraph (V,E) and the number of its edges

نلاحظ ان هذه الخوارزمية تحتاج الى زمن $O(m^2(m+n))$.

- **خوارزمية لايجاد بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض باستخدام شجرة بحث بالعمق**

ندرس في هذه الفقرة خوارزمية لايجاد بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض تراعي ترتيبا معينا للوصلات عند إزالة الوصلات غير الضرورية للمحافظة على خاصية 2−T−connected وذلك من خلال إيجاد شجرة بحث بالعمق ومن ثم دراسة الوصلات التي لاتنتمي الى هذه الشجرة ومن ثم بعد ذلك يتم اختبار وصلات الشجرة وصلة تلوى الأخرى واستبعاد ما هو غير ضروري منها.

Algorithm minimal_2Tconnected_graph_first_tree

Input: a 2−T−connected directed graph $G = (V, E)$

Phase 1

Run dfs starting from vertex 0 and classify edges

Note that tree edges form a tree called dfs tree

Phase 2

for each edge (i, j) which is not tree edge do

delete the edge (i, j) from E

if the subgraph $(V, E\backslash\{(i, j)\})$ is not 2−T−connected then

add the edge (i, j) to E

Phase 3

for each edge (i, j) which is tree edge do

delete the edge (i, j) from E

if the subgraph $(V, E\backslash\{(i, j)\})$ is not 2−T−connected then

add the edge (i, j) to E

output the subgraph (V, E) and the number of its edges

- **خوارزمية لايجاد بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض باستخدام شجرتين**

نقدم في هذه الفقرة خوارزمية معدلة عن الخوارزمية السابقة وذلك بإيجاد شجرتين مختلفتين بدلا من شجرة واحدة وذلك من خلال تنفيذ خوارزمية البحث في العمق وتصنيف الوصلات مرتين متتاليتين ثم يتم استبعاد الوصلات غير الضرورية بفحص الوصلات التي لا تنتمي الى هاتين

الشجرتين. وفي النهاية يتم فحص وصلات الشجرتين لكي يتم حذف الوصلات غير الضرورية منهما

Algorithm minimal_2Tconnected_graph_double_trees

Input: a 2−T−connected directed graph $G = (V, E)$

Phase 1

Run dfs on G and classify edge, and let I be the set of tree edges

Run dfs on G\I and classify edge, and add the tree edges to I.

Phase 2

for each edge (i, j) which is not in I do

delete the edge (i, j) from E

if the subgraph $(V, E\backslash\{(i, j)\})$ is not 2−T−connected then

add the edge (i, j) to E

Phase 3

for each edge (i, j) which is in I do

delete the edge (i, j) from E

if the subgraph $(V, E\backslash\{(i, j)\})$ is not 2−T−connected then

add the edge (i, j) to E

output the subgraph (V, E) and the number of its edges

- **خوارزمية لايجاد بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض باستخدام شجرتين والبيان المعكوس**

نقدم في هذه الفقرة خوارزمية تختلف عن سابقتها بانه بعد إيجاد شجرتين مختلفتين في بيان الدخل يتم إيجاد البيان المعكوس ومن ثم تنفيذ خوارزمية البحث بالعمق على البيان المعكوس فتتشكل لدينا شجرة ثالثة. وبعد ذلك يتم استبعاد الوصلات غير الضرورية بفحص الوصلات التي لا تنتمي الى الأشجار الناتجة. وفي النهاية يتم فحص وصلات الأشجار الثلاثة لكي يتم حذف الوصلات غير الضرورية منها.

Algorithm minimal_2Tconnected_graph_double_trees_refined

Input: a 2−T−connected directed graph $G = (V, E)$

Phase 1

Run dfs on G and classify edge, and let I be the set of tree edges

Run dfs on G\I and classify edge, and add the tree edges to I.

Find transport graph

Run dfs on the transport graph and for each tree edge (v,w) add (w,v) to I

Phase 2

for each edge (i, j) which is not in I do

delete the edge (i, j) from E

if the subgraph $(V, E\backslash\{(i, j)\})$ is not 2−T−connected then

add the edge (i, j) to E

Phase 3

for each edge (i, j) which is in I do

delete the edge (i, j) from E

if the subgraph $(V, E\backslash\{(i, j)\})$ is not 2−T−connected then

add the edge (i, j) to E

output the subgraph $(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{E})$ and the number of its edges

5. النتائج ومناقشتها :

في البداية نوضح خرج كل خوارزمية على بيان مكون من 10 عقد 82 وصلة عندما تكون |T|=4 ثم نقوم بتجريب الخوارزميات على مجموعة من البيانات ونقارن بين هذه الخوارزميات من حيث زمن التنفيذ وعدد وصلات الخرج .

من أجل تحليل ومقارنة الخوارزميات المحققة تم توليد البيانات بشكل عشوائي من خلال إجراء تم تسميته generate_2T−connected_graph سنوضّحهُ في الفقرة التالية:

- **توليد الدخل :**

قمنا بتصميم الإجراء generate_2T−connected_graph لتوليد بيان موجّه مجموعة عُقَده هي المجموعة $\{0,1,\dots,number_of_vertices-1\}$ يحقق خاصية 2−T− connected حيث ان number_of_vertices هو عدد عقد البيان.

في البداية يتم تحديد عدد بدائي للوصلات num_edges_before_satisfying_2Tc

إنّ عدد الوصلات num_edges_before_satisfying_2Tc قد لا يكون كافياً لتوليد بيان يحقق خاصية 2−T−connected . لذلك يتم توليد وصلات بشكل عشوائي حيث أن عدد هذه الوصلات يساوي num_edges_before_satisfying_2Tc ويتم إضافة هذه الوصلات إلى البيان. وفي حال كان البيان الناتج لا يحقق خاصية 2−T−connected تقوم الحلقة بإضافة عدد من الوصلات بشكل عشوائي حتى نحصل على بيان يحقق خاصية 2−T− connected ويكون عدد الوصلات النهائي هو num_edges_after_satisfying_2Tc .

Algorithm generate_2T_connected_graph

Input: number_of_vertices **and** num_edges_before_satisfying_2Tc

Output: a 2-T-connected graph (V, E) and the number of edges in this graph

$E \leftarrow \emptyset$

$V \leftarrow \{0,1,\dots,number_of_vertices-1\}$

$p \leftarrow 0$

while (p < num_edges_before_satisfying_2Tc) **do**

$u \leftarrow$ random integer between 0 and number_of_vertices − 1

do

$v \leftarrow$ random integer between 0 and number_of_vertices – 1

while $u = v$

if (u, v) is not an edge in E **then**

add (u, v) to E

$p \leftarrow p + 1$

num_edges_after_satisfying_2Tc← num_edges_before_satisfying_2Tc

while (V, E) **is** not 2-T-connected **do**

$u \leftarrow$ random integer between 0 and number_of_vertices − 1

do

v← random integer between 0 and number_of_vertices – 1

while $u = v$

if (u, v) is not an edge in E **then**

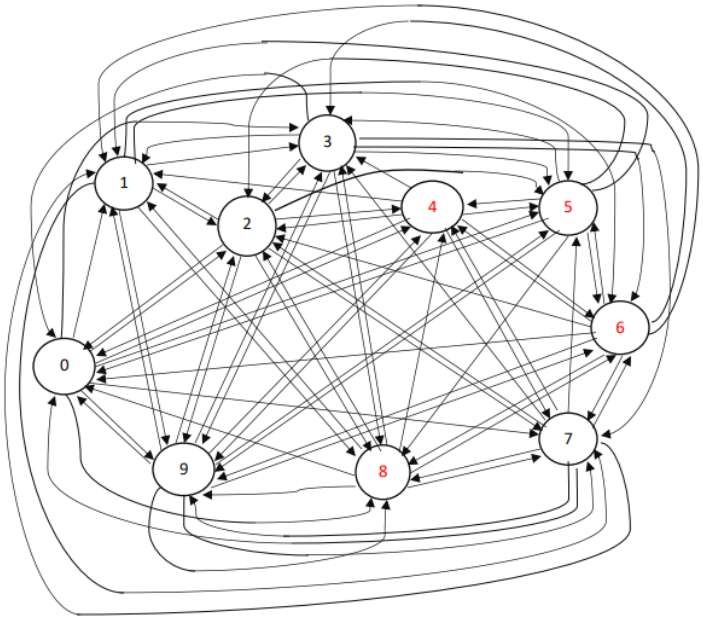
add (u, v) to E

num_edges_after_satisfying_2Tc ← num_edges_after_satisfying_2Tc + 1

return num_edges_after_satisfying_2Tc

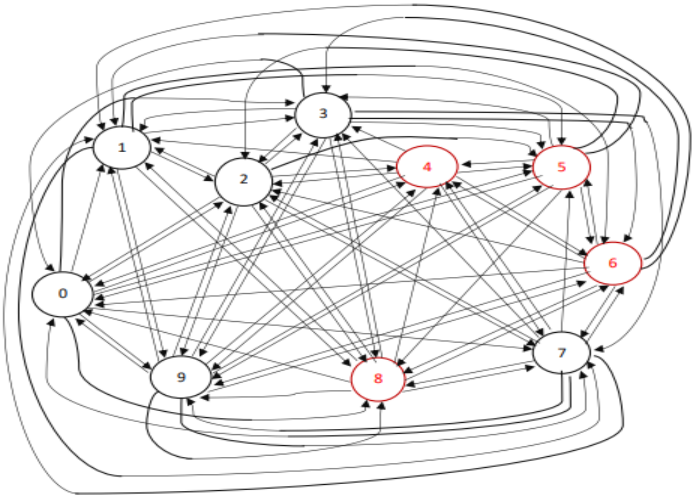
- **مثال يوضح خرج الخوارزميات المحققة:**

قمنا بتوليد بيان موجه يحقق خاصية 2−T−connected مكون من 10 عقد و 82 وصلة وقمنا برسمه في الشكل 8.



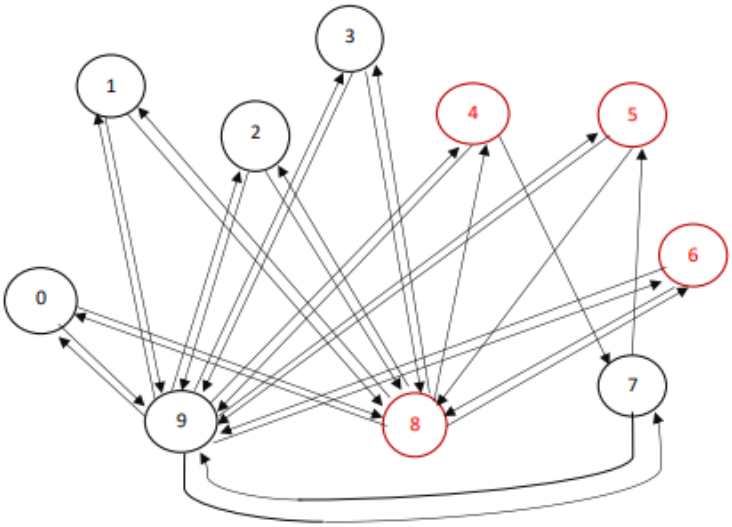
الشكل (8) بيان مضاعف الترابط للمجموعة T مكون من 10 عقد و82 وصلة

المجموعة T تتضمن 4 عقد تم تحديدها عشوائيا وفي هذا المثال كانت T={4,5,6,8} كما هو موضح في الشكل 9.



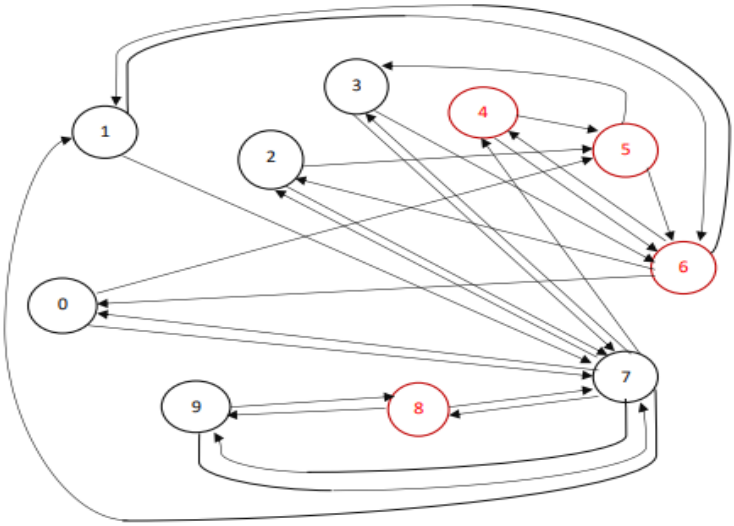
الشكل (9) المجموعة T={4,5,6,8}

عند تنفيذ الخوارزمية Find_ minimal 2−T−connected subgraph اصبح عدد وصلات النهائي للخرج هو 30 وشكل البيان كم هو موضح في الشكل (10):



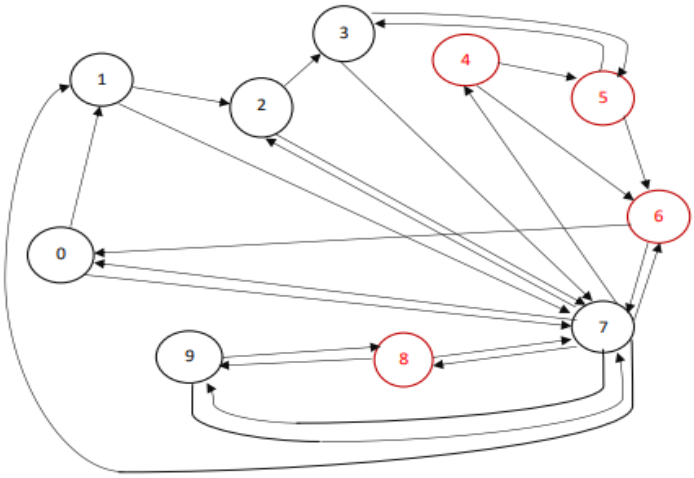
الشكل (10) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية Find_ minimal 2-T-connected subgraph

وعند تنفيذ الخوارزمية Three_phases_ minimal 2-T-connected subgraph على بيان الدخل كان البيان الناتج كما هو موضح في الشكل (11)
وعدد وصلات الخرج هو 27



الشكل (11) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية Three_phases_ minimal 2-T- connected subgraph

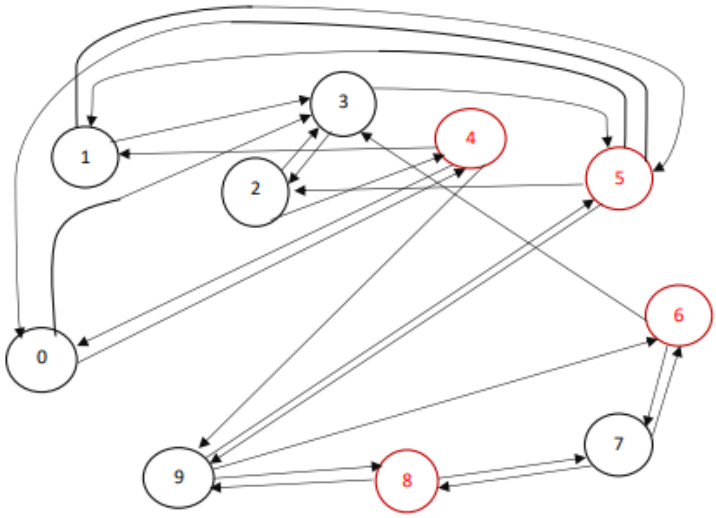
وفي الشكل التالي نلاحظ أن عدد وصلات الخرج النهائي عند تنفيذ خوارزمية four_phases_minimal_2Tconnected_graph هو 25



الشكل (12) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية

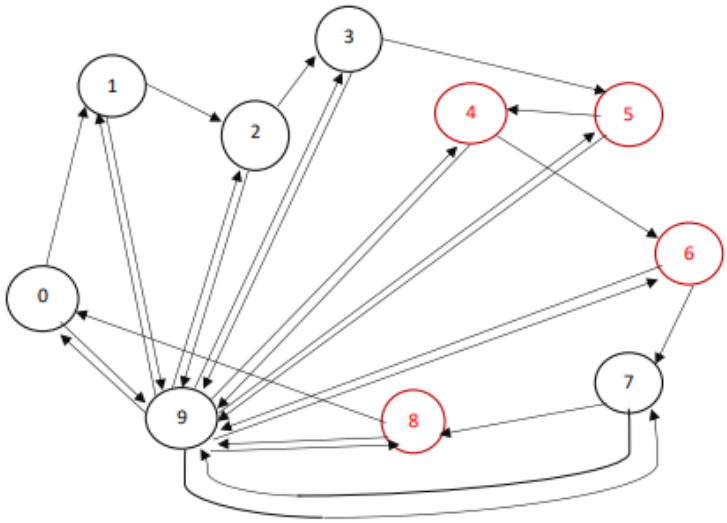
four_phases_minimal_2Tconnected_graph

وعند تنفيذ الخوارزمية Five_phases minimal 2−T−connected subgraph نلاحظ ان عدد وصلات الخرج النهائي هو24 كما هو واضح في الشكل (13) :



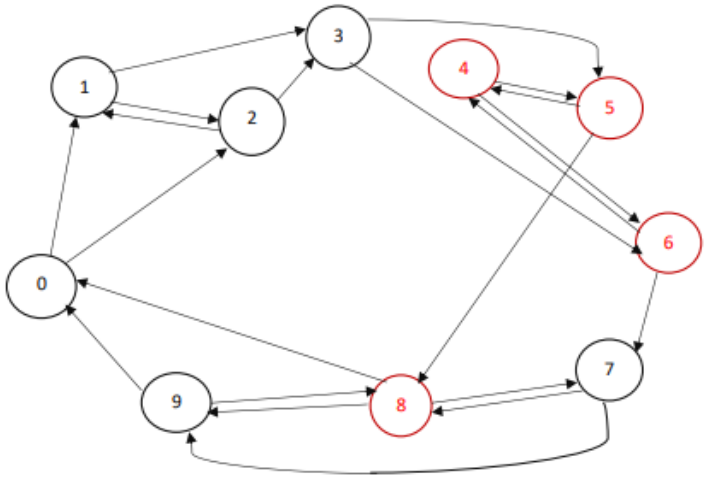
الشكل (13) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية Five_phases minimal 2-T-connected subgraph

عند تنفيذ الخوارزمية minimal_2Tconnected_graph_first_tree نلاحظ ان عدد وصلات الخرج النهائي 27 :



الشكل (14) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية
minimal_2Tconnected_graph_first_tree

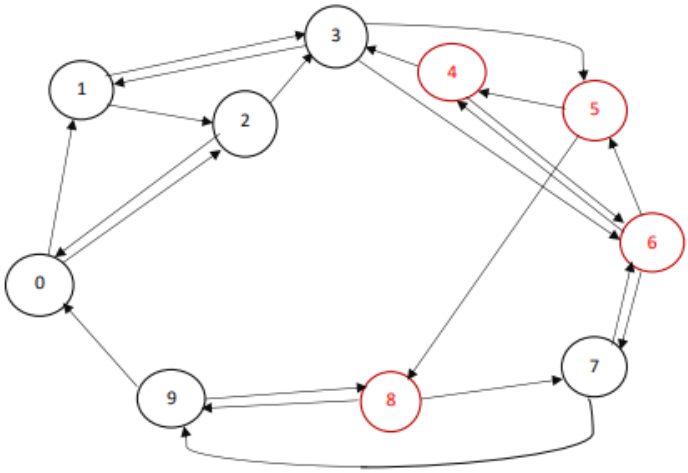
نلاحظ عند تنفيذ الخوارزمية minimal_2Tconnected_graph_double_trees عدد وصلات الخرج النهائي 21 :



الشكل (15) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية
minimal_2Tconnected_graph_double_trees

عند تنفيذ الخوارزميةminimal_2Tconnected_graph_double_trees_refined

نلاحظ ان عدد وصلات الخرج النهائي 22 :



الشكل (16) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية

minimal_2Tconnected_graph_double_trees_refined

تبين النتائج العملية للخوارزميات ان كل بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض يتضمن عدة عقد تحقق درجة دخولها ودرجة خروجها يساوي 2 . لاحظ ان الباحث Gevigney [3] قد برهن رياضيا انه يوجد عقدة على الأقل في كل بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected غير قابل للتخفيض تحقق درجة دخولها يساوي درجة خروجها يساوي 2.

في المثال الذي قمنا بعرضه نلاحظ انه ليس فقط عقدة وانما العديد من العقد التي تحقق درجة دخولها يساوي درجة خروجها تساوي 2.

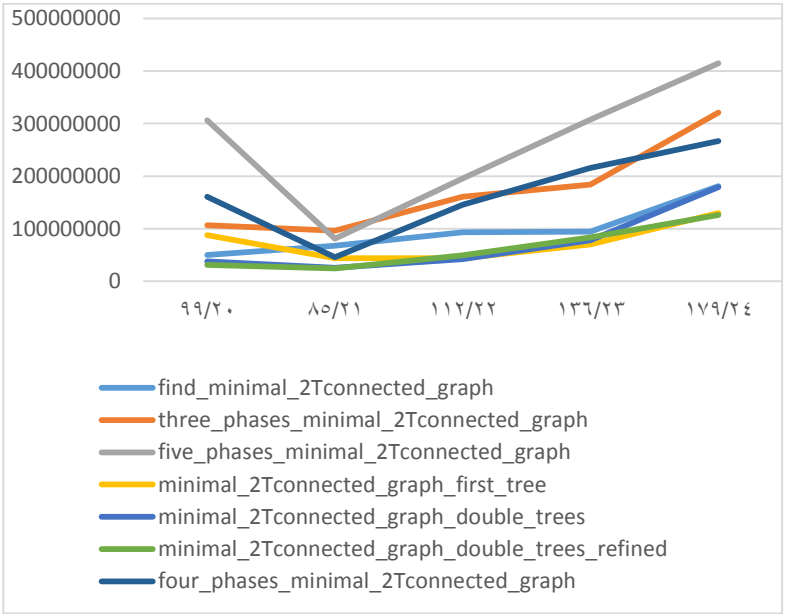
كما ان سبب انخفاض عدد الوصلات في خرج بعض الخوارزميات عن غيرها يعود الى ان الخرج يتضمن عقدة ذات درجة دخول او خروج اكبر من 2 ولكن الوصلات التي تتصل بهذه العقدة هي الوصلات الضرورية فقط للحفاظ على خاصية 2−T−connected ونلاحظ ان العقد التي تحقق هذه الميزة قد اختلفت من خوارزمية الى أخرى وان الخوارزميات التي انتجت اقل عدد من

الوصلات هي الخوارزميات التي نتج عنها عقد درجة دخولها او خروجها اكبر من 2 ولكن مجموع درجة الدخول والخروج لهذه العقد كان اقل من غيرها.

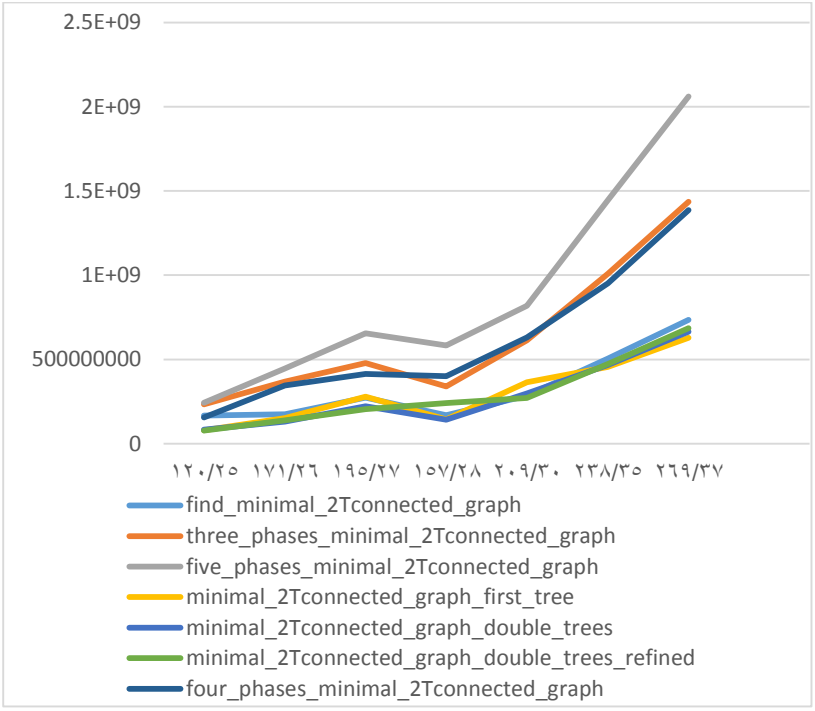
- **مقارنة الخوارزميات المحققة :**

_ **المقارنة من حيث زمن التنفيذ :**

تبين المخططات الموضحة من الشكل 17 وحتى الشكل 23 زمن تنفيذ الخوارزميات التي تم تحقيقها في هذا البحث. حيث ان المحور y يمثل زمن التنفيذ مقدراً ب nanosecond والمحور x يمثل $\frac{m}{n}=\frac{\text{عدد الوصلات}}{\text{عدد العقد}}$ وان جميع البيانات المذكورة في الشكلين قد تم توليدها عشوائيا وان المجموعة T قد تم توليدها عشوائيا أيضا لتتضمن أربعة عقد فقط.

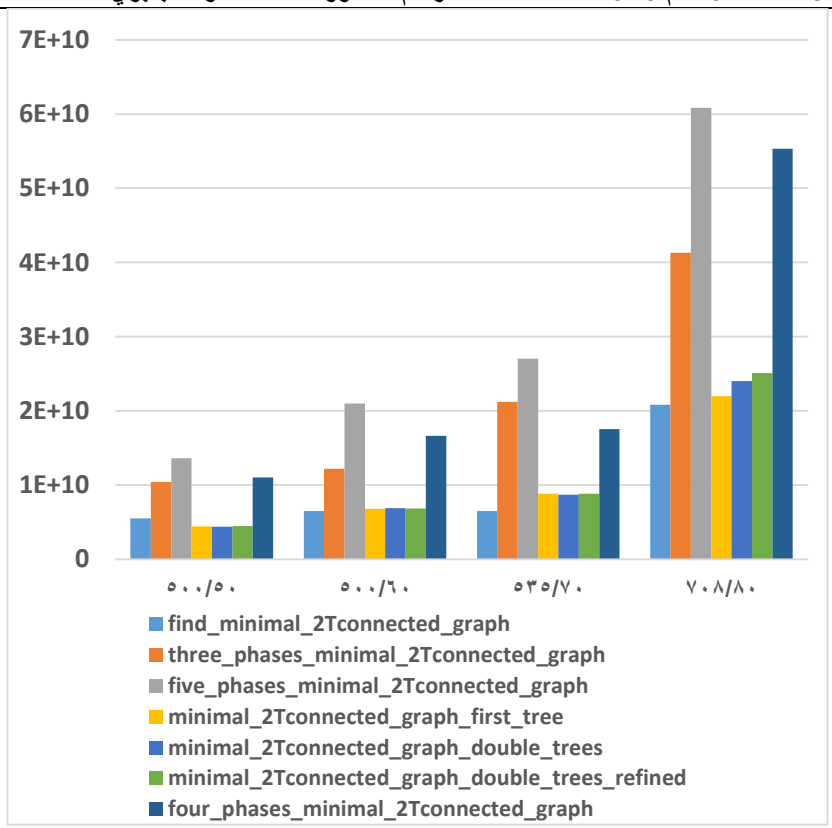


الشكل (17) زمن تنفيذ جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها وذلك من اجل مجال عقد يتراوح بين 20 و25 ومن اجل |T|=4

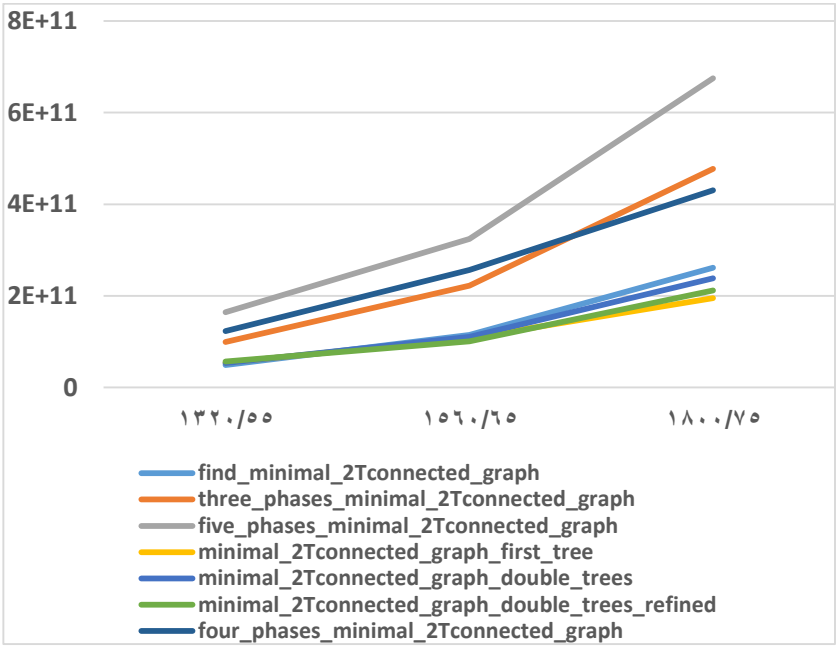


الشكل (18) زمن تنفيذ جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 25 و40 ومن اجل |T|=4

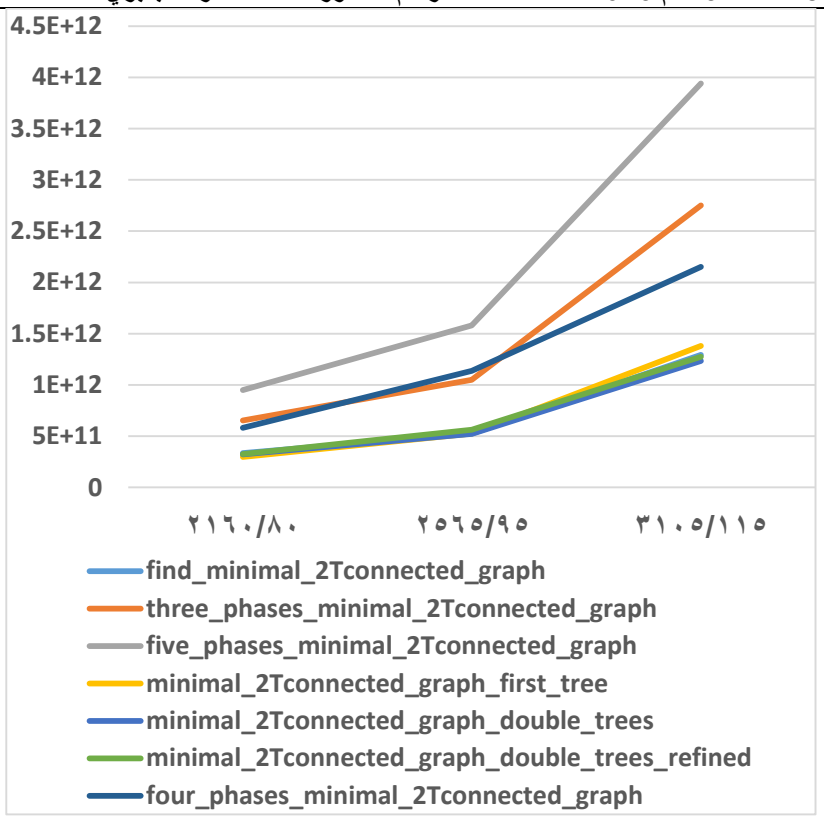
إن المخططات التالية تبين تجارب على عينات تصل حتى 200 عقدة ومن اجل قيم مختلفة لعدد الوصلات.



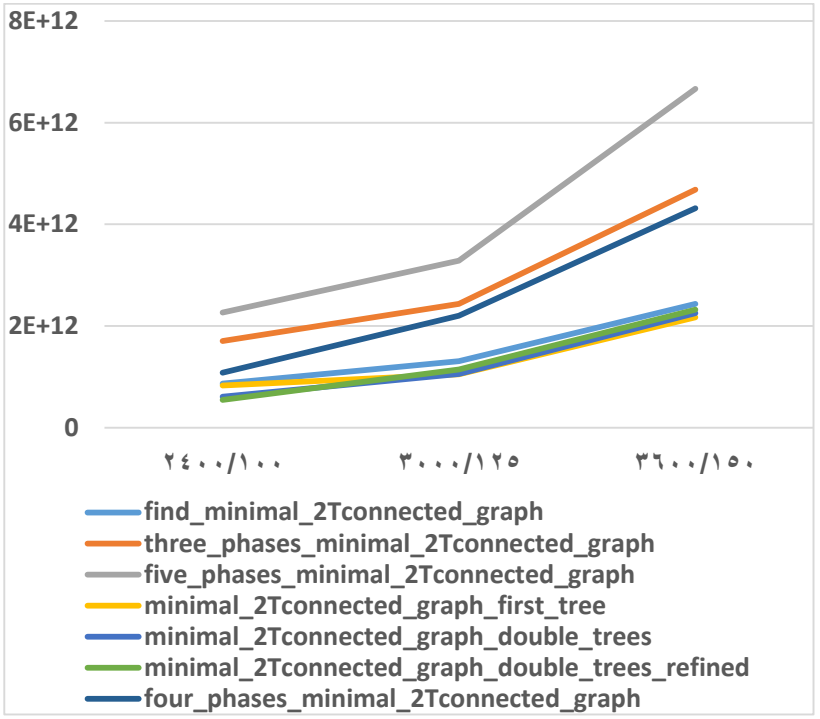
الشكل (19) زمن تنفيذ جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 50 و80 ومن أجل |T|=4 و int init_number_edges = 500



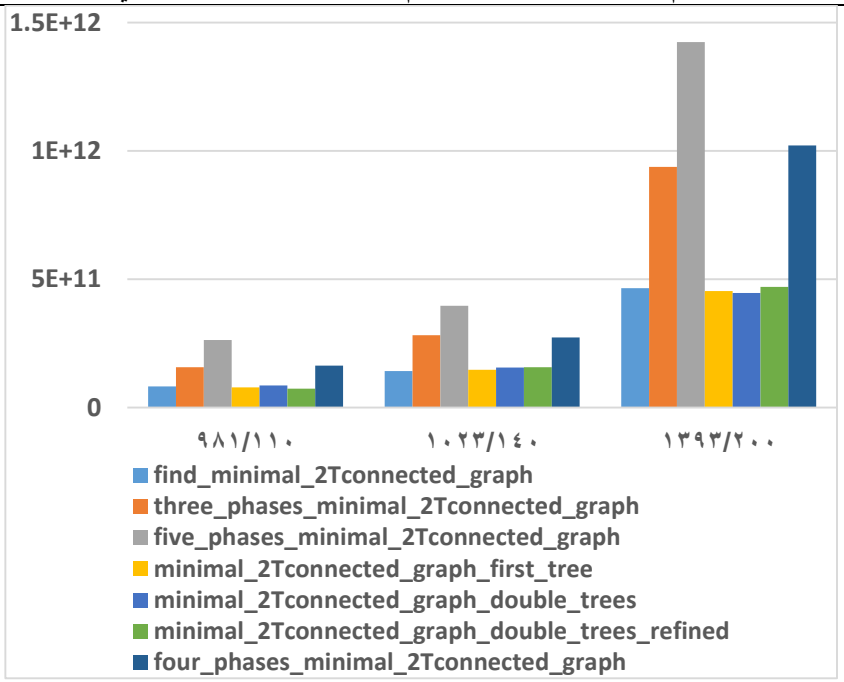
الشكل (20) زمن تنفيذ جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 55 و75 ومن اجل |T|=4 و int init_number_edges = number_vertices * 24



الشكل (21) زمن تنفيذ جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 80 و115 ومن اجل |T|=4 و int init_number_edges = number_vertices * 27



الشكل (22) زمن تنفيذ جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 100 و150 ومن اجل |T|=4 و int init_number_edges = number_vertices * 24



الشكل (23) زمن تنفيذ جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 110 و200 ومن اجل |T|=4 و int init_number_edges = 500

عند تجريب الخوارزميات المحققة على مجال عقد أكبر نلاحظ أن الفروقات بين الخوارزميات قد اتضحت أكثر حيث نلاحظ من المخططات السابقة تفوق واضح للخوارزميات:

minimal_2Tconnected_graph_first_tree ,

minimal_2Tconnected_graph_double_trees,

minimal_2Tconnected_graph_double_trees_refined

على بقية الخوارزميات من حيث زمن التنفيذ حيث ان الزمن الذي تطلبته لانجاز المهام كان اقل ، ونلاحظ أن خوارزمية five_phases_minimal_2Tconnected_graph تطلبت زمن تنفيذ أكثر من باقي الخوارزميات .

_ **المقارنة من حيث عدد وصلات الخرج:**

من اجل البيانات السابقة التي تم توليدها عشوائيا نوضح فيما يلي جودة الخوارزميات المحققة وذلك من خلال معرفة عدد وصلات خرج كل خوارزمية على كل بيان تم التجريب عليه.

four_phases_minimal_2Tconnected_graph	minimal_2Tconnected_graph_double_trees_refined	minimal_2Tconnected_graph_double_trees	minimal_2Tconnected_graph_first_tree	five_phases_minimal_2Tconnected_graph	three_phases_minimal_2Tconnected_graph	find_minimal_2Tconnected_graph	M	init_number_edges	N
42	42	43	43	45	44	44	99	76	20
47	45	45	44	45	47	46	85	84	21
46	47	49	49	49	49	53	112	92	22
50	49	49	51	51	50	54	136	101	23
55	52	52	58	54	58	66	179	110	24

الشكل (24) يبين عدد وصلات الخرج لكل خوارزمية

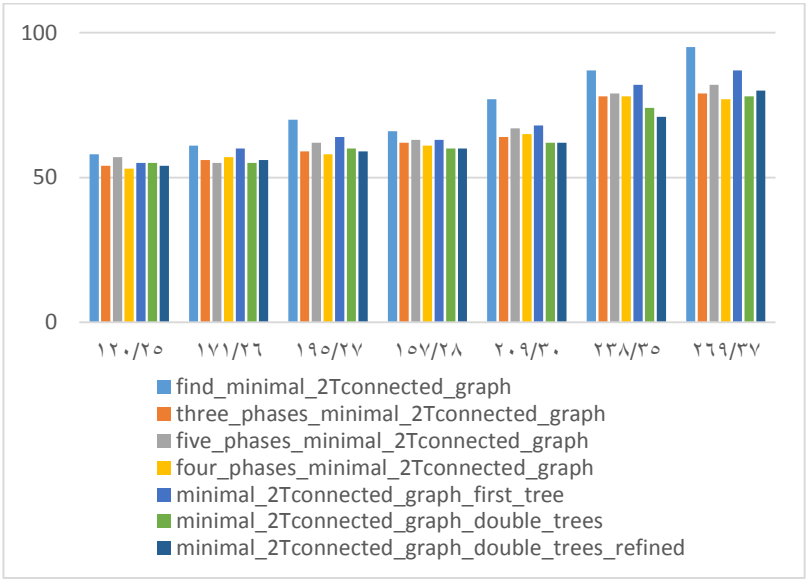
حيث 5/ (1 − number_vertices) * number_vertices = init_number_edges

نلاحظ من الشكل 24 ان عدد وصلات الخرج في جميع الخوارزميات المحققة لا يتجاوز ثلاثة اضعاف عدد العقد.

المخطط الموضح في الشكل 25 يبين عدد وصلات الخرج في الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 25و 40 ومن اجل |T|=4

init_number_edges = number_vertices * (number_vertices − 1) /5

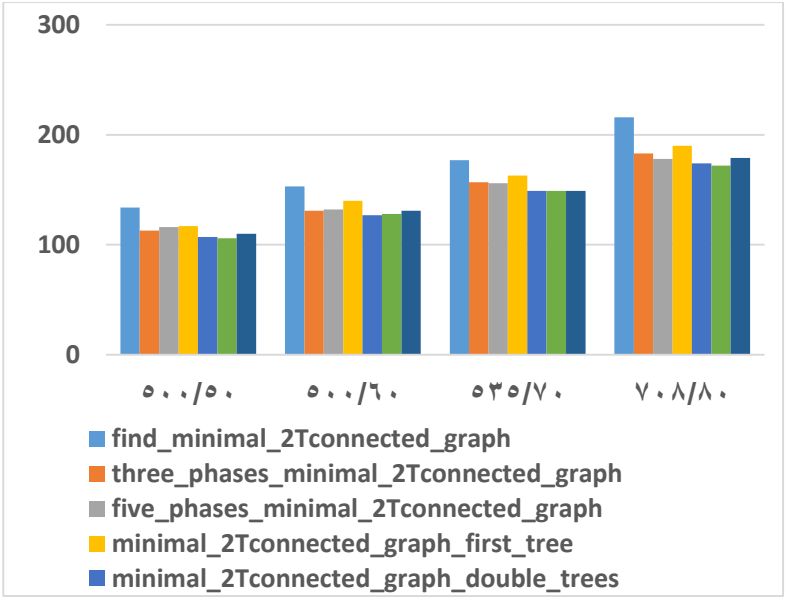
والمحور x يمثل $\frac{m}{n}$ =$\frac{\text{عدد الوصلات}}{\text{عدد العقد}}$



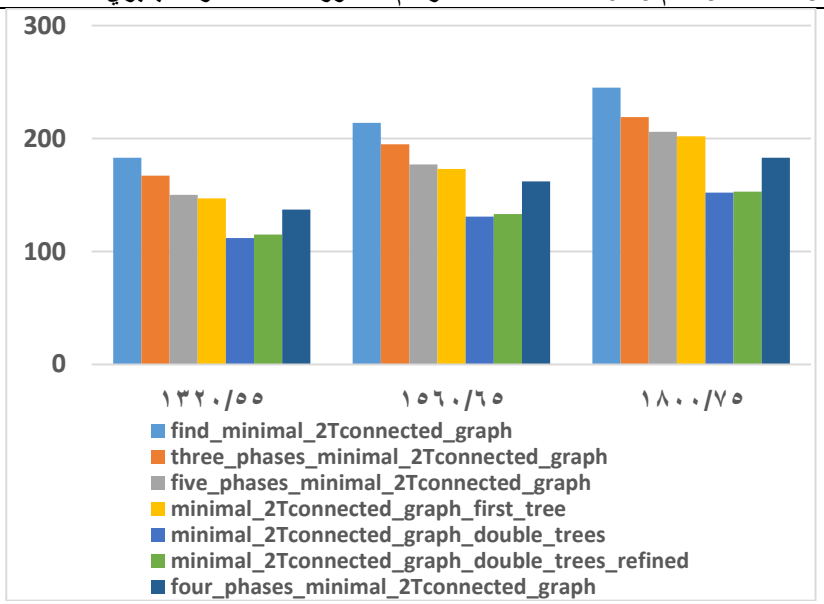
الشكل (25) عدد وصلات الخرج في الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 25 و 40

ومن اجل |T|=4

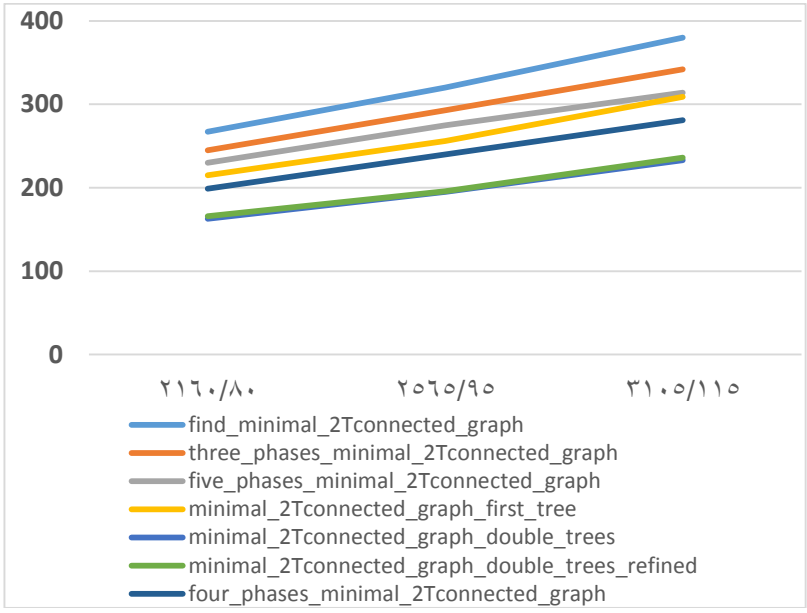
إن المخططات التالية تبين تجارب على عينات تصل حتى 200 عقدة ومن اجل قيم مختلفة لعدد الوصلات.



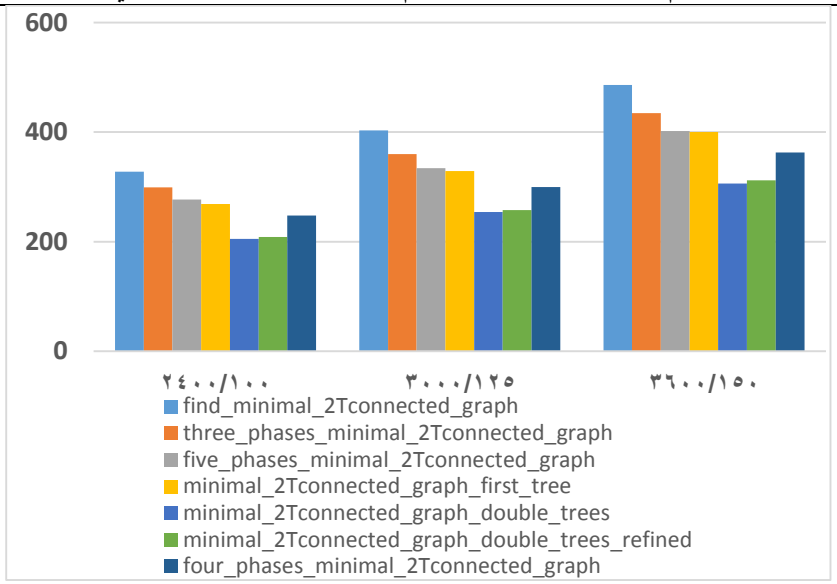
الشكل (26) عدد وصلات خرج جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 50 و80 ومن اجل |T|=4 و int init_number_edges = 500



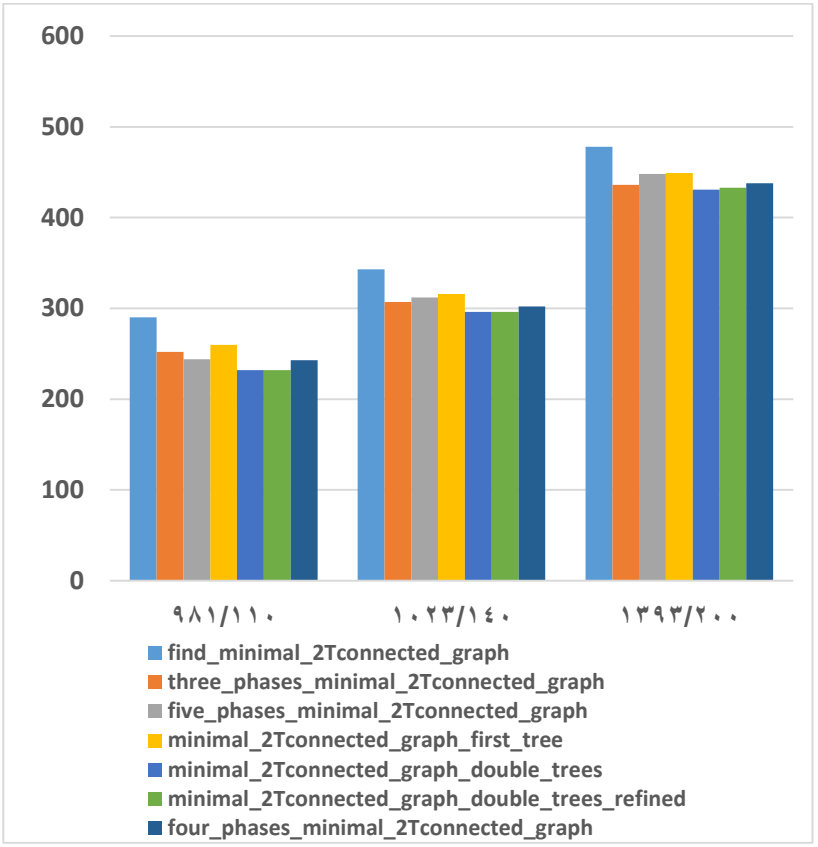
الشكل (27) عدد وصلات خرج جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 55 و75 ومن اجل |T|=4 و int init_number_edges = number_vertices * 24



الشكل (28) عدد وصلات خرج جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 80 و115 ومن اجل |T|=4 و int init_number_edges = number_vertices * 27



الشكل (29) عدد وصلات خرج جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 100 و150 ومن اجل |T|=4 و int init_number_edges = number_vertices * 24



الشكل (30) عدد وصلات خرج جميع الخوارزميات التي تم تحقيقها من اجل مجال عقد يتراوح بين 110 و200 ومن اجل |T|=4 و int init_number_edges = 500

عند تجريب الخوارزميات المحققة على مجال عقد أكبر نلاحظ أن الفروقات بين الخوارزميات قد اتضحت أكثر حيث نجد ان الخوارزميتين

minimal_2Tconnected_graph_double_trees ,

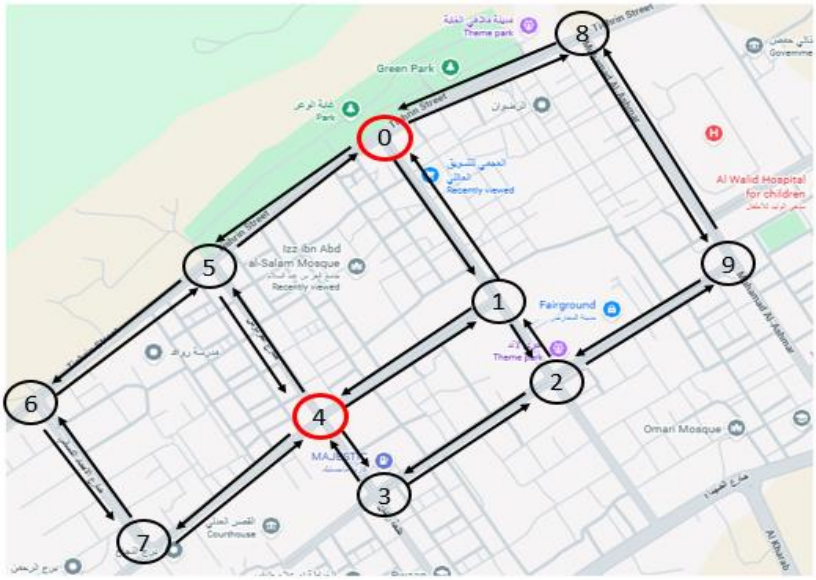
minimal_2Tconnected_graph_double_trees_refined

بمعظم الأحيان تعطي خرج افضل من غيرها من حيث عدد وصلات الخرج .

- **تجريب الخوارزميات على دخل حقيقي :**

إن البيان الموجّه الموضح في الشكل (31) الذي يمثل جزء من حي الوعر في حمص يحقق خاصية 2−T connected graph لأنه يحافظ على إمكانية الاتصال بقوة في حال حدوث عطل في وصلة وكما يحافظ على إمكانية الاتصال بقوة في حال فشل أي عقدة من عُقَد المجموعة T حيث T={0,4}. سنقوم باستخدام هذا البيان كبيان دخل لاختبار الخوارزميات التي صممناها حيث سيكون خرج هذه الخوارزميات هو بيان يحقق خاصية 2−T connected graph بأقل عدد ممكن من الوصلات .

إنّ البيانات الموجّهة في الأشكال (32) حتى (38) تمثل الخرج الناتج عن تطبيق الخوارزميات المحققة على بيان الدخل الموجود في الشكل (31).

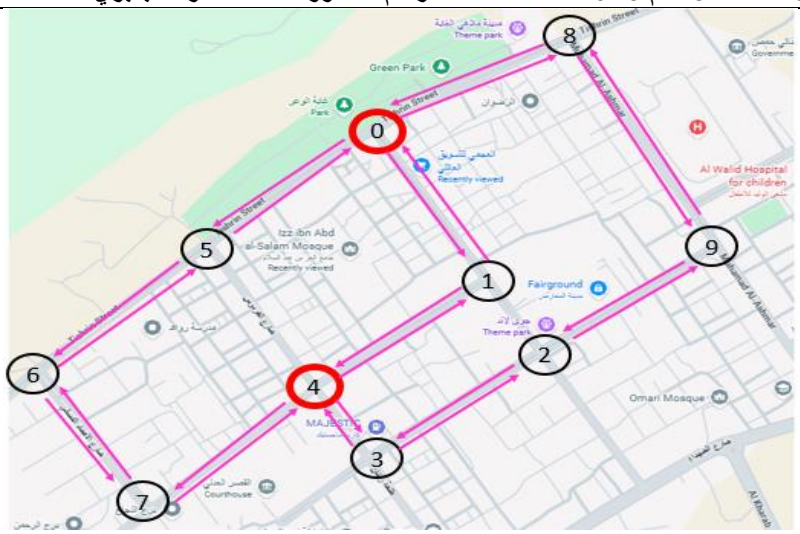


الشكل(31) بيان موجّه يمثل بيان دخل حقيقي

عند تنفيذ خوارزمية Find_ minimal 2−T−connected subgraph أصبح عدد الوصلات النهائي للخرج هو 22 وتطلبت زمن تنفيذ (11828600 nanosecond) والبيان الناتج موضّح في الشكل(32) .

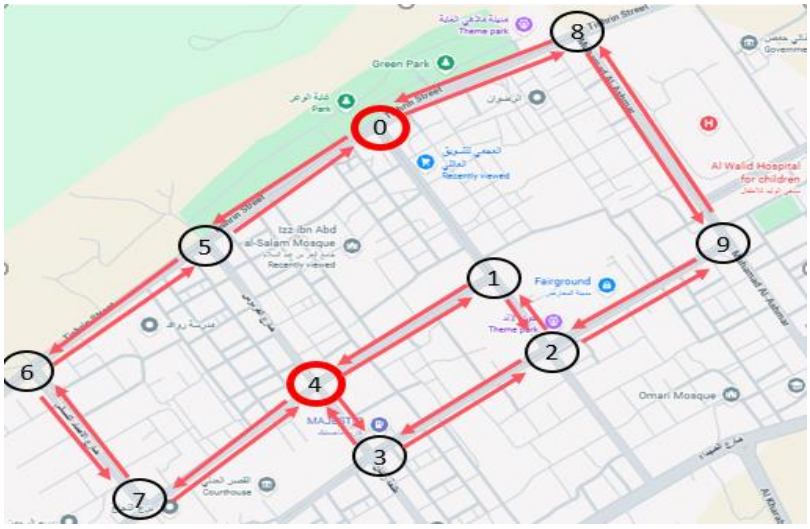
الشكل (32) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية Find_ minimal 2−T−connected subgraph

عند تنفيذ الخوارزمية Three_phases_ minimal 2−T−connected subgraph على بيان الدخل كان شكل البيان الناتج كما هو موضح في الشكل (33) وعدد وصلات الخرج هو 22 وزمن تنفيذ الخوارزمية هو (48336400 nanosecond).



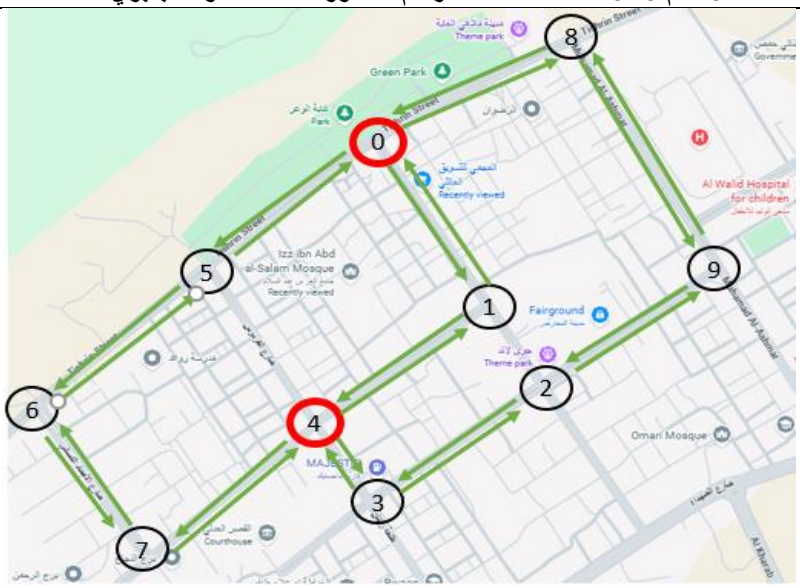
الشكل(33) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية Three_phases_ minimal 2-T- connected subgraph

وعند تنفيذ الخوارزمية Five_phases minimal 2-T-connected subgraph نلاحظ أن عدد وصلات الخرج النهائي هو 22 والبيان الناتج موضّح في الشكل (34) تطلبت زمن تنفيذ (58093300 nanosecond).



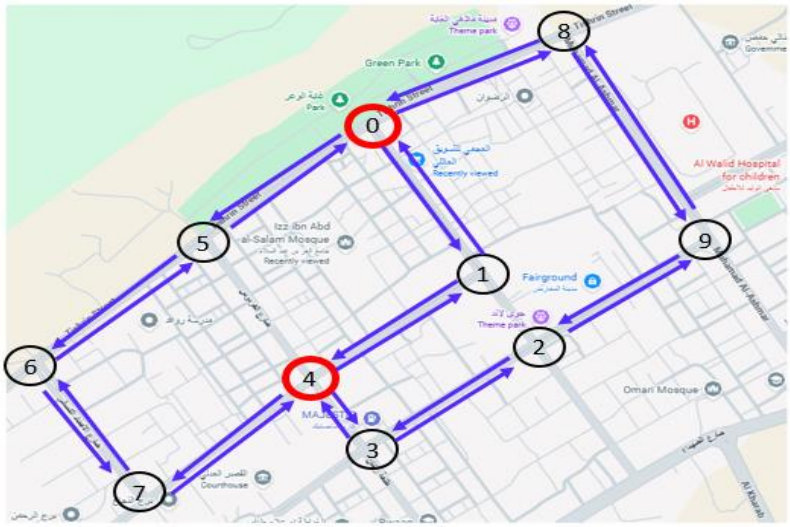
الشكل(34) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية Five_phases minimal 2-T- connected subgraph

عند تنفيذ الخوارزمية minimal_2Tconnected_graph_first_tree على بيان الدخل تطلبت زمن تنفيذ (14877100 nanosecond) وكان عدد وصلات الخرج النهائي هو 22 إن البيان الناتج موضّح في الشكل (35) .



الشكل(35) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية minimal_2Tconnected_graph_first_tree

يبين الشكل (36) خرج الخوارزمية minimal_2Tconnected_graph_double_trees وعدد وصلات الخرج النهائي هو22 وبزمن تنفيذ (5305300 nanosecond) .



الشكل(36) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية
minimal_2Tconnected_graph_double_trees

يبين الشكل (37) خرج خوارزمية
minimal_2Tconnected_graph_double_trees_refined ونلاحظ أن عدد وصلات الخرج النهائي هو22 وتطلبت زمن تنفيذ قدره (802300 nanosecond).

الشكل(37) بيان ناتج عن تطبيق
خوارزمية minimal_2Tconnected_graph_double_trees_refined

عند تنفيذ خوارزمية four_phases_minimal_2Tconnected_graph تطلبت زمن تنفيذ قدره (23971600 nanosecond) والبيان الناتج موضح في الشكل (38) وعدد وصلات الخرج النهائي هو 22 .

الشكل(38) بيان ناتج عن تطبيق خوارزمية
four_phases_minimal_2Tconnected_graph

6. الاستنتاجات والتوصيات :

قمنا بتصميم خوارزميات قادرة على إيجاد حلول تقريبية وخوارزميات معدلة لايجاد بيان جزئي محقق لخاصية 2−T−connected حيث تتضمن هذه الخوارزميات اكثر من مرحلة والهدف من هذه المراحل دراسة تأثير هذه المرحلة على شكل البيان الناتج وعدد وصلاته. لا شك ان وجود هذه المراحل سينعكس سلبا على زمن التنفيذ والفائدة الحقيقة هي تخفيض عدد وصلات الخرج وان تعقيد جميع الخوارزميات التي حققناها هو زمن كثير حدود. تبين النتائج العملية ان عدد وصلات الخرج هي اقل من أربعة اضعاف عدد العقد

برهنا رياضياً ان أي بيان غير قابل للتخفيض يحقق خاصية 2−T−connected يتضمن على الأكثر 12n وصلة عندما تكون |T|=4 كما يلي :

نظرية 1:

ليكن $G = (V, E)$ بيان يحقق خاصية 2−T−connected من اجل T حيث $|T| = 4$. عندئذ يوجد بيان جزئي (V, E_T) من هذا البيان بحيث ان هذا البيان الجزئي يحقق الشرطين التاليين :

1_ البيان الجزئي (V, E_T) يحقق خاصية 2−T−connected

2_ عدد وصلات E_T لا يتجاوز 12n

البرهان :

لتكن E_1 مجموعة من الوصلات ضمن البيان $G = (V, E)$ بحيث يحقق ما يلي :

(V, E_1) بيان قابل للتخفيض مضاعف الترابط وصلياً. ,لقد برهن ادمونس [23] ومادر [4] ان كل بيان مضاعف الترابط وصليا وغير قابل للتخفيض لا يمكن ان يتضمن اكثر من 4n وصلة . وبالتالي $|E_1| \leq 4n$

الآن سنقوم بتشكيل بيان جزئي متصل بقوة بعد حذف كل عقدة من العقد الموجودة في T

أي من اجل $T = \{ V_0, V_1, V_2, V_3 \}$

نشكل E_{V_0} بيان متصل بقوة بعد حذف العقدة V_0

E_{V_1} بيان متصل بقوة بعد حذف العقدة V_1

E_{V_2} بيان متصل بقوة بعد حذف العقدة V_2

E_{V_3} بيان متصل بقوة بعد حذف العقدة V_3

لاحظ انه يمكننا القيام بذلك من خلال DFS

وبالتالي

$$|E_{V_0}| \leq 2n - 2$$
$$|E_{V_1}| \leq 2n - 2$$
$$|E_{V_2}| \leq 2n - 2$$
$$|E_{V_3}| \leq 2n - 2$$

كما ان البيان الجزئي $(V,\ E_T \cup E_{V_0} \cup E_{V_1} \cup E_{V_2} \cup E_{V_3})$

هو بيان متصل يحقق خاصية 2−T−connected

أي البيان الجزئي الذي تتكون وصلاته من المجموعات E_T ,E_{V_0} , E_{V_1} , E_{V_2} , E_{V_3}

وبالتالي

$$| E_T \cup E_{V_0} \cup E_{V_1} \cup E_{V_2} \cup E_{V_3} | = |E_T| + |E_{V_0}| + |E_{V_1}| + |E_{V_2}| + |E_{V_3}| \leq 4n + 2n - 2 + 2n - 2 + 2n - 2 + 2n - 2 < 4n + 8n = 12n$$

وفقاً للنظرية السابقة اذا كان لدينا بيان غير قابل للتخفيض يحقق خاصية 2−T−connected فإنه يمكننا الحصول على بيان حزئي منه يحقق خاصية 2−T−connected بحيث ان عدد وصلاته لا يتجاوز 12n

ولكن لاحظ ان هذا البيان الجزئي يحقق شروط البيان الجزئي المضاعف الترابط للمجموعة T وغير قابل للتخفيض . وبالتالي نلاحظ انه يتطابق معه وعليه فإن عدد وصلات أي بيان غير قابل للتخفيض لا يمكن ان يتجاوز 12n .

نستنتج مما سبق أنه اذا كان $G = (V, E)$ بياناً يحقق خاصية 2−T−connected من أجل T حيث $|T| = 2$. عندئذ يوجد بيان جزئي (V, E_T) من هذا البيان بحيث إن هذا البيان الجزئي يحقق الشرطين الآتيين :

1_ البيان الجزئي (V, E_T) يحقق خاصية 2−T−connected

2_ عدد وصلات E_T لا يتجاوز 8n.

نظرية 2:

ان الخوارزميات التي تنتج بيان جزئي غير قابل للتخفيض ويحقق خاصية 2−T−connected هي خوارزميات قادرة على إيجاد حل تقريبي لا يتجاوز ستة اضعاف الحل المثالي عندما تكون |T|=4 (أي ان عامل تقريبها 6)

البرهان :

وفقاً للنظرية 1 ان خرج هذه الخوارزميات هو بيان جزئي لا يمكن ان يتضمن اكثر من 12n وصلة .

كما ان أي حل مثالي يتضمن على الأقل 2n وصلة لان كل عقدة لها indegree و outdegree لا يقل عن 2 لان درجة دخول كل عقدة يجب الا تقل عن 2 لان البيان مضاعف الترابط وصليا.

وبالتالي فان عامل التقريب هو :

$$\frac{\text{عدد وصلات بيان غير قابل للتخفيض يحقق } 2-\mathrm{T}-\text{connected}}{\text{عدد وصلات الحل المثالي}} = \frac{12n}{2n} = 6$$

نستنتج أيضاً أن الخوارزميات التي تنتج بياناً جزئياً غير قابل للتخفيض ويحقق خاصية 2−T− connected هي خوارزميات قادرة على إيجاد حل تقريبي لا يتجاوز أربعة أضعاف الحل المثالي عندما تكون |T|=2 (أي أن عامل تقريبها 4)

يمكن تعميم البرهان السابق لبرهان أن عامل التقريب في الحالة العامة مهما يكن عدد عقد T هو |T|+2 لأن البيان الغير قابل للتخفيض والمضاعف الترابط للمجموعة T يتضمن على الأكثر 2|T|+4 وصلة.

لاحظ ان النتائج العملية للخوارزميات تشير الى عامل تقريب افضل من 6 (أي اقل من العدد 6)

نظرية 3 :

ليكن (V, E) بياناً موجّهاً يحقق خاصية 2−T−connected من أجل مجموعة عقد $T \subseteq V$. عندئذٍ يوجد بيان جزئي (V, E_T) من هذا البيان بحيث أن هذا البيان الجزئي يحقق خاصية 2−T−connected وبحيث أن $|E_T| \leq 12n$

البرهان :

لقد أثبت جابري في [27] أنه يمكن تشكيل بيان جزئي (V, E_1) من البيان (V, E) بحيث أن (V, E_1) متصل بقوة والعقد المفصلية القوية في البيان الجزئي (V, E_1) تتطابق مع العقد المفصلية القوية للبيان (V, E) وأن عدد الوصلات $|E_1|$ لا يتجاوز 8n حيث اننا نقول عن عقدة انها عقدة مفصلية قوية اذا كان حذفها يؤدي إلى فقدان خاصية الاتصال بقوة للبيان (V, E).
لاحظ أن المجموعة T لا يمكن أن تتضمن أي عقدة مفصلية قوية لأن حذف أي عقدة منها لا يؤثر على خاصية الاتصال بقوة .

نعلم أيضاً من نتائج مادر [4] وأدمونس [23] أنه يوجد مجموعة جزئية $E_2 \subseteq E$ بحيث أن البيان الجزئي (V, E_2) مضاعف الترابط وصلياً (2−edge−connected) وغير قابل للتخفيض وبحيث أن $|E_2| \leq 4n$.

لاحظْ أن البيان الجزئي $(V, E_1 \cup E_2)$هو بيان متصل بقوة ويحقق ما يأتي:

1− من أجل أي وصلة $e \in (E_1 \cup E_2)$ فإن البيان الجزئي $(V, (E_1 \cup E_2) \backslash \{e\})$ هو بيان متصل بقوة .

2− العقد المفصلية القوية في البيان الجزئي$(V, E_1 \cup E_2)$ تتطابق مع العقد المفصلية القوية للبيان (V, E) .

وبما أن T لا يمكن أن تتضمن أي عقدة مفصلية قوية وبالتالي فإن البيان الجزئي $(V, E_1 \cup E_2)$ يحقق خاصية 2−T−connected كما أن عدد وصلات هذا البيان الجزئي هو

$$|E_1 \cup E_2| \leq |E_1| + |E_2| \leq 8n + 4n = 12n$$

من النظرية السابقة نستنتج أن جميع الخوارزميات التقريبية المقترحة في هذا البحث بعامل تقريب 6 في الحالة العامة مهما كان عدد العقد ضمن المجموعة T.

انطلاقاً من النتائج الجيدة التي تم الحصول عليها في هذا البحث يمكننا اقتراح مجموعة من النقاط مثل تصميم وتطوير خوارزميات معدلة أخرى للحصول على نتائج جيدة ايضاً يمكن الاستفادة من البرهان الرياضي المطروح لما له من قدرة على دعم بناء استنتاجات جديدة.

7. المراجع:

[1] Garey, M. R., & Johnson, D. S. (1979). Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness. San Francisco, CA: W. H. Freeman.

[2] Cheriyan, J., Thurimella, R. 2000, Approximating minimum-size k-connected spanning subgraphs via matching, SIAM J. Comput., 30(2), 528-560.

[3] Durand de Gevigney, O., & Szigeti, Z. (2018). On minimally 2-T-connected directed graphs. Discrete Applied Mathematics, 250, 183-185.

[4] Mader, W. (1985). Minimal n-fach zusammenhängenden Digraphen. Journal of Combinatorial Theory, Series B, 38(1), 102-117.

[5] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2022). Introduction to algorithms (4th ed.). MIT Press.

[6] Dandeh, A. (2021). Minimum 2-vertex strongly connected spanning subgraph problem (Master's thesis, Tishreen University, Syria).

[7] Alkinj, N. (2023). Approximation algorithms for calculating a 2-edge-connected directed subgraph of minimum size (Master's thesis, Tishreen University, Syria).

[8] Georgiadis, L., Italiano, G. F., & Karanasiou, A. (2020). Approximating the smallest 2-vertex connected spanning subgraph of a directed graph. Theoretical Computer Science, 807, 185–200. https://doi.org/10.1016/j.tcs.2019.09.028

[9] Firmani, D., Georgiadis, L., Italiano, G. F., Laura, L., & Santaroni, F. (2016). Strong articulation points and strong bridges in large scale graphs. Algorithmica, 74(3), 1123–1147.

[10] Jaberi, R. (2021). Minimum 2-vertex strongly biconnected spanning directed subgraph problem. Discrete Mathematics Letters, 7, 40–43.

[11] Wu, Z., & Grumbach, S. (2010). Feasibility of motion planning on acyclic and strongly connected directed graphs. Discrete Applied Mathematics, 158(9), 1017–1028. https://doi.org/10.1016/j.dam.2009.12.011

[12] Mader, W. (2002). On vertices of outdegree n in minimally n-connected digraphs. Journal of Graph Theory, 39(2), 129–144. [13] Tarjan, R. E. (1972). Depth-first search and linear graph algorithms. SIAM Journal on Computing, 1(2), 146–160.

[14] Hörsch, F., & Szigeti, Z. (2023). The complexity of 2-vertex-connected orientation in mixed graphs. Discrete Optimization, 48(1), 100774.

[15] Habib, A. (2023). An experimental study of approximation algorithms for minimum 2-vertex strongly biconnected spanning directed subgraph problem (Master's thesis, Tishreen University, Syria).

[16] Nuutila, E., & Soisalon-Soininen, E. (1994). On finding the strongly connected components in a directed graph. Information Processing Letters, 49(1), 9–14.

[17] Gabow, H. N. (2000). Path-based depth-first search for strong and biconnected components. Information Processing Letters, 74(3–4), 107–114.

[18] Tarjan, R. E. (1972). Depth-first search and linear graph algorithms. SIAM Journal on Computing, 1(2), 146–160. https://doi.org/10.1137/0201010

[19] Mehlhorn, K., Näher, S., & Sanders, P. (2017). Engineering DFS-based graph algorithms. arXiv preprint arXiv:1703.10023.

[20] Sanders, P., Mehlhorn, K., Dietzfelbinger, M., & Dementiev, R. (2019). Sequential and parallel algorithms and data structures (1st ed.).

Cham: Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25209-0

[21] Italiano, G. F., Laura, L., & Santaroni, F. (2012). Finding strong bridges and strong articulation points in linear time. Theoretical Computer Science, 447, 74–84.

[22] Georgiadis, L. (2010). Testing 2-vertex connectivity and computing pairs of vertex-disjoint s-t paths in digraphs. In S. Abramsky, C. Gavoille, C. Kirchner, F. M. auf der Heide, & P. Spirakis (Eds.), Proceedings of the 37th International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP 2010) (pp. 433–442). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14165-2_37

[23] Edmonds, J. (1972). Edge-disjoint branchings. In R. Rustin (Ed.), Proceedings of the Conference on Combinatorial Algorithms (pp. 91–96). New York: Algorithmics Press.

[24] Georgiadis, L. (2011). Approximating the smallest 2-vertex connected spanning subgraph of a directed graph.In C. Demetrescu & M. Halldórsson (Eds.), Proceedings of the 19th Annual European Symposium on Algorithms (ESA 2011) (pp. 13–24). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23719-5_2

[25] Georgiadis, L., Italiano, G. F., & Karanasiou, A. (2020). Approximating the smallest 2-vertex connected spanning subgraph of a directed graph. Theoretical Computer Science, 807, 185–200. https://doi.org/10.1016/j.tcs.2019.09.028

[26] Menger, K. (1927). Zur allgemeinen Kurventheorie. *Fundamenta Mathematicae, 10*, 96–115.

[27] Jaberi, R. (2015). Computing the 2-blocks of directed graphs. *RAIRO - Theoretical Informatics and Applications, 49*(2), 93–119.

تصميم وحدة التخزين المؤقت في موجه الشبكات ضمن الرقاقة غير المتزامنة القائمة على المنطق NCL

اعداد : م. رهف المصطفى اشراف : أ. د. عبد الله غندور ، د. نبيل دحدوح

الملخص

تُستخدم الشبكة ضمن الرقاقةNOC (Network on Chip) للتواصل ونقل البيانات في الأنظمة ضمن الرقاقة متعددة النواة، نظراً لمزاياها مقارنة بالبنى المعتمدة على خطوط النقل فقط، وخاصةً مع صغر حجم الترانزستور وزيادة تعقيد الدارات. يمكن تنفيذ الشبكة NoC بشكل متزامن، أو غير متزامن، أو عالمياً غير متزامن، ومحلياً متزامن GALS (Globally Asynchronous,Locally Asynchronous). إن أداء التصميم المتزامن محدود بمعدل الساعة المركزية الذي يعتمد على أبطأ مسار حرج(أسوأ حالة) مما يجعل من الضروري تحسين جميع أجزاء التصميم، بينما يتجنب التصميم غير المتزامن مشاكل انحراف الساعة وتوزعها على الرقاقة، ويتيح مرونة في تحسين أجزاء النظام بشكل مستقل عن بعضها، كونه لا يعتمد على أداء أسوأ حالة، وبالتالي فهو يقدم أداءً أفضل من حيث التأخير على عكس نظيره المتزامن، كما يتميز أيضاً باستهلاك منخفضللطاقة. تُعد وحدات التخزين المؤقت أحد الأجزاء الأساسية في موجهات الشبكة ضمن الرقاقة على اختلاف أشكالها وبغض النظر عن آلية التزامن المعتمدة فهي تلعب دور مهم في الحفاظ على البيانات من الضياع وتتحكم بتدفقها ضمن الشبكة.

في هذا البحث، تم الاستفادة من مزايا منطق الاتفاقية الفارغة NCL(Null Convention Logic) وهو منطق غير متزامن شبه غير حساس للتأخير بهدف تصميم بنية جديدة لوحدة التخزين المؤقت المستخدمة في موجه الشبكات ضمن الرقاقة تشبه في مبدأ عملها وحدة التخزين FIFO (First–In–First–Out) ولكنها تقدم أداءً أفضل من حيث استهلاك الموارد والسرعة والتأخير حيث تُظهر النتائج أن البنية الجديدة تستهلك موارد أقل بنسبة 50% مقارنةبنية الـ FIFO، مع تحسن بزمن التأخير بمتوسط نسبة30% تقريباً من أجل السعات التخزينية الصغيرة.

الكلمات المفتاحية: الشبكات ضمن الرقاقة، الدارات غير المتزامنة، FIFO، وحدة التخزين المؤقت، المسجل، منطق الاتفاقية الفارغة.

Abstract

Network on Chip is employed for on-chip communication in multicore System-on-Chips for its advantages over bus-based architectures, more so with reducing feature size. The NoC implementation can be synchronous, asynchronous or Globally Asynchronous Locally Synchronous (GALS). However, synchronous design performance is limited by the global clock rate and depends on the slowest critical path, making it indispensable to optimize all portions of the design. Asynchronous design avoids clock skew and clock distribution issues on the chip and allows flexibility in the optimization of the rarely used portions of the system. Along with the benefit of reduced power consumption, they perform better in terms of delays, yielding average-case performance, as opposed to the worst-case performance yielded by the synchronous counterpart.

One of the integral parts of NoC routers is buffers, they play an important role in saving data from loss and controlling its flow within the network.In this paper, we proposeda new buffer structure for NOC router,that isa shift register block implemented using NULL convention Logic operates in a way that is identical to aFIFO but offers better performance in terms of resource consumption, speed, and latency.

Keywords:networks on chip, Asynchronous circuit, Null Convention Logic, buffer, RegisterFile.

1.المقدمة:

يُعرف نموذج الشبكة ضمن الرقاقة (NoC) بأنه المنهجية المتبعة في حل مشكلة ضيق النطاق الترددي للربط التقليدي ضمنالرقاقة [1]، [2]،ولكن على الرغم من مزاياه العديدة المحتملة، مثل معدل الإنتاجية العالي، وزيادة قابلية التوسع، وتعدد الاستخداماتبالإضافة إلى كفاءة جيدة في إدارة الطاقة، إلا أن نموذج NoC يجب أن يتعامل مع التعقيد المتزايدلتوزيع إشارات الساعة والتزامن عبر الرقاقات ذات المساحة الكبيرة.

مع تزايد المشاكل المتعلقة بالتزامن في مجال الشبكات ضمن الرقاقة ظهر النهج غير المتزامن كمحاولة للتخلي عن قيادة الساعة المركزية والمزامنة باستخدام أشارات مصافحة محلية تتحكم بتدفق البيانات ضمن الشبكة.

على مدى العقود القليلة الماضية، طورت العديد من الجامعات والهيئات الصناعية [3–6] بنى لموجهات الشبكات ضمن الرقاقة باستخدام تقنيات رقمية غير متزامنة لمعالجة المشاكل المتعلقة بتوزيع إشارة الساعة والاستفادة من المزايا العامة للتصميم غير المتزامن مقارنةً بالتصميم المتزامن التقليدي من خلال إمكانية تقليل استهلاك الطاقة، وتحسين الأداء باعتماد التأخير الفعلي للمكونات بدلاً من تأخير المسار الحرج. حيث تُظهر التقنيات غير المتزامنة، وخاصةً الدارات غير الحساسة للتأخير، سلوكًا بطبيعته يعتمد على الأحداث [7]،فهي تستهلك الطاقة فقط عند الحاجة إلى التبديل أي عند وجود بيانات بحاجة للمعالجة. يوجد حالياً نموذجين للتصميم غير المتزامن[8] هما نموذج التأخير المحدود، والنموذج غير الحساس للتأخير، ويندرج التصميم باستخدام منطق الاتفاقية الفارغةNCL [7] ضمن النماذج غير الحساسة للتأخير .

يعتبر الموجه هو العنصر الأساسي في الشبكات ضمن الرقاقة يمكن من خلاله توجيه البيانات ضمن الشبكة لتصل إلى الوجهة المحددة لها،ولتقليل فقدان البيانات في حالة تدفقات البيانات المتعددة، فإن معظم بنى الموجهات على اختلاف تصاميمها تحتوي على وحدات تخزين مؤقت

مُهيأة عند منافذ الدخل أو الخرج، ويعد استخدام وحدة التخزين "الداخل أولاً الخارج أولاً" (FIFO) واحدة من أكثر الطرق كفاءةً واستخداماًفي هذا المجال[9].

نقدم ضمن هذا البحث تصميم جديد لوحدة التخزين المؤقت المستخدمة ضمن الموجهات غير المتزامنة القائمة على المنطق NCL. يستند التصميم إلى ملاحظة أن سلسلة مسجلات الإزاحة SR (shift-register) المصممة باستخدام المنطق NCL تُشبه إلى حد كبير بمبدأ عملهاوحدة التخزينFIFO غير المتزامنة، حيث تنتشر بيانات الدخل عبر الدارة بأكملها حتى تصل إلى نهاية السلسلة، أي تمتلئ البيانات من طرف الخرج إلى الخلف باتجاه الدخل وبالتالي يمكنمن خلال الاستخدام الدقيق لبنية المسجلSR القائمة على المنطق NCLتحسين أداء وحدةالتخزين المؤقت.

يُنظَّم الجزء المتبقي من هذا البحث على النحو التالي: يوضح القسم الأول هدف البحث ويعرض أحدث الدراسات في مجال تصميم وحدة التخزين المؤقت المستخدمة في الشبكات ضمن الرقاقة غير المتزامنة، ويتناول القسم الثاني المبادئ الأساسية للمنطق غير المتزامن، ويُبيِّن أسلوب تصميم المنطقNCL، بينما يصف القسم الثالث بنية وحدة التخزين المؤقت FIFOالمستخدمة في الشبكات ضمن الرقاقة غير المتزامنة،ويُبيِّن القسم الرابع تصميم وحدة التخزين باستخدام سلسلة المسجلات وآلية عملها،ويعرض القسم الخامس نتائج المقارنة والتحليل بين البنيتين. وأخيرًا، في القسم السادس نختتم البحث ونُحدِّد الأعمال المستقبلية.

1.1. هدف البحث:

حالياً أصبحت الشبكات جزء أساسي في الأنظمة ضمن الرقاقة لما تقدمه من مزايا من حيث زيادة الإنتاجية وتقليل التأخير وتنظيم تدفق البيانات وغيرها، ولكن أغلب الأنظمة تميل إلى تقليل الموارد المستهلكة من قبل الشبكة وتحسين أداءها كون ذلك يعود بالأثر على أداء كامل النظام. تعتبر وحدات التخزين المؤقت جزء أساسي في موجه الشبكات ضمن الرقاقةعلى اختلاف أشكالها وطبولوجياتها للحفاظ على البيانات من الضياع وتنظيم تدفقها.

يهدف هذا البحث إلى الاستفادة من مزايا المنطق NCL في تصميم وحدة تخزين مؤقت تعمل بشكل مشابه لوحدة التخزين المؤقت FIFO المستخدمة بأغلب تصاميم موجهات الشبكات ضمن الرقاقة، ولكنها أقل استهلاكاً للموارد وتحقق تحسناً بزمن التأخير من أجل السعات التخزينية

الصغيرة، وهذا بدوره يؤدي إلى تحسين أداء الموجه القائم على المنطق NCLوتقليل استهلاكه للموارد.

2.1. دراسات سابقة:

منذ بداية القرن الحادي والعشرين، ومع تزايد تعقيد الدارات المتكاملة ظهرت الشبكات ضمن الرقاقة (NOC) كحل بديل للاتصالات ضمن الرقاقةالقائمة على الناقل (Bus) حيث كانت أغلب تصاميم هذه الشبكات في البداية متزامنة، ولكن مع زيادة توسع الرقاقة وتعقيد الأنظمة أصبح أداءهاأقل فعالية مما دفع العديد من الباحثين والمصنعين اليوم باتجاه إما بنىGALS (والتي قد تكون غير فعالة بشكل كافٍ كونها تحتاج إلى واجهات تزامن مع الوحدات الوظيفية وبين هذه الوحدات والموجهات) أو الشبكات غير المتزامنة.

العنصر الأساسي المكون لهذه الشبكات هو الموجهات التي مهمتها توجيه رزم البيانات بين الوحدات الوظيفية ضمن الرقاقة، وهذه الموجهات تتكون بشكل عام من عدة وحدات تخزينوالتي تشكل جزء أساسي من الموجه حيث تستخدم كوحدات تخزين مؤقت لتقليل فقدان البيانات وتنظيم التدفق، بالإضافة إلى بعض دارات التحكم والتوجيه.

أغلب تصاميم الشبكات ضمن الرقاقةتعتمدآلية الـ FIFOالدائرية في وحدات التخزين المؤقتحيث تعتبر من أكثر الطرق فعاليةً وانتشاراً [9] لبساطتها وسهولة استخدامها، فهي تدعم فقط عمليات الكتابة والقراءة المتسلسلة،وتستخدم مبدأ "الأول في الدخول أول في الخروج"،ويختلف هذا المبدأ عن الذواكر التقليدية بأنه لا يحتاج إلى مسار خارجي خاص بعنوان الكتابة والقراءة حيث يُضاف عنوان البيانات تلقائيًا بواسطة مؤشر القراءة والكتابة الداخلي من خلال تحديده بموقع المؤشربدلاً من تحديده بواسطة مسار العنوان الخاص بالقراءة أو الكتابة،وهذا ما يجعل بنية الـ FIFO مناسبة لعمل الموجه فهي قادرة على تنظيم تدفق رزم البيانات والمحافظة على تسلسلها بالإضافة إلى بساطة بنيتها مقارنة بوحدات التخزين الأخرى.

تعتمد بنية وحدة التخزينFIFO المتزامنة على إشارة ساعة واحدة لقيادة المنافذ ووحدات التخزين، أما إذا كان تنفيذFIFO قائماً على الساعة، ولكن الدخل والخرج محكومين بنبضات ساعة مختلفة

عن الساعة الداخلية للـ FIFO(في التردد و/أو الطور و/أو دورة العمل، إلخ)، تُسمى الدارة الناتجة FIFO ثنائي التزامن. تجدر الإشارة إلى أن الـFIFO ثنائي التزامن هو في الواقع دارة غير متزامنة عالمياً ومتزامنة محلياً (GALS)، ويُستخدم بكثرة كمُوافق تزامن[10]في الأنظمة ذات خصائص السرعة المختلفة و/أو التي تستخدم نطاقات ساعة مختلفة. إذا لم تستخدموحدة التخزينFIFOنبضة ساعة لمزامنة عملياتها، فهي تعتبر نظام غير متزامن فعلياً (AFIFO) يعتمد بروتوكولات مصافحة محلية سواءً على منافذه أو ضمن الدارة الداخلية للتحكم بتدفق البيانات.

نظراً لأهمية بنى الـ FIFO وتأثير أداءها الكبير على عمل الموجه في الشبكات ضمن الرقاقة، ركزت العديد من الدراسات على تحسين هذه البنى وآلية عملها وكان الاهتمام مؤخراً موجّه نحو تصاميم FIFO غير المتزامنة حيث أثبتت هذه الدراسات كفاءة هذه التصاميم من حيث الإنتاجية والتأخير بالإضافة لاستهلاك طاقة أقل مقارنة بالتصاميم المتزامنة ففي [11]تم اقتراح بنية جديدة لوحدة التخزين المؤقت FIFO يمكن استخدامها في الشبكات ضمن الرقاقة غير المتزامنة ومتعددة التزامن. صُممت هذه البنية باستخدام نموذج التصميم غير المتزامن محدود التأخيرBD(Bounded Delay)، وإشارات مصافحة ثنائية الطور، وتتميز بتقليل تأخير المسار الحرج إلى النصف وتبسيط عمليات التوقيت بين وحدة فك ترميز الذاكرة ومؤشر العنوان مع الحفاظ على المتانة ضد تغيرات العملية والجهد ودرجة الحرارة، وأثبتت نتائج هذه الدراسة أن البنية المقترحة أسرع بخمس مرات، وأقل استهلاك للطاقة بـ 2.3 مرة، وتحقق معدل نقل بيانات يبلغ 1 جيجا كلمة/ثانية من أجل حجم كلمة 64 بت.

على نحو متصل في [12] تم اقتراح ثمانية بنى مختلفة لوحدة التخزينالمؤقتFIFOغير المتزامنةذات ثمانية مراحل (أي عمق وحدة التخزين يساوي 8 بت)وعرض 32 بت بهدف استكشاف خيارات تصميم الـ FIFO غير المتزامن وخاصةً النماذج غير الحساسة للتأخيرDI (Delay Insensitive)، وبالتالي فإن هذه البنى تعتمد نموذج شبه غير حساس للتأخير QDI (Quasi Delay Insensitive) في تصميمها وتختلف عن بعضها من حيث ترميز البيانات (ترميز ثنائي الأسلاك DR (Dual Rail) أو 1 من 4 (1of4))، وآلية عمل برتوكول المصافحة (برتوكول ثنائي الطور 2ph (2phase) أو برتوكول رباعي الطور 4ph (4phase)، بالإضافة إلى الآلية المستخدمة لتوليد إشارة تأكيد الطلب ack (acknowledgment) إما من خلال توليد إشارة ack

(يعبر عنها بسلك واحد) بين كل مرحلتي AFIFO متتاليتين (تسمى هنا busack)أو آلية unitack حيث يُولد كلمسجلDIضمن المرحلة إشارة ack للمرحلة السابقة ومن خلال المقارنة بين هذه البنى أظهرت النتائج أن استخدام الترميز 1 من 4 وبرتوكول المصافحة رباعي الطور مع اعتماد unitackلتوليد إشارة الـ ack هي الأفضل وفقاً لجميع المقاييس (المساحة والإنتاجية وكفاءة استهلاك الطاقة) ولكن كما ذكر ضمن هذه الدراسة فإنه مع زيادة السعة التخزينية يمكن أن تختلف هذه النتائج، كما أن محدودية البيئة المستخدمة لتنفيذ هذه البنى يقيد التجارب إلى حد ما ويمكن أن يؤدي إلى نتائج غير منطقية مثل أن برتوكول المصافحة رباعي الطور أكثر كفاءة من ناحية استهلاك الطاقة مقارنة بالبرتوكول ثنائي الطور على الرغم من أن البرتوكول ثنائي الطور يقلل التبديل ضمن الدارة (كل تبديلفي خط البيانات في البرتوكول ثنائي الطور يحمل معلومات ذات معنى) وبالتالي يستهلك طاقة أقل مقارنة بالبرتوكول رباعي الطور.

في [13]تم اعتماد نموذجتصميم غير متزامن شبه غير حساس للتأخير QDIلتصميم وحدة التخزين المؤقتFIFOإلى جانب الترميز ثنائي الأسلاك، ووفقًا للنتائج تحافظ البنية غير المتزامنة المقترحة على كفاءة التشغيل من حيث الإنتاجية والتأخير، مع استهلاك طاقة أقل بنسبة 50% وتوفير بمساحة الرقاقة مقارنةً بالتصميم المتزامن.

تم استعراض ضمن هذا البحث أسلوب تصميم مختلف عن الدراسات السابقة لتنفيذ وحدة التخزين المؤقت غير المتزامنة من خلال الاستفادة من آلية عمل المنطق NCL في تصميم سلسلة مسجلات إزاحة تعمل بطريقة مماثلة لوحدة التخزينFIFOوقمنا بالمقارنة بين هذه البنية وبنية الـ FIFO غير المتزامنة التي تم تنفيذها أيضاً باستخدام المنطق NCL.

2. التصميم غير المتزامن ومنطق الاتفاقية الفارغة NCL:

تطرقنابإيجاز في هذا القسم من البحث للاختلافات الرئيسية بين التصميم المتزامنالتقليديوالتصميم غير المتزامن، ونقدم لمحة سريعة حولخصائص منطق الاتفاقية الفارغةNCL.

يستخدم التصميم المتزامن التقليدي إشارة ساعة مركزية للتحكم في تدفق البيانات من خلال منطق توافقي بين مراحل المسجل المُفعّلة باستخدام القدح بالحافة. في المقابل، يعتمد التصميم غير

المتزامنإشارات مصافحةمحلية (الطلب وتأكيد الطلب)، تتعلق آلية عملها بنموذج التصميم المستخدم حيث تنقسم النماذج غير المتزامنة إلى فئتين أساسيتين هي نموذج التأخير المحدود BD (Bounded Delay)، والنموذج غير الحساس للتأخير DI (Delay Insensitive) الذي يندرج ضمنه النموذج شبه غير حساس للتأخير QDI.يعتبر منطقNCLشبه غير حساس للتأخير وهو من أقل النماذجحساسية للتأخير مقارنة بغيره [7]،ففي نموذج التأخير المحدود (BD)يتم تقييم التأخيرات في كل من البوابات والأسلاك وتحديدها وفقاً لأسوأ السيناريوهات لتجنب الأخطاء. بينما يعتبر QDIغير حساس للتأخير الناتج عن البوابات والأسلاك ولكنه يُقيّد بالتفرع المتزامن ومسارات التغذية العكسية. أما المنطقNCLفهو مُقيد بمسار التغذية العكسية فقط والذي هو عادةً أقل تأخيراً من المسار الحرج للدارة وبالتالي يمكن استيفاء هذا القيد بسهولة.

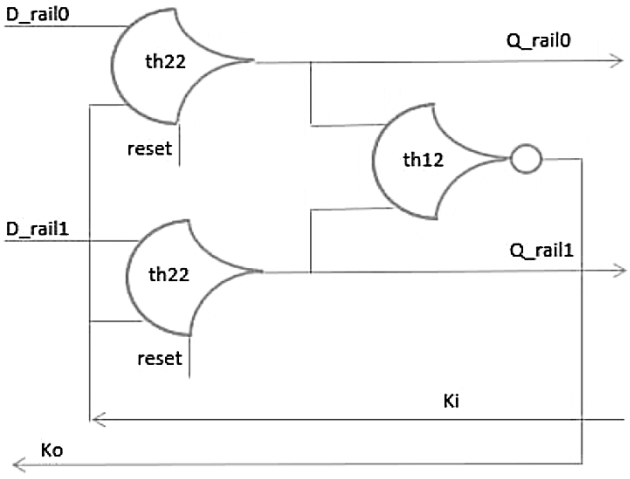
يعد منطق الاتفاقية الفارغة NCLمن أكثر النماذج الواعدة في مجال التصاميم غير الحساسة للتأخير كونه متكامل منطقياً (فهو ليس بحاجة إلى عناصر غير منطقية مثل الساعة أو عناصر تحكم أو خطوط تأخير لضبط وإكمال العملية)، ومستقل محليًا، متزامن ذاتيًا وقادر على اكتشاف الأخطاء تلقائياً بالاعتماد على بنيته التركيبية.

يعتمد هذا المنطق [7] على بوابات منطقية خاصة تدعى بوابات العتبة تتميز بقدرتها على الاحتفاظ بالحالة كما أن حالة الخرج الخاصة بالبوابة لا تعتمد فقط على قيم الدخل الحالية بل أيضاً على قيم الخرج السابقة، لذلك فهي تتطلب وجود مسار تغذية عكسيةلعناصرها المحتفظةبالحالةويجب أن يكون تأخير هذا المسارأقل من التأخير الأمامي عبر البوابة وعادةً ما يكون تحقيق ذلك سهلاً. تُنفذ دارة NCL من خلال ربط العناصر الأولية والتي هي بوابات العتبة M–of–N،حيث تُبنى جميع الكتل الوظيفية بما في ذلك عناصر المنطق التوافقي وعناصر التخزينباستخدام هذه البوابات،ويتحقق اكتمال الإدخال بإضافة القيمة NULL إلى القيم المنطقية الأساسية (TRUE وFALSE)، وذلك لتمثيل حالة "لا توجد بيانات"، وتكون بيانات الخرج صالحة فقط عند انتقال حالة جميع المداخل من القيمةNULL إلى قيمة البيانات، وهذا يتطلبألا تنتقل إشارة خرج البوابة إلى البيانات إلا بعد أن يصبح على جميع المداخلبيانات. وبالمثل، لن ينتقل الخرج إلى القيمة NULL إلا بعد أنتصبح القيمة NULL على جميع المداخل. نستخدم الترميز ثنائي الأسلاك لتمثيل هذه القيم الثلاث وفق الجدول(1) المبين أدناهبحيث تفصل موجة NULL بين جبهتي موجة DATA.

الجدول(1): التعبير وفق الترميز مزدوج الأسلاك[7].

A^1	A^0	A
0 v	0 v	NULL
0 v	1 v	Logic 0 (data)
1 v	0 v	Logic 1 (data)
1 v	1 v	Not allowed

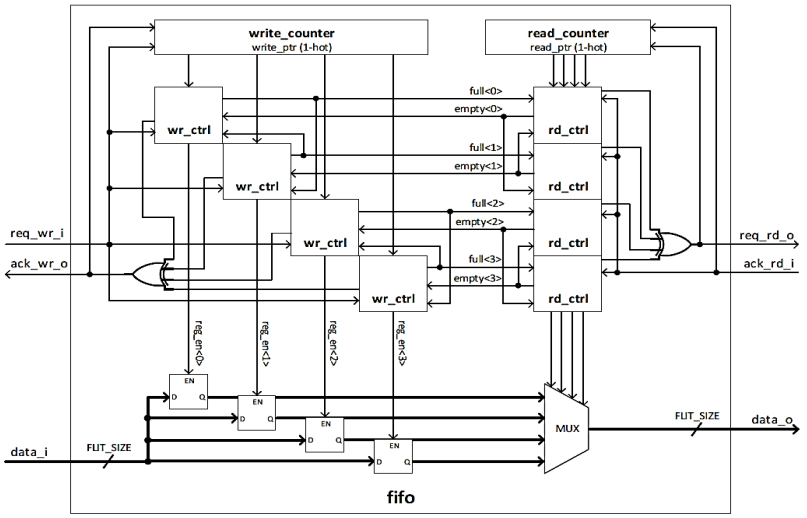
يلعب مسجل الإزاحةNCLالمبين في الشكل (1) دور ماسك ثنائي الحالة [14]، حيث يُنظر إلى Ki كإشارة تفعيل. يصبح المسجل بحالة تفعيل (شفاف) عندما يكون كل من Ki و D عبارة عن بيانات أو Null والعكس صحيح، سيكون في حالة عدم تفعيل (غير شفاف). لتوضيح العملية أكثر، عندما يكون Ki بحالة NULL أو بيانات، فإن حالة الدخلD ستظهر على الخرجQفقط إذا كان Dبنفس حالة Ki. بخلاف ذلك، سيحتفظ الخرجQ بالحالة السابقة.



الشكل (1): بنية مسجل NCL ثنائي الأسلاك[14].

3. بنية وحدة التخزين المؤقتFIFOفي الشبكات ضمن الرقاقة غير المتزامنة:

يبين الشكل (2)بنية وحدة التخزين المؤقت FIFO[15][16]التي تم اعتمادها في هذه الدراسة لمقارنتها مع بنية سلسلة المسجلات وهذه الوحدة تتألف من وحدة تحكم بالكتابة (wr_ctrl)[17]،ووحدة تحكم بالقراءة (rd_ctrl)[17]،وعداد (read/write_counter) بالإضافة إلى مسجلات لتخزين البيانات حيث تعمل وحدتا التحكم بالكتابة والقراءة بشكل أزواج، حيث تصلان إلى نفس مسجل البيانات. ويتم من خلال الإشارةreg_en_o تفعيل المسجل لتخزين البيانات بينما تُستخدم إشارة full_o كإشارة طلب لإعلام وحدة التحكم بالقراءةrd_ctrl بتوفر بيانات جديدة للقراءة. أما إشارة empty_o فهي إشارة تأكيد تُشير إلى قراءة البيانات. لا يُمكن كتابة بيانات جديدة إلا عندما تكون وحدة التحكم wr_ctrl نشطة (أي عندما تكون en_iبحالة تفعيل) وقد تمت قراءة البيانات المخزنة حالياً، وهو ما يُمكن تحقيقه بواسطة بوابةXNOR بين إشارتي full_o و empty_i. يتم التحكم بالعداد من خلال بوابةXNOR بين إشارة طلب وإشارة التأكيد (req_i و ack_i)، حيث يزيد بمقدار واحد في نهاية كل دورة مصافحة، أي عند حدوث انتقال علىack_i.



الشكل(2):بنية وحدة التخزين المؤقتة FIFO غير المتزامنة[15].

4. التصميم وحدة التخزين المؤقت باستخدام سلسلة المسجلات:

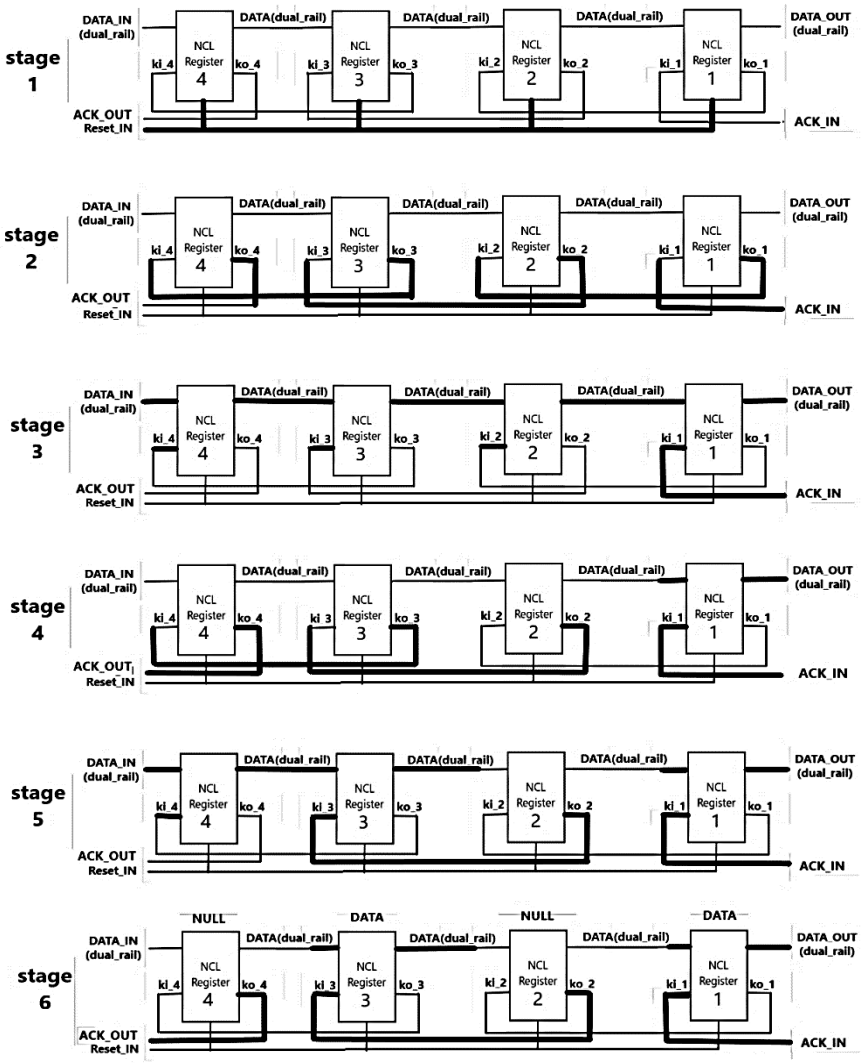
نقدم ضمن هذا القسم بنية جديدة لوحدة التخزين المؤقت تعتمد على فكرة أن سلسلة مسجلات الإزاحةالمصممة باستخدام المنطقNCL [18] تُظهر بشكل طبيعي سلوك "الأول في الدخول أول في الخروج" المعتمد من قبل وحدة التخزين FIFOالمستخدمة في موجه الشبكات ضمن الرقاقة وذلك بالاعتماد على أن حالة مسجل NCL يتم التحكم بها من خلال حالة الدخل وحالة الخرج للمسجل التالي والتي تنوب عن أشارات مصافحة وتتحكم بتدفق البيانات خلال سلسلة المسجلات. يبين الشكل(3)مخططاً توضيحياً لمراحل تدفق البيانات ضمن سلسلة المسجلات حيث تُمثل الخطوط العريضة "البيانات"، بينما تُمثل الخطوط الرفيعة "NULL" وهنا لابد من الإشارة إلى أن إشارة تأكيد الطلب بين المراحل تعبر عن معكوس حالة الخرج للمسجل التالي (خرج عاكس الإكمال).

المرحلة (1) هي مرحلة إعادة الضبط، ويتم إعادة ضبط جميع المسجلات، بحيث يصبح حالةالتدفق الأماميوتدفق تأكيد الطلب ack جميعها NULL.

في المرحلة (2)، تُلغى عملية إعادة الضبط، وتأخذ جميع إشارات تأكيد الطلب ackقيمة بيانات في آنٍ واحد بينما يبقى مسار التدفق الأماميفي حالة NULL.

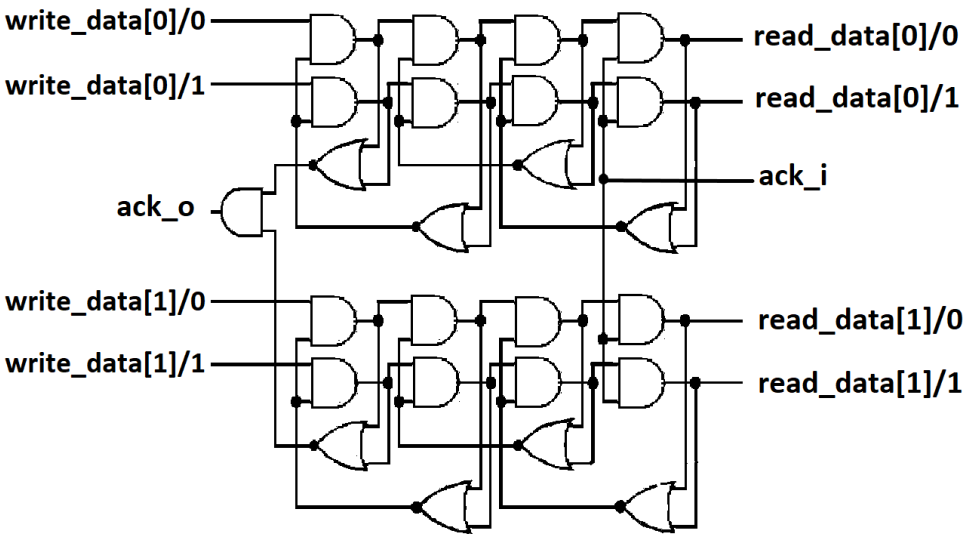
في المرحلة (3)، عندما يصبح على الدخل قيمة بيانات تصبح المسجلات شفافة، وتتدفق هذه القيمة عبر المسجلات حتى نهاية وحدة التخزين المؤقت. في هذه الأثناء، يتم الاحتفاظ بقيمة البيانات هذه من خلال مسارالدخل لإشارة تأكيد الطلب Ack_IN والذي يكون هو أيضاً بحالة بيانات.

في المراحل (4) و(5) و(6)، تتعاقب قيم NULL والبيانات على الدخلبشكل متتالي لتنتهي بقيمة NULL، ويتم تأكيد حالة وحدة التخزين المؤقت ممتلئة بحلول المرحلة (6). وتصبحالقيم المخزنةضمن الوحدة على التتالي DATA«NULL«DATA«NULL، وستظهر قيم بيانات الدخل الأولى DATAعلى الخرجمع استمرارتفعيل إشارة الدخلACK_INوعندما تتغير إلى حالة الـ NULL يتم التخلي عن قيمة البيانات هذه وتخزين قيمة NULL التالية لها.



الشكل (3): مخطط توضيحي لمراحل تدفق البيانات ضمن البنية المقترحة لوحدة التخزين المؤقت.

يوضح الشكل (4) بنية وحدة التخزين المؤقت باستخدام سلسلة المسجلات بترميز مزدوج الأسلاك وبعمق تخزين 2 بت، وتعمل هذه الدارة وفقاً لما تم شرحه سابقاً حيث بعد مرحلة إعادة الضبط، إذا كانت جميع إشارات تأكيد الطلب بيانات، فسوف تتدفق بيانات الدخل إلى نهاية وحدة التخزين المؤقت، وبالتالي يتم تكديس قيم البيانات وقيم NULL الموجودة على الدخل حتى يتم تبديل إشارة Ack_I.



الشكل(4): بنية وحدة التخزين المؤقت باستخدام سلسلة المسجلات ثنائية الأسلاك بعمق 2 بت وعرض 2 بت.

5. المحاكاة والنتائج:

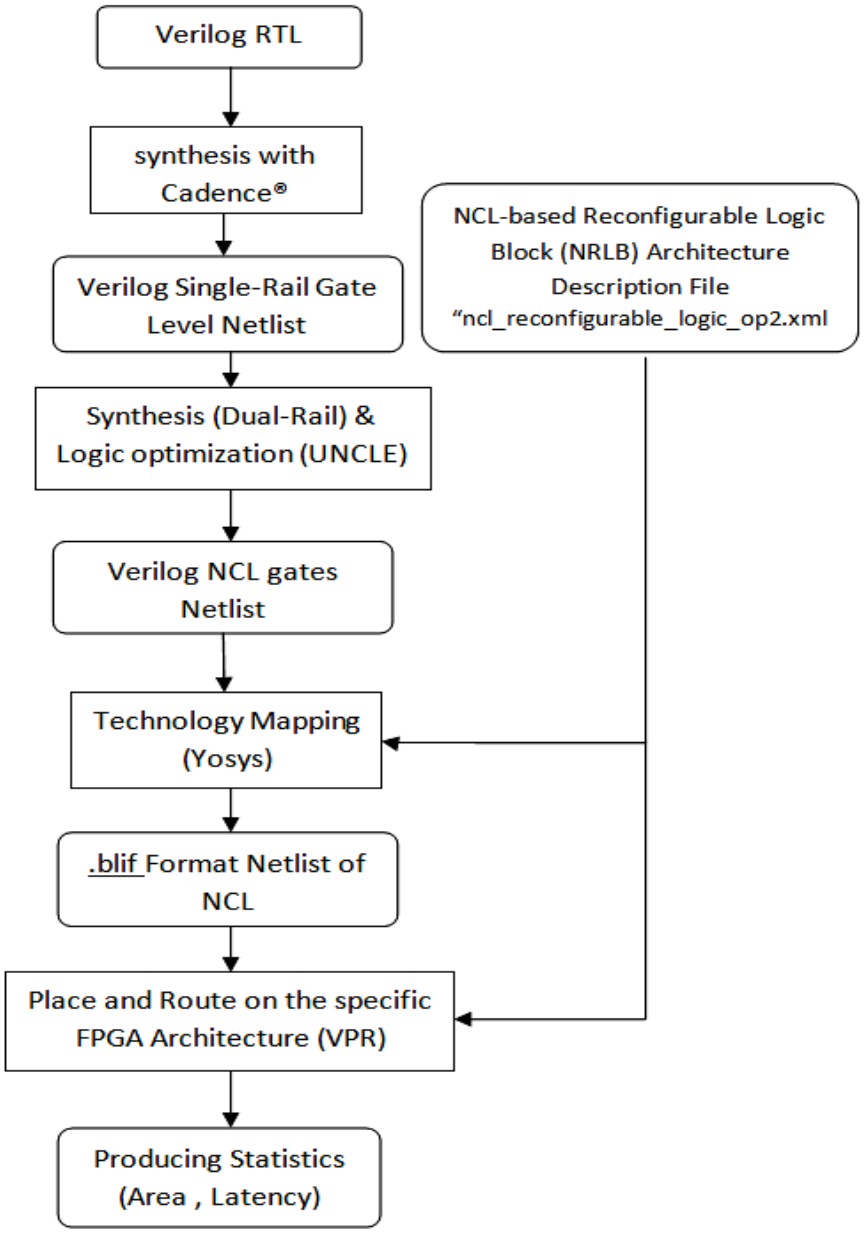
في هذا القسم نوضح نتائج المقارنة من حيث المساحة واستهلاك الموارد والأداء بين البنية المقترحةلوحدة التخزين المؤقت وبنية الـ FIFO وذلك من خلال الاستعانة بتدفق التصميم VTR(Verilog-to-Routing)[19] كونه يدعم التصاميم غير المتزامنة ويوفر إمكانية تحقيقها على بنى قابلة لإعادة البرمجة مضمنة أو يمكن للمصمم استخدام بنية قابلة لإعادة البرمجة خارجية بإضافة ملف المواصفات الخاص بها إلى تدفق التصميم كما هو الحال في هذا البحث.

1.5. تدفق التصميم والمحاكاة:

استناداً إلى تدفق تصميم CAD (Computer Aided-Design) المُخصّص لـ VTR المبين في الشكل(5) تم تصميم وحدة التخزين المؤقت FIFO وسلسلة المسجلات باستخدام Verilog RTL(Register Transfer Level) وتنفيذها على شكل شبكة منالبوابات المنطقية البوليانية أحادية الأسلاك باستخدام أداة المحاكاة®Cadence في المرحلة الأولى. بعد ذلك، استُخدمت أداة UNCLE(Unified NCL Environment) [20]، لتنفيذ البنية غير المتزامنة بتوليف شبكة البوابات المنطقية أحادية الأسلاك من المرحلة السابقة إلى شبكة ثنائية الأسلاك باستخدام بوابات العتبة NCL، ثم تم استخدام الأداة [21]Yosys لتنفيذ خطوة تعيين شبكة بوابات NCL على الرقاقة باستخدام البنية القابلة لإعادة البرمجة القائمة على المنطق NCL(NCL based Reconfigurable Logic Block) [22] من خلال تضمين ملف المواصفات الخاص بها، وفي الخرج نحصل على ملف BLIF(((Berkeley Logic Interchange Format (net file لبنية الدارة على مستوى البوابة. في المرحلة ما قبل الأخيرة، تُنفذ الأداة VPR (Versatile Place and Route) [19] عملية تحقيق الدارة وتوصيلها على بنية NCL قابلة لإعادة البرمجة. وأخيراً، استُخرجت إحصائيات استهلاك الموارد والتوقيت بواسطة VPR لتحليلها لاحقاً ومقارنتها للحصول على النتائج [19].

استخدمت الكتلة المنطقية القابلة لإعادة البرمجة القائمة على المنطق [22]NCL كمكون للنظام القابل لإعادة البرمجة على الرقاقة، حيث تم تطويرها وتقييمها باستخدام ®Cadence Virtuoso® Layout Suite مع تقنية أشباه الموصلات FDSOI CMOS 45 نانومتر. واستخدم محاكي Cadence® Spectre® AMS لمحاكاة بوابات NCL القابلة لإعادة البرمجة

واستخراج نتائج تأخير البوابة التي تم توظيفها لاحقاً ضمن ملف وصف البنية المطلوب لتدفق VTR.



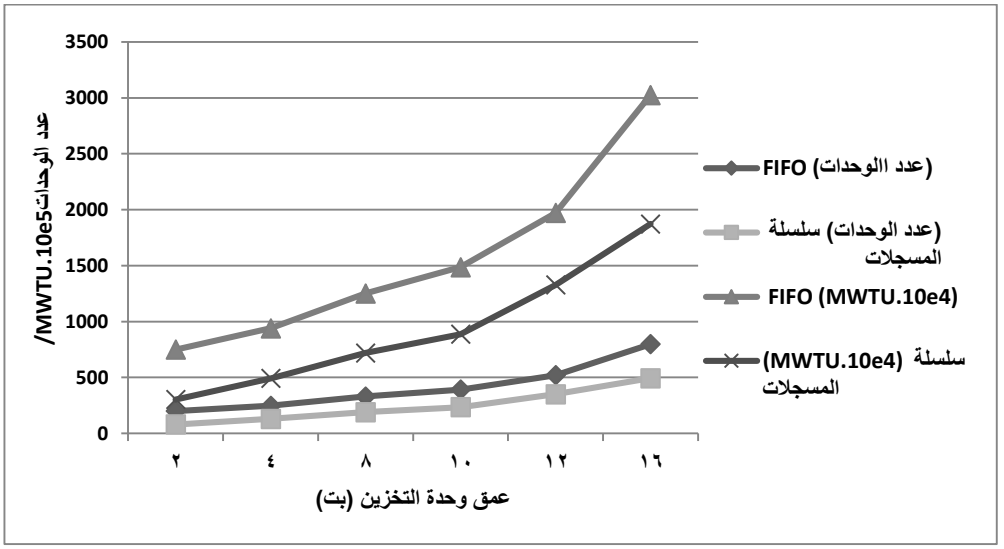
الشكل(5): تدفق التصميم VTR [19],[20].

من أجل عملية المقارنة استخدمناأربع بارامترات: (1) عدد وحدات NCL القابلة للبرمجة المستخدمة. (2)عدد الترانزستورات ذات العرض الأدنى MWTU (minimum width transistor unit) وهي الوحدة المستخدمة لحساب الموارد المستهلكة في أداة التصميم بمساعدة الحاسب الأكاديمية مفتوحة المصدر VPR(العرض الأدنى للترانزستور في تقنية أشباه الموصلات CMOS45nm يساوي 120 nm وبالتالي مساحة الترانزستور ذو العرض الأدنى × 29.952 10^{-3} um^2). (3)زمن التأخير (ps)، وهو الزمن اللازم لبت الدخل لعبور وحدة النخزين حتى يصبح على خرجها وذلك عندما تكون خالية .(4) زمن دورة وحدة التخزين المؤقت وهو الحد الأدنى للفاصل الزمني بين عنصري بيانات متجاورين عندما تعمل وحدة التخزين بأقصى سرعة ممكنة. وهو يمثل معدل قبول عناصر بيانات جديدة أو قراءتها منها. في حالة وحدة التخزين المتزامنة، يُحدد زمن الدورة بفترة الساعة، بينما في حالة وحدة التخزين غير المتزامنة يُحدد ببروتوكولات المصافحة الداخلية والتأخيرات داخل الدارة.

الجدول(2):نتائج مقارنة استهلاك الموارد.

البارامتر	السعة التخزينية = العرض × العمق لوحدة التخزين	FIFO	سلسلة المسجلات
عدد وحدات NCL القابلة للبرمجة المستخدمة	4×8	248	130
	8×8	330	190
	16×8	798	494
	128×8	8290	5174
MWTU×10^4	4×8	940	492
	8×8	1251	720
	16×8	3025	1873

	128×8	31433	19618



الشكل(6): مخطط مقارنة استهلاك الموارد من أجل قيم مختلفة لعمق وحدة التخزين.

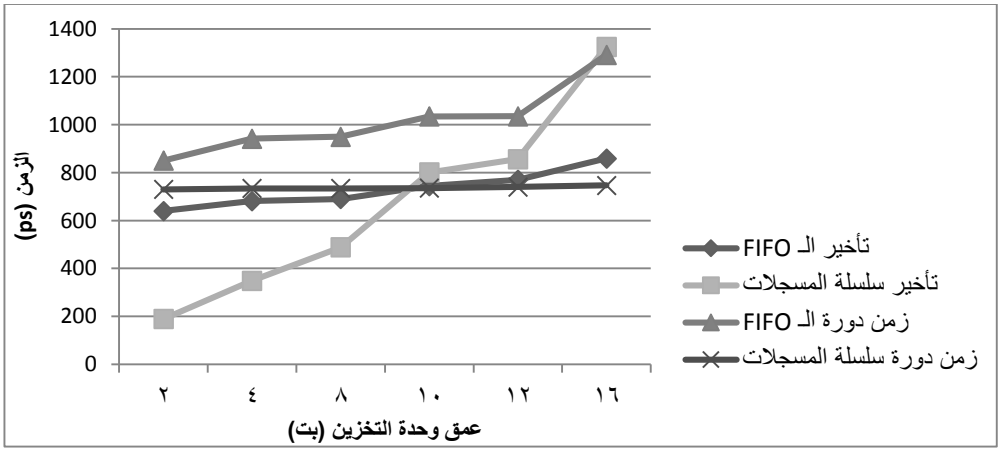
2.5. النتائج:

1.2.5. نتيجة مقارنة استهلاك الموارد وتحليلها:

يعرض الجدول (2) والشكل (6) نتائج مقارنة استهلاك الموارد بين سلسلة المسجلات والـFIFOوذلك بعرض وحدة تخزين ثابت يساوي 8 بتات حيث تظهر هذه النتائج أنه بغض النظر عن السعة التخزينية للوحدة فإن سلسلة المسجلات تستهلك موارد أقل بكثير مقارنةً بالـFIFOبنسبة وسطية 47 %، على الرغم من تخزينها لكلا القيميتن DATA و NULL، وأيضاً كما هو متوقع فإن عدد وحدات NCL القابلة للبرمجة المستخدمة يتناسب طردياًمع عدد الموارد المستهلكة.

الجدول(3):نتائج مقارنة الأداء.

البارامتر	السعة التخزينية = العرض × العمق لوحدة التخزين	FIFO	سلسلة المسجلات
التأخير الأمامي	4×8	681.4	348.7
	8×8	690.8	488.9
	16×8	858.6	1325.06
	128×8	1262.5	13930.6
زمن الدورة	4×8	941.4	733.7
	8×8	950.5	734.2
	16×8	1291.6	746.8
	128×8	2084.9	746.8



الشكل(7): مخطط مقارنة الأداء من أجل قيم مختلفة لعمق وحدة التخزين.

2.2.5. نتائج مقارنة الأداء وتحليلها:

يوضح الجدول(3) والشكل(7) النتائج والمخططات البيانية لمقارنة أداء سلسلة المسجلات مع الـ FIFO. عندما يكون عمق التخزين صغير، يكون تأخيرسلسلة المسجلات أصغر من تأخير الـFIFO، ويزداد هذا التأخير مع زيادة عمق وحدة التخزينويصبح أكبر من تأخير الـFIFOبالنسبة للقيم التي تزيد عن 8، ولكن نلاحظ أيضاً أن التأخير بالنسبة لـFIFOsذات عمق التخزين الكبير (مثل العمق = 128) يجعلها غير مقبولة كوحدة تخزين مؤقت حيث يُعد تأخير الانتشار مهماً بشكل خاص في حالة حدوث إعادة كتابة المسجل بسرعة بعد قراءة قيمة المسجل الذي يتم التعامل معهفإذا كان تأخير وحدة التخزين المؤقت أكبر من وقت التنفيذ، فسيؤدي ذلك إلى توقف عمل الـ pipeline. أما بالنسبة لزمن دورة وحدة التخزين المؤقت فتبين النتائج الموضحة في الجدول (3) والمخططات البيانية في الشكل (7) أنزمن دورة سلسلة المسجلات أقل من زمن دورة FIFO وهذا مبرر إلى حد ما كون البنيتين غير متزامنتين وبالتالي فإن عدد الموارد المستخدمة ضمن الدارة يؤثر بشكل أساسي على زمن الدورة فكلما قَلَّ عدد الموارد ضمن الدارة أصبح زمن الدورة أقل وحسب النتائج السابقة فإن سلسلة المسجلات تستهلك موارد أقل وبالتالي فهي زمن دورتها أقل.

6. الخاتمة:

في هذا البحث صممنا بنية جديدة لوحدة التخزين المؤقت المستخدمة في موجه الشبكات ضمن الرقاقةالقائم على المنطقNCL، وتمت مقارنتها مع بنية وحدة التخزين المؤقتFIFO الأكثر استخداماً في هذا المجال ولكن تحليلنا اقتصر على المقارنة بين هاتين البنيتين حيث لا توجد أمثلة سابقة لتصميم وحدة التخزين المؤقت باستخدام المنطقNCL لموجه الشبكات ضمن الرقاقة للمقارنة معها. يمكن للمصمم من خلال نتائج هذه المقارنة اختيار بنية وحدة التخزين المؤقت المناسبة بناءً على متطلبات سعةوحدة التخزين والأداء المستهدف منها.

سوف نركز بالأعمال المستقبلية على تحسينأداء سلسة المسجلات كوحدة تخزين مؤقت وخاصة بالنسبة لسعات التخزين الكبيرة ودراسة استهلاك الطاقة لهذه البنية.

7.المراجع :

[1]W. Dally and B. Towles, "Route packets, not wires: On-chip interconnection networks", in Proceedings of the 2001 Design Automation Conference, 2001, pp. 684–689.

[2]Tung Nguyen, Duy-Hieu Bui, Hai-Phong Phan, Trong-Trinh Dang,Xuan-Tu Tran, "High-Performance Adaption of ARM Processor intoNetwork-on-Chip Architectures," in Proceedings of the 26th IEEE System-on-Chip Conference (SOCC), pp. 222-227, September 2013.

[3]A. Lines, "Asynchronous interconnect for synchronous SoC design," IEEEMicro, vol. 24, no. 1, pp. 32–41, 2004.

[4] M. N. Horak et al. , "A low-overhead asynchronous interconnection networkfor GALS chip multiprocessors," IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. CircuitsSyst., vol. 30, no. 4, pp. 494–507, 2011.

[5] A. Ghiribaldi, D. Bertozzi, and S. M. Nowick, "A transition signaling bundleddata NoC switch architecture for cost-effective GALS multicore systems," in Proc.ACM/IEEE DATE, 2013, pp. 332–337.

[6] E. Kasapaki and J. Sparsø, "Argo: **A time-elastic time-division-multiplexednoC using asynchronous routers**," in Proc.20th IEEE Int. Symp. ASYNC, 2014,
pp. 45–52.

[7] K. M. Fant, "Logically determined design: clockless system design with NULL convention logic", John Wiley & Sons, 2005.

[8] P. A. Beerel, R. O. Ozdag, and M. Ferretti, "A Designer´s Guide toAsynchronous VLSI". Cambridge University Press, 2010.

[9] I. Miro Panades, A. Greiner, "Bi-synchronous FIFO for SynchronousCircuit Communication Well Suited for Network-On-Chip in GALS Architecture," in Proceedings of the ACM/IEEE InternationalSymposium on Networks-on-Chip, Princeton, 2007, pp. 83-92.

[10]T. -T. Nguyen and X. -T. Tran, "A novel asynchronous first-in-first-out adapting to multi-synchronous network-on-chips," 2014 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2014), Hanoi, Vietnam, 2014, pp. 365-370, doi: 10.1109/ATC.2014.7043413.

[11] Abdel-hafeez Saleh & Gordon-Ross Ann, " Reconfigurable FIFO memory circuit for synchronous and asynchronous communication". International Journal of Circuit Theory and Applications, 2021, no. 49. pp 938-952. 10.1002/cta.2921.

[12] T. A. Rodolfo, M. L. L. Sartori, M. T. Moreira and N. L. V. Calazans, "Quasi Delay Insensitive FIFOs: Design Choices Exploration and Comparison," 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Daegu, Korea, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISCAS51556.2021.9401566.

[13]Menaka, M. et al. "Asynchronous Circular Buffers based on FIFO for Network on Chips." 2023 International Conference on Circuit Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2023, 1356-1361.

[14] T. L. Thanh, L. T. Tri and T. Hoang, "The flow of converting from Synchronous design to Asynchronous Null Convention Logic design. Case study of S-box in AES encryption in secure router," 2020 International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP), Quy Nhon, Vietnam, 2020, pp. 109-113.

[15]Ghiribaldi, A.; Bertozzi, D.; Nowick, S. M. "A Transition Signaling Bundled Data NoC Switch Architecture for Cost-Effective GALS Multicore Systems". In: Design, Automation & Test in EuropeConference & Exhibition (DATE´13), 2013, pp. 332-337.

[16] Xu, Ying. "Asynchronous FIFO Design Based on Verilog." Highlights in Science, Engineering and Technology, vol. 38, Mar. 2023, pp. 965–70

[17] Wang,Q, "A Study of Advances in Asynchronous FIFO Design", Applied and Computational Engineering, 2025,no121,pp14-23.

[18] M. M. Kim, K. M. Fant and P. Beckett, "Design of asynchronous RISC CPU register-file Write-Back queue," 2015 IFIP/IEEE International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), Daejeon, Korea (South), 2015, pp. 31-36

[19] K.E. Murray et al., "VTR 8: High-performance CAD and Customizable FPGA Architecture Modelling", ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems (TRETS), vol. 13, no. 9, p 1-55, 2020.

[20] R. B. Reese and R. A. TAYLOR. "Uncle (Unified NCL Environment)"[Online].Available:http://my.ece.msstate.edu/faculty/reese/uncle/UNCLE.pdf

[21] C. Wolf. "Yosys Open SYnthesis Suite". Available: http://www.clifford.at/yosys/

[22] J. Yu and P. Beckett, "A dual-rail LUT for reconfigurable logic using null convention logic". In Proceedings of the 24th edition of the great lakes symposium on VLSI (GLSVLSI'14). ACM, NY, USA, pp. 261-266, 2014.