

تشخيص الأخطاء في الدارات الرقمية بالاعتماد على أنظمة المناعة الاصطناعية

سالي محمد عيسى *

(تاريخ الإيداع 4 / 10 / 2020 . قُبل للنشر 10 / 11 / 2020)

□ الملخص □

شهدت الدارات المتكاملة Integrated Circuits مع التطور التكنولوجي الحاصل وخاصة في مضمار الإلكترونيات الرقمية زيادة ملحوظة في درجة تعقيد التصميم والاختبار مما أدى لصعوبة في الاختبار والتشخيص وبالتالي تكاليف مادية وزمنية عالية لتصميم هذه الدارات في يومنا هذا. توجد العديد من الأبحاث والمنهجيات المقترحة لتطوير تقنيات وآليات اختبار وتشخيص الأعطال بهدف تحسين أداء الأنظمة وزيادة موثوقيتها، والتي اعتمدت في معظمها على تطوير الجزء المادي Hardware للأنظمة في محاولة للكشف عن العطل وتحديد موقعه ضمن النظام، وهذا ما نتج عنه كلفة مادية كبيرة فرضها العتاد الإضافية المستخدم لتحقيق هذه الغاية. يقدم هذا البحث نظاماً مناعياً لكشف وتشخيص الأخطاء المكتشفة من نوع Stuck-At Faults في الدارات الرقمية بالاعتماد على أنظمة المناعة الاصطناعية وخوارزمية الاختيار السلبي Negative Selection Algorithm، فيكون قادر على اكتشاف وتحديد المكونات المعيبة من خلال تحليل استجابة الخرج باستخدام محلل خرج مناعي، كما يقترح آلية جديدة لتقسيم الدارة المختبرة كخطوة رديفة لعملية التشخيص المقدمة للخطأ الناتج بأقل كلفة مادية وزمنية ممكنة. الكلمات المفتاحية: أنظمة المناعة الاصطناعية، الدارات الرقمية، الكواشف، التشخيص، خوارزمية الاختيار السلبي، أخطاء Stuck-At، التقسيم.

*مهندسة حاصلة على درجة الماجستير باختصاص هندسة تكنولوجيا المعلومات-قسم هندسة تكنولوجيا المعلومات-كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات-جامعة طرطوس-سوريا.

Fault Diagnosis in Digital Circuits based on Artificial Immune Systems

Sally Mohammad Issa *

(Received 4 / 10 / 2020 . Accepted 10 / 11 / 2020)

□ ABSTRACT □

With the technological development taking place, especially in the field of digital electronics, integrated circuits witnessed a remarkable increase in the degree of complexity of design and testing, which led to difficulty in testing and diagnosis, and thus high material and time costs to design these circuits today.

There are many researches and proposed approaches to develop techniques and mechanisms for testing and diagnosing faults with the aim of improving the performance of the systems and increasing their reliability, which mostly relied on developing the physical part of the systems in an attempt to detect the malfunction and locate it within the system and this resulted in a large material cost imposed by the additional equipment used to achieve these the aim.

This research presents an immune system to detect and diagnose the Stuck-At Faults detected errors in digital circuits, depending on artificial immune systems and the Negative Selection Algorithm, so it is able to detect and identify defective components by analyzing the output response using an immune output analyzer, and it also proposes a new mechanism for splitting The circuit tested as a auxiliary step to the diagnostic process provided for the resulting fault at the lowest financial and time cost possible.

KeyWords:Artificial Immune Systems, Digital Circuits, Detectors, Diagnosis, Negative Selection Algorithm, Stuck-At Faults, Partition.

*AnEngineer with a master's degree in Information Technology Engineering, Department of Information Technology Engineering,College ofInformation and Communication Technology Engineering , Tartous University, Syria.

1-مقدمة:

أصبح تصميم وتطوير الأجهزة والأنظمة الإلكترونية الرقمية لتكون أكثر مواكبة للتكنولوجيا والتقنيات الحديثة الشغل الشاغل للشركات المصنعة والمنتجين في وقتنا الحالي وبخاصة مجال تصنيع وتطوير الأنظمة والدارات الرقمية ذات الدرجات العالية من التكامل (VLSI) Very Large Scale Integration التي تعد من أكثر المجالات الواعدة مستقبلاً في الثورة التكنولوجية، لكن القدرة على تصميم وتطوير الأنظمة بالتوازي مع زيادة تعقيد ودقة تلك الأجهزة طرحت مشكلة تتلخص بالقدرة على اكتشاف أخطاء هذه الأنظمة وتشخيص عيوبها في محاولة لتحسين كفاءتها وجودتها مع تقليل تكلفة إنتاجها قدر المستطاع، وهذا شكل بدوره تحدي كبير في ظل الصغر بالحجم والدقة المتزايدين لهذه الأنظمة الرقمية.

كان هناك عدة محاولات لتسخير الذكاء الصناعي لحل مشكلات التشخيص، كما أُجريت العديد من الأبحاث والدراسات تضمنت عدة تطبيقات لخوارزميات الذكاء الحسابي كالمنطق الضبابي والخوارزميات الجينية وذكاء الأسراب وغيرها في مجالات التجسس والمراقبة والتعرف على السلوك الشاذ في الأنظمة الإلكترونية المعقدة حيث حققت نتائج مميزة في العديد منها [1].

يتطرق البحث لاختبار الدارة الإلكترونية للكشف عن خطأ ما فيها وتشخيص موقع الخطأ المكتشف في الدارة بدقة من خلال دراسة مجموعة احتمالات متوقعة لنقطة وقوع الخطأ وتحليل البيانات الناتجة عن ذلك للوصول إلى نتيجة نهائية تحدد إحداثيات الخطأ في الدارة المدروسة.

2- هدف البحث:

أحدثت أنظمة وخوارزميات الذكاء الحسابي (Computational Intelligence(CI) نقلة نوعية في السنوات الأخيرة بوصفها فرع من الذكاء الصناعي حيث تم تطبيقها على نطاق واسع في مختلف المجالات الهندسية.

وفي طليعة هذه الأنظمة كانت أنظمة المناعة الاصطناعية Artificial Immune Systems وخوارزمياتها الذكية التي تحاكي جهاز المناعة الحيوي في توظيف مجموعة آليات للدفاع عن الجسم ضد المكونات الغريبة عنه.

يهدف هذا البحث إلى تصميم نظام اختبار وتشخيص مناعي اصطناعي لاكتشاف الأخطاء بعناصر الدارة الإلكترونية وتحديد موقعها في الدارة حيث يقوم بالمهام التالية:

- فحص الدارة الرقمية المُختبرة (CUT(circuit-under-test) لتحديد حالتها (معيبة/سليمة).
- كشف الأخطاء من نوع Single Stuck-at faults الحاصلة في الدارة من خلال تقييم الخرج لهذه الدارة.
- تحديد موقع الخطأ الحاصل بدقة وفق آلية تشخيص مناعية فعالة ليتم عزله تمهيداً لإصلاحه.

3- مواد وطرق البحث:

اعتمدنا في الدراسة العملية وتحليل النتائج المنبثقة عنها على برنامج ModelSim-Altera 10.1d (Quartus II 13.1) لمحاكاة ونمذجة الدارات الرقمية باستخدام لغة وصف العتاد الصلب Verilog، وتم ربطه مع برنامج NetBeans لبرمجة خوارزمية الاختبار والتشخيص المناهية بلغة الجافا، كما قمنا بالاستعانة ببرنامج DSCH 3.8 في تصميم الدارات المنطقية التي تم اختبار النظام المقترح عليها، وهو محرر ومحاكي منطقيتم استخدامه للتحقق من صحة بنية الدارة الرقمية قبل بدء تصميم الإلكترونيات الدقيقة مع توفير بيئة سهلة الاستخدام للتصميم والمحاكاة السريعة للدارة.

4- الدراسة النظرية:

4-1 أنظمة المناعة الاصطناعية (AIS) Artificial Immune Systems

ظهرت أنظمة المناعة الاصطناعية في بداية التسعينات 1990 كفرع جديد من الحوسبة الذكية CI وبرزت كحقل نشط يتضمن العديد من التقنيات والنماذج والتطبيقات ذات التنوع الكبير حيث استحوذت على اهتمام الباحثين واستخدمت في البداية في مجال التعرف على الأنماط والكشف عن الخطأ وخاصة في مجال أمن الكمبيوتر ثم تطورت لتشمل العديد من التطبيقات الأخرى منها التنقيب في البيانات، أمن الشبكات والحاسوب، التعرف على النماذج وغيرها [2].

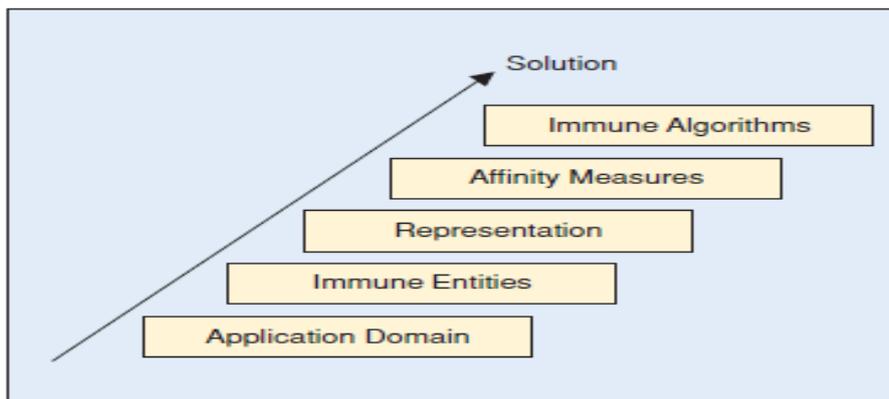
■ تعريف نظام المناعة الاصطناعي:

هو أحد نماذج الذكاء الحسابي Computational Intelligence المستخدمة في البيئات المعقدة الواقعية والمستوحى من نظام المناعة الحيوي وخوارزمياته الموجود في الجسم [3]، انطلاقاً من مفهوم "الحصول على الحكمة من الطبيعة" حيث يعمل على بناء نماذج تحاكي الآليات المناعية والدفاعية الطبيعية وسلوكها الديناميكي في التعامل مع المستضدات (مسببات المرض) ويفهم عملياتها بشكل أفضل، كما يحاول استخراج أفكار من نظام المناعة البيولوجي BIS لتطوير أدوات حسابية لحل المشكلات العلمية والهندسية [4].

■ لتطبيق نموذج مناعي بغرض حل أي مشكلة معينة في مجال معين يجب أتباع الخطوات التالية

كما هو موضح في الشكل (1) [5]:

1. تحديد المجال الذي سيتم تطبيق النموذج المناعي عليه حيث يتم استخدام أنظمة المناعة الاصطناعية (AIS) في العديد من التطبيقات مثل اكتشاف الشذوذ، التعرف على الأنماط، التنقيب عن البيانات، أمن الكمبيوتر، واكتشاف الأخطاء.
2. تحديد العناصر التي تتطوي عليها المشكلة وكيف يمكن أن تكون على غرار كيانات في المناعة الخاصة بالنموذج.
3. لنمذجة هذه الكيانات، ينبغي اختيار تمثيل لكل عنصر من هذه العناصر، وتحديد تمثيل السلسلة بإحدى الطرق: عدد صحيح، تمثيل ثنائي، تمثيل هجين.
4. قياس رابطة التقارب (قوة الارتباط بين السلاسل): ينبغي تحديد قواعد وآلية المطابقة التي سيتم اتباعها.
5. اختيار الخوارزمية المناعية التي سيتم استخدامها لإنشاء مجموعة من الكيانات المناسبة التي توفر حلاً جيداً للمشكلة المطروحة.



الشكل (1): الخطوات اللازمة لحل مشكلة باستخدام نموذج مناعي

■ نماذج المناعة الاصطناعية:

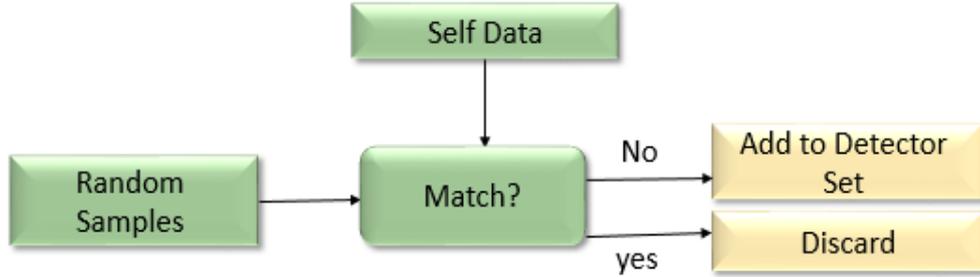
- هنالك مجموعة متنوعة من الخوارزميات والنماذج المناعية المندرجة تحت مسمى المناعة الاصطناعية والتي يحاكي كل منها آلية دفاعية مناعية ضمن جهاز المناعة الحيوي BIS وهي [6]:
- ✓ خوارزمية الاختيار السلبي (NSA) Negative Selection Algorithm.
 - ✓ خوارزمية الاختيار النسلي (CSA) Clonal Selection Algorithm.
 - ✓ شبكات المناعة الاصطناعية (AINE) Artificial Immune Network.
 - ✓ نظرية الخطر (Danger Theory).

4-2 خوارزمية الاختيار السلبي:

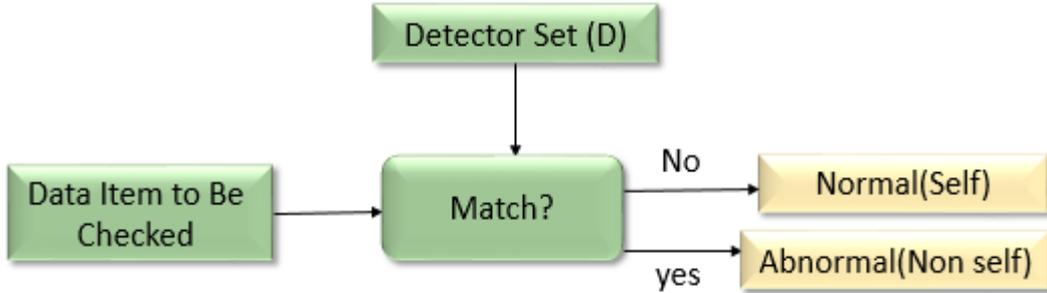
تم اقتراح هذا النموذج من قبل الباحث Forrest عام 1994 كطريقة لتمييز النماذج الصحيحة من الأخرى وقد سميت بالاختيار السلبي لأنها تعتمد في آلية عملها على اختيار وتحديد السلوك الشاذ (Non-Self) في النظام فهي تعمل بمبدأ مشابه لعمل الخلايا للمفاوية في الجسم من حيث توليد كواشف مناعية والتي تتعرف على النماذج غير الذاتية (non self) محاكيةً بذلك خاصية التمييز الذاتي / غير الذاتي [7]، ومنذ ذلك الوقت جذبت هذه الخوارزمية انتباه العديد من الباحثين والمهتمين لتطبيقها واختبارها في العديد من المجالات وحقق نجاحاً كبيراً وخاصة في مجال أمن الكمبيوتر وكشف التسلسل في الشبكات والتعرف على نماذج الأخطاء [8].

❖ مراحل عمل الخوارزمية:

1. تعريف البيانات الذاتية: والتي تمثل الحالة الطبيعية لسلوك أي نظام أو بيئة عمل.
2. توليد الكواشف المناعية التي تحقق خاصية Self-Tolerant بحيث لا تتطابق مع أي من النماذج الذاتية المولدة مسبقاً كما هو موضح في الشكل (2).
3. مراقبة عمل الكواشف المناعية المولدة: وذلك للتحقق من أداء عملها في تمييز النماذج غير الذاتية بشكل سليم.
4. التصنيف classification:
5. بعد التحقق من عمل الكواشف يبدأ استخدام مجموعة الكواشف الناتجة في تصنيف مجموعات البيانات إلى صحيحة وخاطئة (ذاتية وغير ذاتية) كما هو موضح في الشكل (3) [9]:



الشكل (2): خوارزمية الاختيار السلبي: مرحلة توليد الكواشف



الشكل (3) خوارزمية الاختيار السلبي: مرحلة التصنيف

❖ قواعد المطابقة matching rules:

تتم عملية المطابقة خلال مراحل خوارزمية الاختيار السلبي NSA بواسطة قياس الرابطة بين نموذجين والتي تمثل عدد العناصر المتشابهة بين هذين النموذجين والموجودة بنفس المواقع بعد تحديد عتبة تقارب يتم وفقها تحديد إذا النموذجين متطابقين أم لا حيث نميز الحالات التالية [10]:

▪ إذا كانت عدد العناصر المتشابهة مساوية أو أكبر من هذه العتبة يكون النموذجان متطابقين.

▪ إذا كانت عدد العناصر المتشابهة أقل من هذه العتبة يكون النموذجان غير متطابقين.

يتم الاعتماد على إحدى الآليتين التاليتين في المطابقة [11] حسب قيمة العتبة وهما:

1- مطابقة تامة:

تكون قيمة العتبة مساوية لطول (عدد البيات المكون منها النموذج) النموذج بحيث يتطابق كل عنصر من النموذج الأول مع مقلباته من عناصر النموذج الثاني بشكل كلي، ويتم استخدامها بشكل أساسي في الأنظمة الحساسة التي تتطلب دقة كبيرة.

2- مطابقة جزئية:

قد نحتاج في بعض الأنظمة المدروسة إلى توسيع مجموعة الكواشف والمطابقة التامة في هذه الحالة تكون محدودة كما أنّ الوصول إلى تطابق تام نادر جداً، يندرج تحت هذه الآلية طريقتين أساسيتين [7]:

▪ تطابق البيانات المتجاورة r-contiguous:

يتم في هذه الطريقة البحث عن تطابقات متجاورين الرموز في المواقع المتقابلة وفق قيمة العتبة

.٢

▪ مسافة هامينغ r-hamming:

يتم هنا البحث عن تطابقات غير متجاورة بالضرورة بين الرموز في المواقع المتقابلة من النماذج

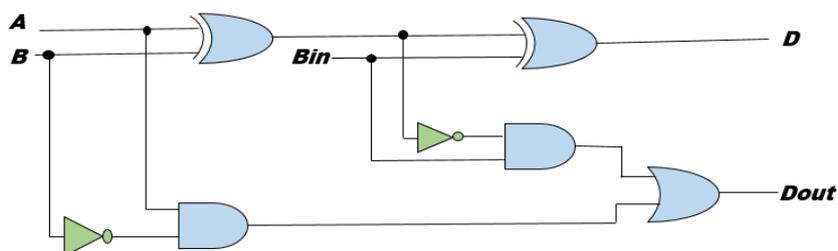
وفق العتبة المحددة.

اعتمدنا على خوارزمية الاختيار السلبي بشكل خاص لحل المشكلة التي يناقشها البحث لما حققته من شهره في مجال الكشف عن التغيير منذ تصميمها كأول خوارزمية من خوارزميات المناعة الاصطناعية AIS وذلك لقدرتها الكبيرة على المحاكاة العملية للمفهوم الأصلي لعمل الجهاز المناعي البشري في الكشف عن السلوك الشاذ والخلايا الخبيثة في الجسم وتمييزها بدقة عالية [5].

5- الدراسة العملية:

سيتم تطبيق نظام الاختبار والتشخيص المناعي المقترح على دائرة الطارح Subtractor

Circuit الموضحة في الشكل (4) والجدول (1):



الشكل (4): مخطط دائرة الطارح

بناءً على المراحل المناعية التي تم توضيحها في الشكل (1) وبإسقاطها على مشكلتنا بشكل خاص يتوجب علينا تحديد المفاتيح الأساسية التالية لحل المشكلة المطروحة مناعياً قبل البدء بالتطبيق العملي:

(1) مجال تطبيق النظام المناعي: وهو اختبار الدارات الرقمية وتشخيص الخطأ فيها.

(2) نحتاج لإنجاز العمل تحديد الركائز الأساسية التالية وهي:

▪ النموذج المناعي ويمثل بسلسلة ثنائية من الأصفار والواحدات (1,0) وسيكون لدينا نوعين

من هذه النماذج: النماذج الصحيحة Self-Pattern والنماذج غير السليمة Non-Self-Pattern.

▪ المجتمع المناعي Immune Population والذي يشمل الفضاء الاحتمالي لدخل الدارة

المختبرة والخرج الناتج عن تطبيقها.

- (3) نظراً لدقة الأنظمة الرقمية وحساسية التعامل معها فإن أي تغير في قيمة خانة (Bit) واحدة فقط سيؤدي إلى إنشاء نموذج مختلف تماماً لذلك سيتم اعتماد آلية المطابقة التامة مع قيمة عتبة r تساوي طول النموذج الثنائي.
- (4) سيتم الاعتماد بشكل أساسي على خوارزمية الاختبار السلبي NSA نظراً لفعاليتها الكبيرة في التعرف على النماذج وتحديد السلوك الشاذ.

1-5 نمذجة دائرة الطارح:

وذلك لتوليد كل من نماذج الخرج الصحيحة Self-Patterns والمجتمع المناعي والذي يُمثل كل الاحتمالات الممكنة لخرج الدارة فنحصل على التالي:

INPUT			OUTPUT	
A	B	Bin	D	Bout
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	1	0	0	0
1	1	1	1	1

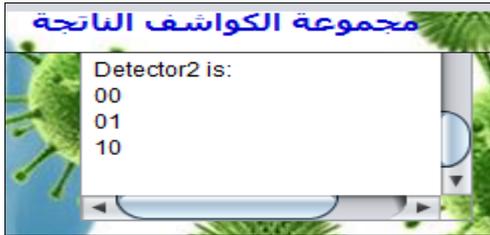
0	0
1	0
0	1
1	1

جدول (1): جدول الحقيقة True Table لدائرة الطارح
Self_Patterns:

2-5 توليد الكواشف المناعية:

يتم تطبيق خوارزمية الاختيار السلبي NSA مع نسبة مطابقة $r=2$ وفق مخطط محلل استجابة الخرج المناعي المقترح والموضح في الشكل (6):

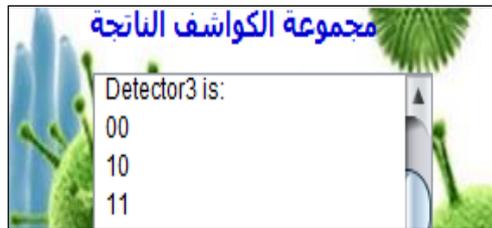
فنحصل على 4 مجموعات كما هي موضحة في الشكل (5):



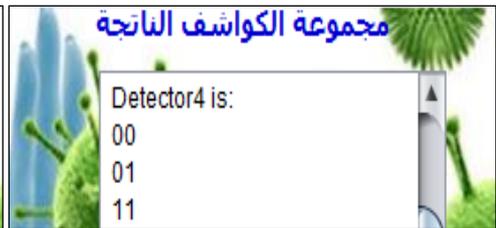
(b-5) مجموعة الكواشف الخاصة بالنموذج 11



(a-5) مجموعة الكواشف الخاصة بالنموذج 00



(c-5) مجموعة الكواشف الخاصة بالنموذج 01

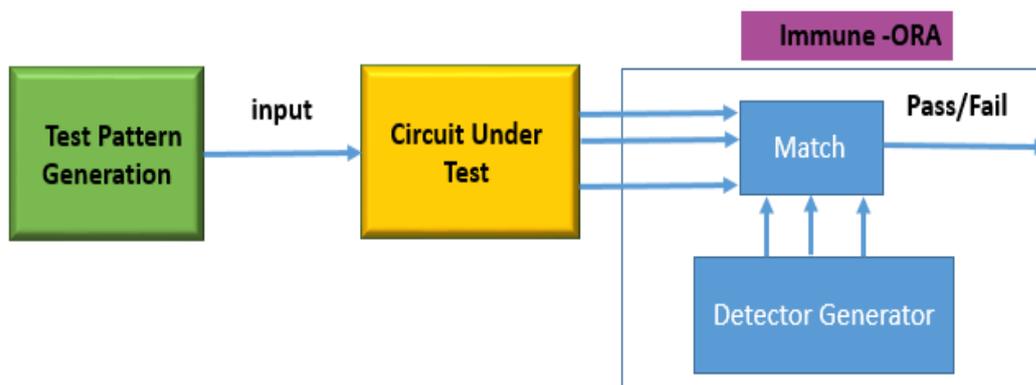


(d-5) مجموعة الكواشف الخاصة بالنموذج 10

الشكل (5): مجموعات الكواشف المناعية Detectors

3-5 اختبار دائرة الطرح:

بناءً على الخطوات السابقة نحصل على المخطط العام لمحلل استجابة الخرج المناعي المقترح والموضح في الشكل (6):



الشكل (6) محلل استجابة الخرج المناعي Immune-Output Response Analyzer

4-5 مرحلة التشخيص Diagnosis:

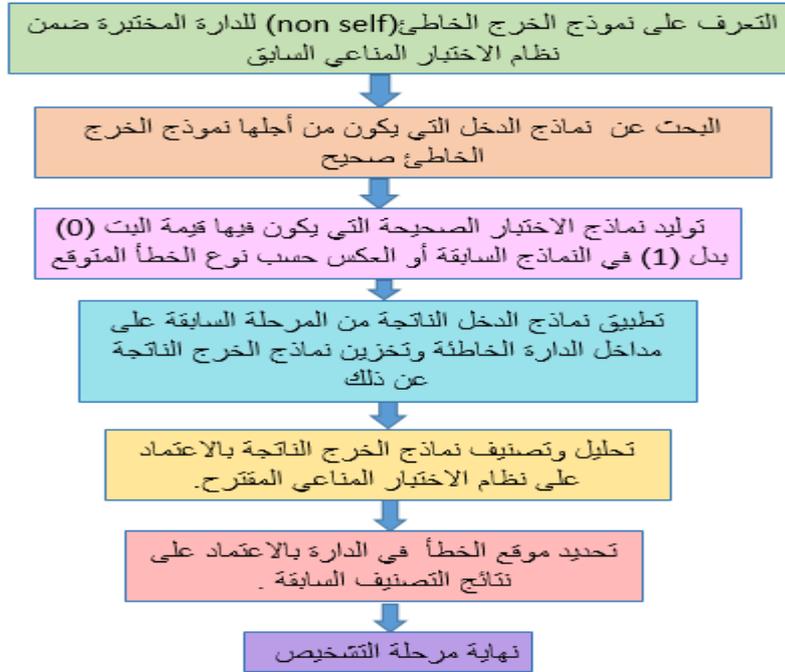
تشخيص الخطأ: هو إجراء لتحديد موقع الخلل في الدارة الالكترونية الرقمية من خلال مراقبة سلوكه، يتم تفعيل عملية التشخيص عن طريق الانحراف المكتشف في السلوك المتوقع لدارة معينة والذي يهدف بدوره إلى تحديد أصل هذا الخلل وبالتالي موقع جميع المساهمين في حدوثه [12].

سيتناول هذا البحث تشخيص الأخطاء من نوع Stuck_At Single في الدارات الرقمية من خلال اقتراح نظام متمم لنظام الاختبار الذي تم دراسته سابقاً لتشخيص وتحديد موقع هذه الأخطاء استناداً إلى آلية المناعة الاصطناعية بحيث يكون هذا النظام قادر على تحديد موقع الخطأ بدقة بعد كشفه والتأكد من وجوده في الدارة وذلك بالاعتماد على البارامترات والمعطيات التالية:

- ❖ كل نماذج الدخل المحتملة على مداخل الدارة (PopulationInput).
- ❖ نماذج الخرج الصحيحة للدارة المختبرة (Self-patterns).
- ❖ نموذج الخرج الذي تم تحديده من قبل الكواشف المناعية على أنه خاطئ (Non Self-pattern).

5-4-1 خطوات التشخيص:

يوضح الشكل (7) مراحل عملية التشخيص المناعي لخطأ الدارة المختبرة

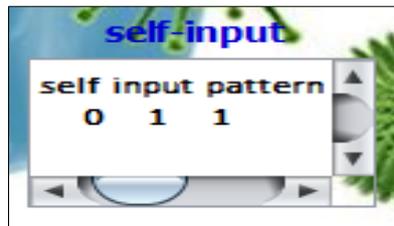


الشكل (7): خطوات ومراحل عملية التشخيص

لدينا نوعين من الأخطاء في بحثنا نتوقع ظهورها في جسم الدارة وهي S_A_0 و S_A_1 والتي تمت دراستها ضمن النظام المقترح للتشخيص ولنفرض وقوع خطأ وفق التالي:

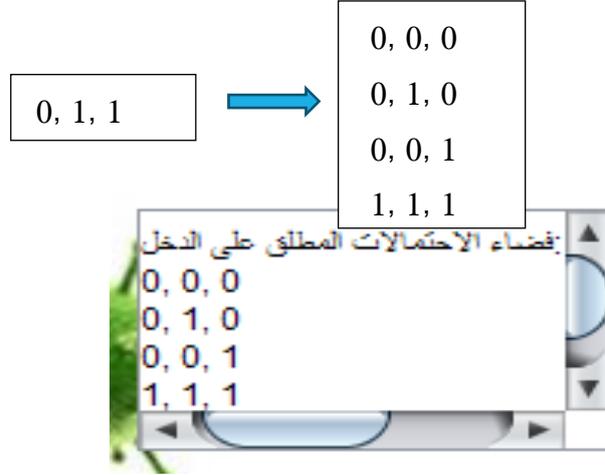
1. لنفترض تم تطبيق نموذج الدخل (0,0,1) على مداخل الدارة كان الخرج النهائي هو النموذج (01) ويفحص هذا الخرج باستخدام نظام الاختبار المناعي تم تصنيفه كنموذج خرج خاطئ نتيجة تطابقه مع الكواشف المناعية في المجموعة Detector2 والموضحة في الشكل (5-b).

2. تبدأ أول خطوة فعلية في التشخيص بتحديد النماذج الصحيحة التي من المفترض أن يكون أحدها مطبق على مداخل الدارة للحصول على نموذج الخرج (01) بدل (11) بوصفه نموذج خرج صحيح وهي:



الشكل (8): نماذج الدخل الصحيحة الموافقة للخرج الخاطئ

4. توليد فضاء احتمالي يمثل كل الخيارات المتوقع حدوث الخطأ فيها من خلال استبدال كل بت ذو القيمة (1) بالقيمة (0) وبالعكس حيث تُعتبر مجموعة الاختبار المولدة بمثابة العمود الفقري لأي خوارزمية تشخيص، فنحصل على التالي:



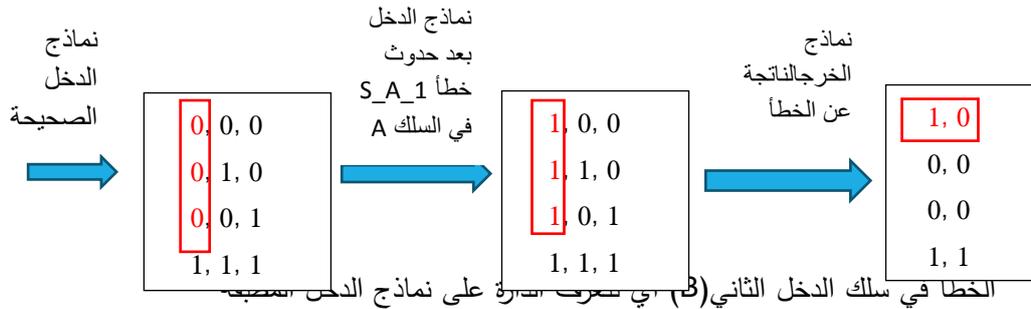
الشكل (9): نماذج الاختبار المستخدمة في التشخيص

5. لتحديد موقع الخطأ بدقة نقوم بتطبيق مجموعة نماذج فضاء الاحتمالات على مداخل الدارة وتخزين نماذج الخرج الناتجة في ملف ليتم تصنيفها من قبل نظام الاختبار المناعي وتحليل النتائج النهائية للتصنيف وتحديد موقع الخطأ وفقها بحيث نميز ثلاثة خيارات سيتم دراستها بالتفصيل وهي:

❖ **الخطأ في أحد مداخل الدارة الخاضعة للاختبار:** ولتكن دارة طارح بثلاث مداخل (A,B,Bin) حيث يمكن نشوء الاحتمالات الآتية:

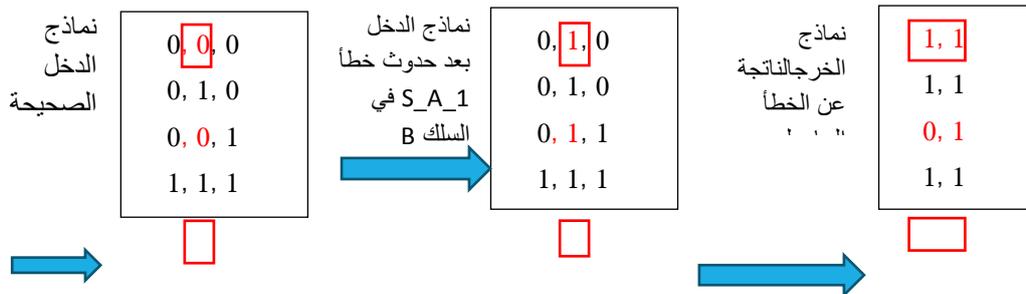
a. الخطأ في سلك الدخل الأول (A) أي نتعرف الكواشف على نماذج الدخل

المطبقة بالشكل:



b.

بالشكل:

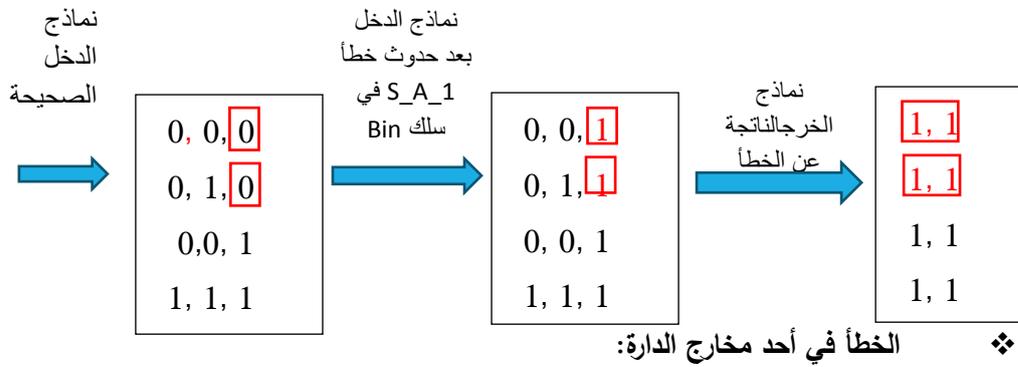




الشكل (10): تشخيص الخطأ في سلك الدخل الثاني B

c. الخطأ في سلك الدخل الثالث (Bin) أي تتعرف الكواشف على نماذج الدخل المطبقة

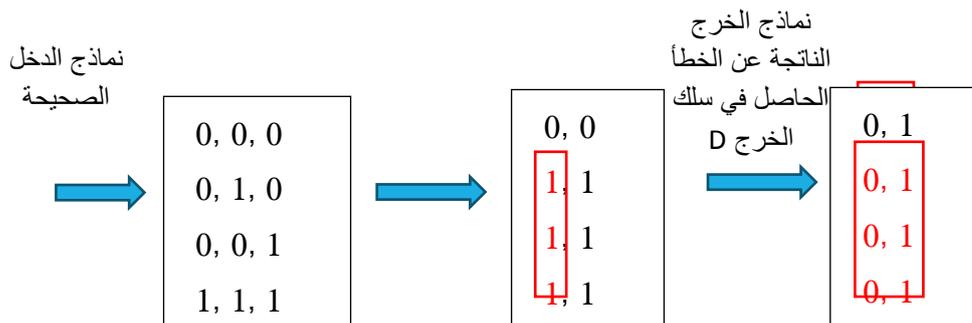
بالشكل:



a. في حال لم يكن الخطأ على أي سلك دخل فلاحتمال الثاني لحدوثه هو أن يكون على

أحد أسلاك الخرج ويتم التحقق من ذلك من خلال اختبار نماذج الخرج بحيث نحصل على النماذج التالية

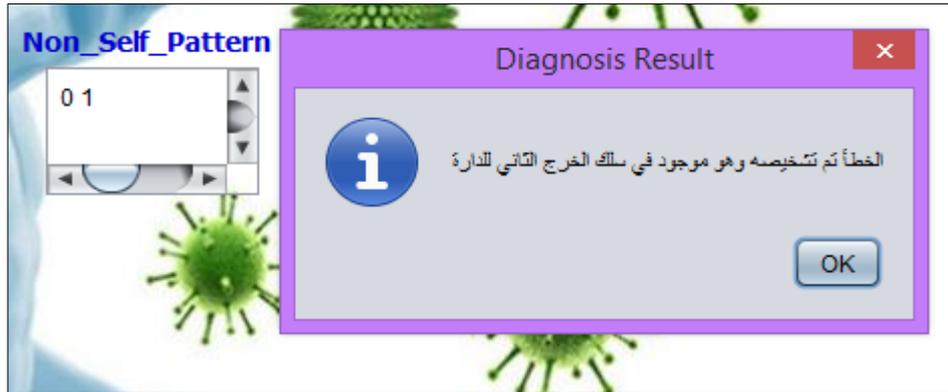
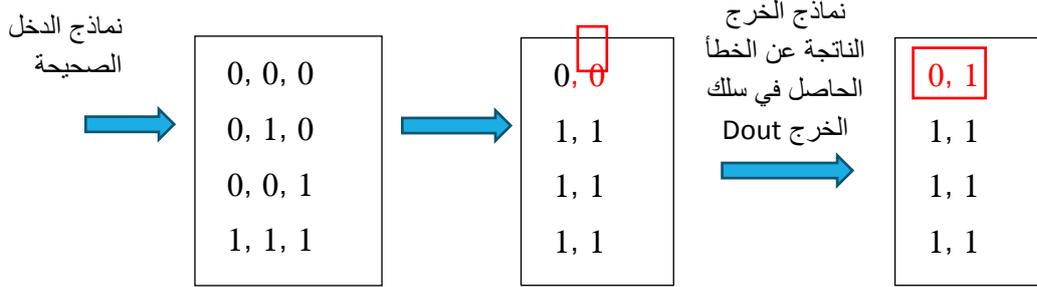
في حال كان الخطأ على سلك الخرج الأول لدارة الطارح D:





الشكل (11): تشخيص الخطأ في سلك الخرج الاول D

b. الخطأ على سلك الخرج الثاني Dout حيث نحصل على نماذج الخرج التالية:



الشكل (12): تشخيص الخطأ في سلك الخرج الثاني Dout

❖ الخطأ في الأسلاك الداخلية للدارة:

في حال لم يتم تحديد موقع الخطأ في المداخل أو المخارج الأساسية للدارة بناءً على الخطوات السابقة يكون الاحتمال الأخير لاستكمال عملية التشخيص هو اختبار الأسلاك الداخلية لدارة الطراح وذلك بتقسيم الدارة إلى أجزاء وإخضاع كل جزء لنظام الاختبار المناعي وكواشفه مع اتباع الخطوات السابقة

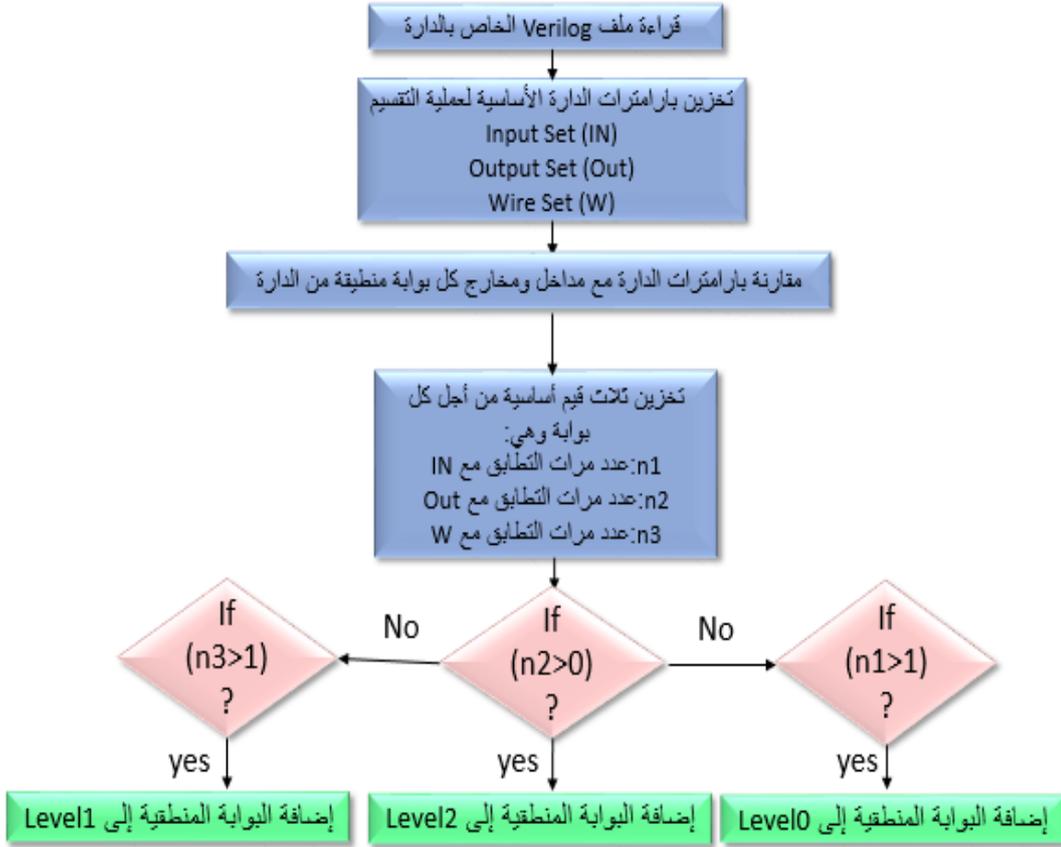
لفحص مداخل ومخارج كل قسم بعد توليد البارامترات الأساسية للتشخيص والخاصة بكل قسم وليس بجسم الدارة ككل.

❖ آلية تقسيم الدارة:

بعد التوصل إلى النتيجة السابقة نقترح آلية لتقسيم الدارة منطقياً إلى مستويات (levels) وكل مستوى يحوي مجموعة من البوابات المنطقية يتم تحديد عدد هذه المستويات بالاعتماد على عاملين أساسيين:

- عدد البوابات المنطقية المكونة منها الدارة الرقمية.
- عدد مداخل ومخارج الدارة الرئيسية.

وتم توضيح آلية التقسيم المقترحة بالمخطط الصندوقي التالي:



الشكل (13): المخطط الصندوقي لخوارزمية التقسيم المقترحة
قمنا باعتماد الأسس السابقة في تقسيم دارة الطارح مع تحديد البارامترات الأساسية كما هو موضح بالشكل

(13) وهي:

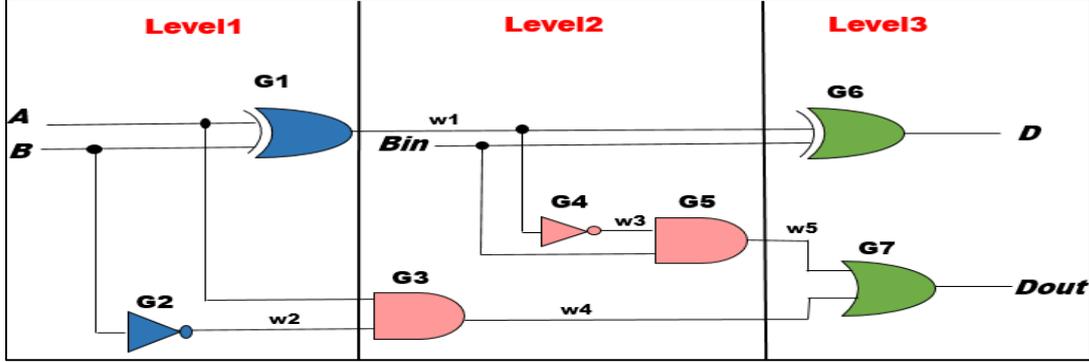
- البوابات المنطقية gates=7 (G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7)
- المداخل الأساسية للدارة IN=3 (A,B,Bin)
- المخارج الأساسية للدارة Out=2 (D,Dout)
- الأسلاك الداخلية للدارة Wire=5 (w1,w2,w3,w4,w5)

وبالتالي سيكون لدينا 3 مستويات منطقية تتوزع عليها عناصر الدارة (البوابات المنطقية) وهي level, level2, level3.

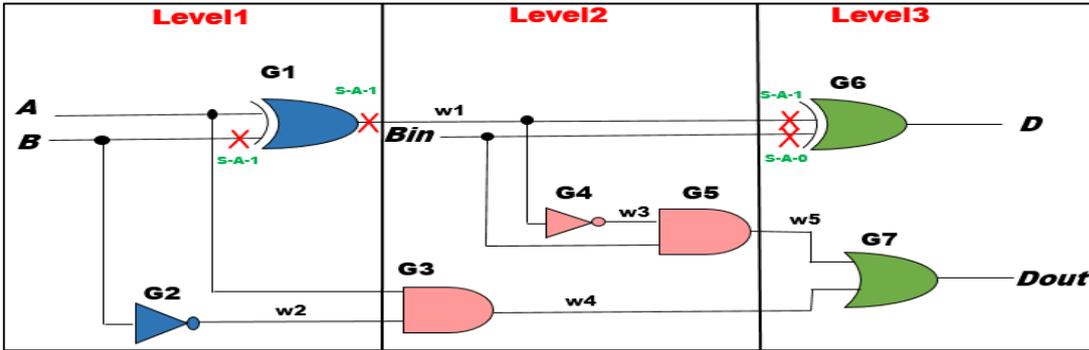
.level3

ويبين الشكل (14) نتيجة عملية التقسيم النهائية والذي يمثل كل مستوى والبوابات التي تنتمي إليه وفق التالي:

Level 1= {G1, G2}
Level 2= {G3, G4, G5}
Level 3= {G6, G7}



الشكل (14): نتيجة تطبيق آلية التقسيم المقترحة على دارة الطراح بعد إجراء عملية التقسيم لدارة الطراح وفق الآلية السابقة نلاحظ أن احتمالات الخطأ تتركز في المستوى الأول (Level 0) والمستوى الثالث (Level 3) وذلك بعد استثناء الحالات التي تم دراستها سابقاً لاحتمالات الخطأ على المدخل والمخارج الأساسية للدارة كما هو موضح في الشكل (15):



الشكل (15): مواقع الأخطاء الداخلية ضمن الدارة
ويتطبيق آلية التشخيص السابقة على كل مستوى بشكل مستقل بوصفه دارة جزئية نكون بذلك حددنا موقع الخطأ الحاصل ونوعه بدقة عالية.

6- النتائج والمناقشة:

قمنا بتطبيق آلية الاختبار المقترحة على مجموعة من الدارات الرقمية المختلفة من حيث عدد المدخل (N.input) وعدد المخارج (N.output) وعدد النماذج الذاتية والتي تم تصميمها والتحقق من بنيتها باستخدام برنامج DSCH 3.8 كما هو موضح في الجدول (2):

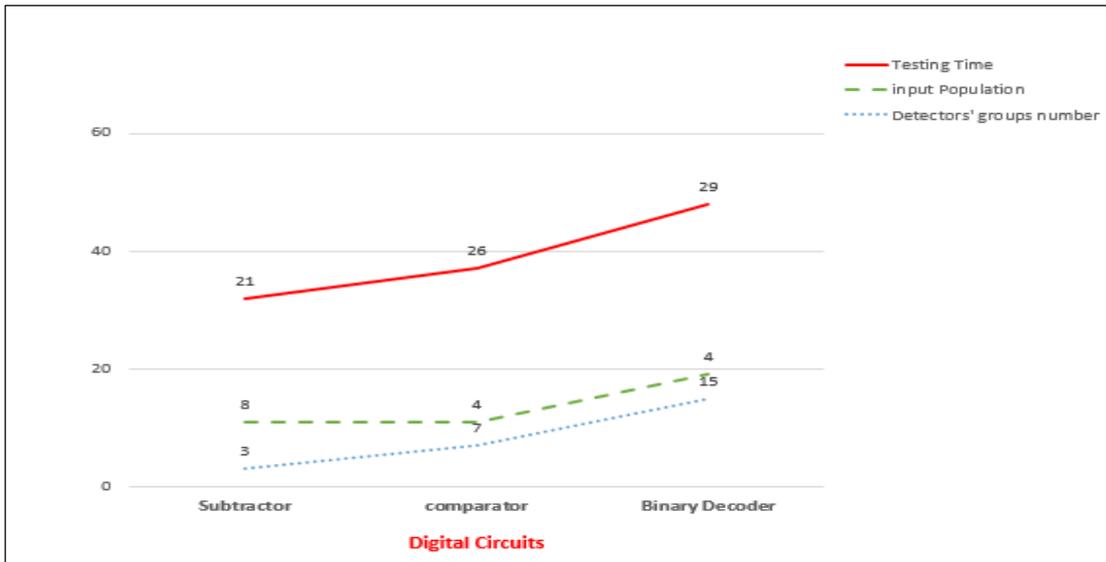
Digital circuit	N.input bit	N.output bit	Output population	self-patterns	N.faults
Subtractor	3	2	4	4	18*2
Binary Decoder	2	4	16	4	36*2
comparator	2	3	8	3	15*2

الجدول (2): بارامترات الدارات الرقمية الخاضعة للاختبار

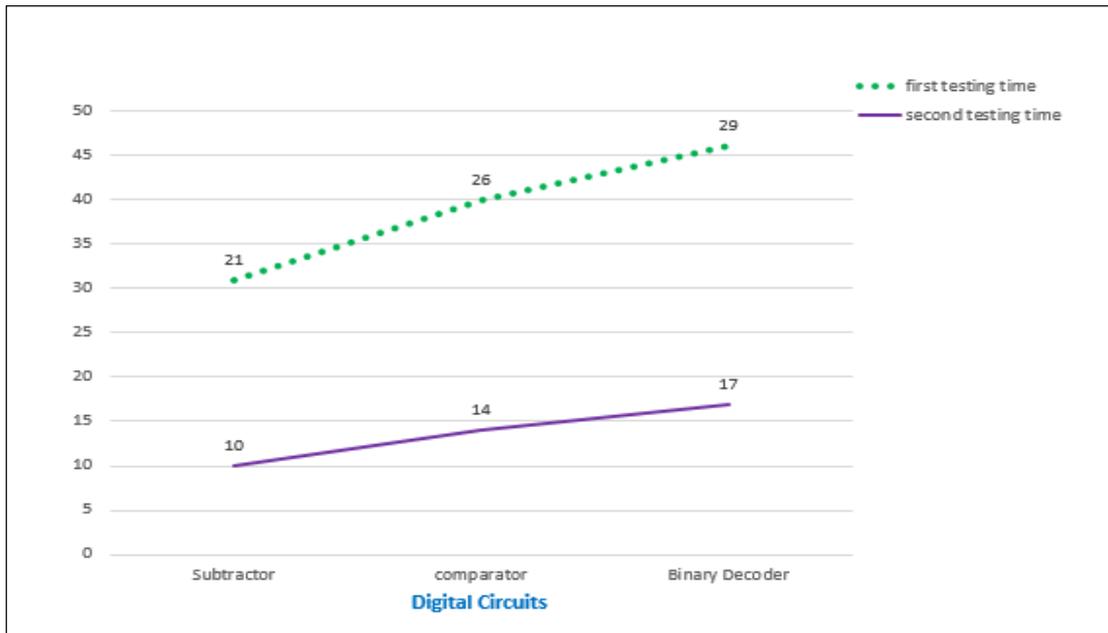
قمنا بقياس الزمن اللازم لاختبار كل من الدارات السابقة باستخدام النظام المناعي المصمم، والزمن الذي يستغرقه في اختبار الدارة نفسها مرة ثانية (Second Testing Time) كما هو موضح في الجدول (3):

الجدول (3): زمن الاختبار للدارات الرقمية باستخدام نظام الاختبار المناعي المقترح

Digital circuit	Subtractor	comparator	Binary Decoder
Input population	8	4	4
Detectors' groups number	4 (3 pattern in each group)	3 (7 pattern in each group)	4 (15 pattern in each group)
Testing Time	21 sec	26 sec	29 sec
Second Testing Time	10 sec	14 sec	17 sec



الشكل (16): زمن الاختبار مقارنة بعدد الكواشف لكل دارة وإعادة الاختبار للدارة نفسها وقياس زمن الاختبار مرة ثانية نلاحظ أنّ عملية الاختبار استغرقت زمناً أقل بشكل ملحوظ من السابق والسبب في ذلك أنّه في حال اختبار الدارة نفسها من جديد نقوم بالمطابقة مع الكواشف التي تم توليدها مسبقاً، وبذلك يتم تجاوز مرحلتي توليد الكواشف والمراقبة والاكتفاء بمرحلة التصنيف النهائية ضمن نظام الاختبار المناعي المصمم، كما هو موضح في الشكل (17).



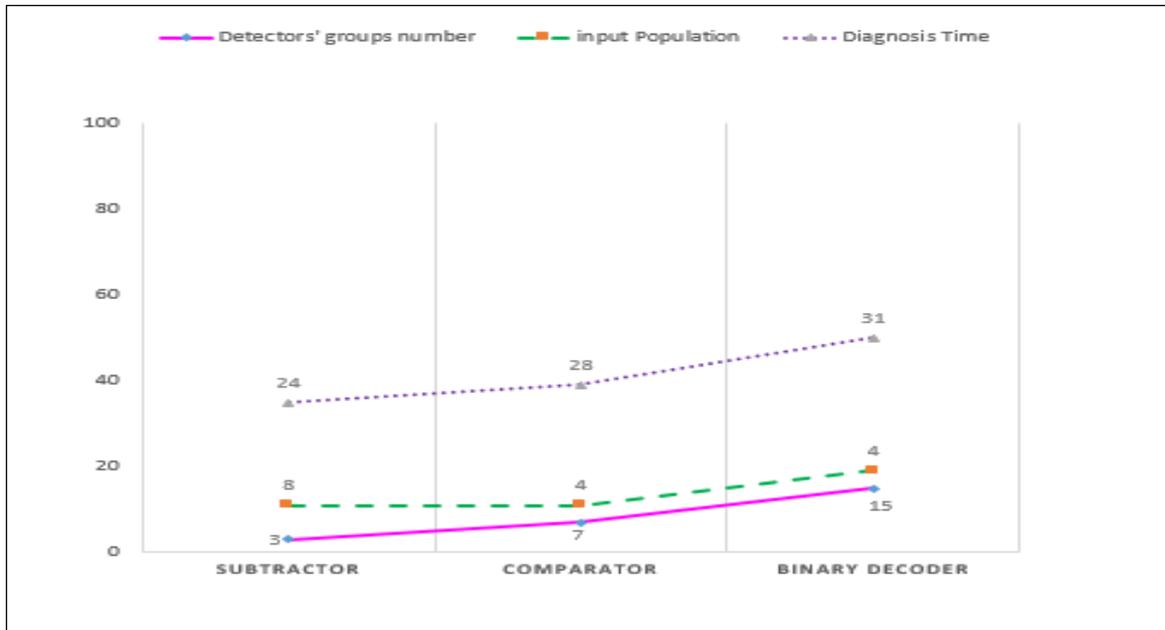
الشكل (17): مقارنة بين زمني اختبار الدارة أول مرة وثاني مرة

1-6 دراسة وتحليل نتائج التشخيص:

يوضح الجدول (4) زمن تشخيص الخطأ في الدارات المختبرة باستخدام النظام المناعي المقترح

جدول(4): زمن التشخيص لخطأ مكتشف في الدارات الرقمية

Digital circuit	Subtractor	comparator	Binary Decoder
Input population	8	4	4
Detectors' groups number	4 (3 pattern in each group)	3 (7 pattern in each group)	4 (15 pattern in each group)
Diagnosis Time	24 sec	28 sec	31 sec



الشكل (18): زمن التشخيص مقارنة بعدد الكواشف وعدد احتمالات الدخل لكل دارة

ونتوصل من خلال تحليل النتائج الموضحة في الجدول (4) والشكل (18) المرفق له إلى ما يلي:

يرتبط الزمن اللازم للتشخيص ارتباط وثيق بعاملين أساسيين هما:

1. مجتمع الدخل Input population لكل دارة والتي سيتم اختيار نماذج الاختبار المستخدمة في تشخيص

الخطأ الحاصل منها.

2. عدد الكواشف المولدة لكل دارة والتي تُبنى عليها عملية الاختبار الجزئية المتعلقة بالمرحلة الثالثة من

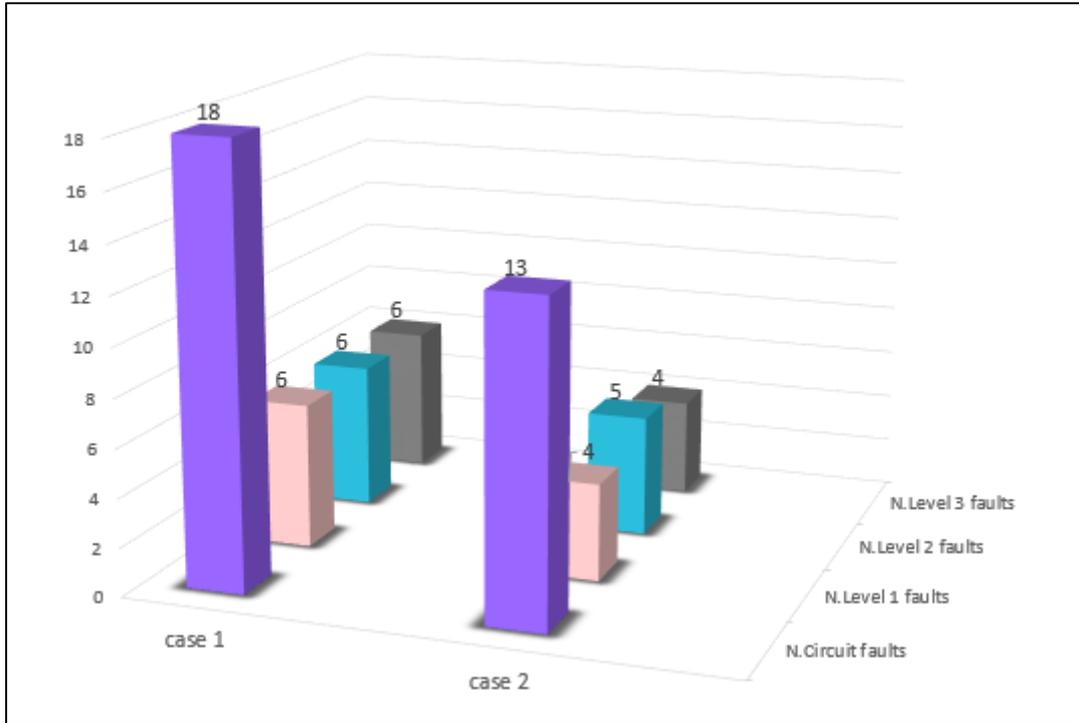
التشخيص (وهي اختبار الخرج الناتج عن نماذج الدخل المطبقة على مداخل الدارة) ويلعب هذا العامل دور رئيسي في

التأثير على زمن التشخيص.

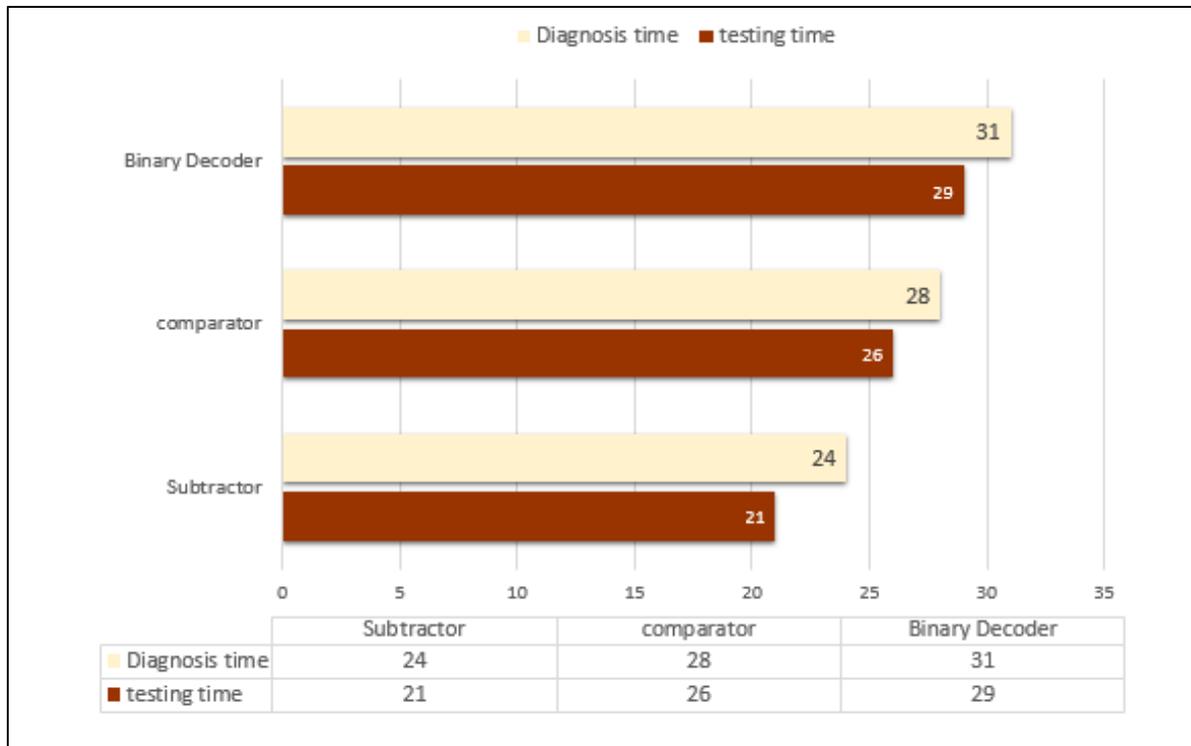
ومع استخدام آلية التقسيم المقترحة في عملية شخيص الأخطاء الداخلية من نوع Single Stuck-At في دارة

الطراح ومع استثناء الحالات المدروسة سابقاً والتي تشمل المداخل والمخارج الأساسية للدارة بعد التقسيم نلاحظ أنّ عدد

احتمالات الخطأ بعد التقسيم يقل بنسبة 27.7% موزعة على مستويات التقسيم الثلاثة كما هو مبين في الشكل (19) بحيث نوضح فيه عدد الأخطاء في كل مستوى قبل استثناء الحالات المدروسة (case1) وبعد استثناء تلك الحالات (case2):



الشكل (19): مقارنة عدد الأخطاء قبل وبعد عملية التقسيم



الشكل (20): مقارنة زمن الاختبار وزمن التشخيص لكل دائرة

نلاحظ من المخطط البياني في الشكل (20) أنّ الزمن الذي تستغرقه عملية الاختبار متقارب من زمن التشخيص على الرغم من أنّ مرحلة التشخيص تشتمل مراحل أكثر والسبب في هذا يعود إلى مرحلة توليد الكواشف التي يتم تنفيذها لمرة واحدة والتي تستهلك الزمن الأكبر من مرحلة الاختبار بينما في مرحلة التشخيص فإن الكواشف تكون جاهزة وتقوم فقط بعملية الاختبار المطلوبة لفحص خرج الدارة.

6- الاستنتاجات والتوصيات:

قمنا خلال هذا البحث بتصميم نظام اختبار مناعي لفحص الدارات الرقمية بالاعتماد على أسس وخوارزميات أنظمة المناعة الاصطناعية وأجريت عملية الاختبار بمراحلها على دارة طارح، وبعد اختبار النظام المقترح على مجموعة من الدارات الرقمية المختلفة بعدد احتمالات الدخل والخرج وحساب عدد الكواشف المناعية المحققة لأكبر تغطية خطأ ممكنة مع دراسة العوامل المؤثرة بزمن الاختبار تم تصميم نظام رديف يقترح آلية مناعية لتشخيص وتحديد موقع الخطأ المكتشف في الدارة بدقة وجودة عالية مع قياس زمن التشخيص لمجموعة الدارات السابقة وتحليل النتائج ، كما تم اقتراح خوارزمية لتقسيم الدارة الرقمية كأجراء احتياطي قد نحتاج إليه في إحدى خيارات التشخيص ويمكن أن نلخص الاستنتاجات التي توصلنا إليها وفق التالي:

■ تُعتبر أنظمة المناعة الاصطناعية AIS وخوارزمية الاختيار السليبي NSA بشكل خاص فعالة جداً في مجال تحديد السلوك الشاذ والتعرف على النماذج الخاطئة في الدارات الرقمية.

■ إنّ تطبيق نظام الاختبار المناعي المقترح (بمراحلته الكشف والتشخيص) لا يتطلب أي معدات أو كلفة مادية باهظة مقارنة بتقنيات الاختبار التقليدية مثل Automated Test Equipment (ATE) التي تتطلب كلفة مادية كبيرة جداً [13].

■ يتأثر الزمن (المقدر بالثانية) اللازم لاختبار الدارة باستخدام النظام المقترح بعدد الكواشف المناعية المولدة حيث يزداد بازديادها.

■ يتأثر زمن التشخيص بشكل خاص بعدد احتمالات الدخل (Input population) وعدد الكواشف المناعية المولدة لكل دارة.

■ تُحقق أنظمة المناعة الاصطناعية نموذج ذكاء حاسوبي فعال جداً للكشف والتشخيص بدقة وجودة عالية وزمن وكلفة منخفضة كما توضح النتائج السابقة.

وبالنتيجة يقترح البحث التوصيات التالية:

❖ دراسة أداء أنظمة المناعة الاصطناعية في الكشف عن أنواع أخرى من أخطاء الدارات الرقمية غير Stuck-At faults ومقارنة نتائجها مع النتائج التي توصلنا إليها في هذا البحث لتحديد مدى فعاليتها مع كل نوع والتأثيرات التي يفرضها كل منها على عملية الاختبار.

❖ دراسة النماذج المناعية الأخرى التي تتطوي عليها أنظمة المناعة والعمل على تطوير بنية شاملة للاختبار تشمل كافة ميزات AIS بوصفه أحد نماذج الذكاء الحاسوبي الواعدة.

❖ دراسة نماذج الذكاء الحاسوبي الأخرى مثل الشبكات العصبونية والخوارزمية الجينية والحوسبة التطويرية والعمل على بناء نموذج ذكاء حاسوبي هجين يقدم إضافة للميزات المحققة في النظام المقترح في بحثنا عملية التنبؤ بالأخطاء وتحليل البيانات.

- ❖ دراسة حالات تكافؤ وتساوي الأخطاء لمحاولة تقليص عدد الأخطاء الواجب دراستها في التشخيص.
- ❖ تطوير النظام المقترح ليكون قادر على تغطية مجال اصلاح Recovery الدارات الرقمية التي تم كشف وتشخيص الخطأ فيها باستخدام AIS.

7-المراجع:

- [1] RUSSELL J. S; NORVIG P. Artificial Intelligence a Modern Approach. Third Edition, New Jersey, 2016, 1151.
- [2] KACPRZYK, J; PEDRYCZ, W. Springer handbook of computational intelligence. Springer, 2015,1634.
- [3] VLADICESCU, F; ALBEANU, G. Recent Advances in Artificial Immune Systems: Models, Algorithms, and Applications. In Recent Developments in Intelligent Nature-Inspired Computing, IGI Global, 2017, 92-114.
- [4]DASGUPTA, D; YU, S; NINO, F. Recent advances in artificial immune systems: models and applications. Applied Soft Computing, Vol.11, No. 2, 2011, 1574-1587.
- [5]DASGUPTA, D. Advances in artificial immune systems. IEEE computational intelligence magazine, 2006, Vol.1, N.4, 2006, 40-49.
- [6]DASGUPTA, D; YU, S; NINO, F. Recent advances in artificial immune systems: models and applications. Applied Soft Computing, Vol.11, No. 2, 2011, 1574-1587.
- [7] YUE, X; WEN, D; MA, H ; Zhang, J. Fault detection based on real-value negative selection algorithm of artificial immune system. International Conference on Intelligent Computing and Cognitive Informatics, IEEE, 2010, 243-246.
- [8] MOHI-ALDEEN, S; MOHAMAD, R; DERIS, S. Application of Negative Selection Algorithm (NSA) for test data generation of path testing. Applied Soft Computing, Vol. 49, 2016, 1118-1128.
- [9] HART, E; TIMMIS, J. Application areas of AIS: The past, the present and the future. Applied soft computing, Vol.8, N.1, 2008, 191-201.
- [10] CASTRO, L. N; DE CASTRO, L, N; TIMMIS, J. Artificial immune systems: a new computational intelligence approach. Springer Science & Business Media, 2002,357.
- [11] ABBASS, H. A; ZINCIR-HEYWOOD, N; FALCON, R; ABIELMONA, R. Recent Advances in Computational Intelligence in Defense and Security. In: Recent Advances in Computational Intelligence in Defense and Security. Springer, Vol.621, 2016,743.

[12] Silva, G. C., Carvalho, E. E., & Caminhas, W. M. (2020). An artificial immune systems approach to case-based reasoning applied to fault detection and diagnosis. *Expert Systems with Applications*, 140, 112906.

[13] HU, K; CHAKRABARTY, K; HO, T. Fault modeling, testing, and design for testability. *Computer-Aided Design of Microfluidic Very Large Scale Integration (mVLSI) Biochips*. Springer, Cham, 2017, 81-115.