

## تصميم ترميز هامينغ المطور باستخدام البوابات العكوسة متسامحة العطل

هزار فائز محمد \*

(تاريخ الإيداع 2022/8/28 . قبل للنشر في 2023/1/10)

### □ ملخص □

تشكل عمليات نقل البيانات الخالية من الأخطاء تحدياً كبيراً في أنظمة الاتصالات، حيث يوجد الكثير من الأخطاء التي تحدث في القناة بسبب الضجيج وعوامل الوسط الأخرى. لمواجهة هذه المشاكل تم استخدام ترميزات كشف وتصحيح الأخطاء لحماية المعلومات أثناء نقلها وتخزينها في الذاكر، حيث تتحدد جودة الترميز بعاملين أساسيين هما: عدد الأخطاء المكتشفة والقدرة على تصحيحها.

يعد ترميز هامينغ من أهم الترميزات القادرة على كشف خطأ وحيد وتصحيحه. ففي هذا البحث قمنا بتطوير رمز ومفكك ترميز هامينغ ليصبح قادر على كشف خطأ مزدوج وتصحيحه أيضاً. وتم التعديل على بنية الدارة عالية التكامل الخاصة به ليتمكن من تحديد الخطأ الثنائي باستخدام الـ Matlab والمكتبة Simulink للتصميم والمحاكاة. وبما أن المنطق العكسي هو أحد الأساليب الواعدة لتقليل الطاقة المبددة، حيث يكون لها القدرة على إنتاج أجهزة إلكترونية عالية السرعة للغاية وتوفر الطاقة، ونظراً إلى أن التسامح مع العطل يزيد من وثوقية النظام لذا تم استخدام بوابات المنطق العكسي المتسامحة مع العطل.

**كلمات مفتاحية:** EDC، هامينغ، رمز، مفكك ترميز، ماتلاب، التسامح مع العطل، فائضية المعلومات، المنطق العكسي، KMD، مبدأ لاوندر

## Design an improving hamming code using fault tolerant reversible gates

hazar faez Mohammad \*

(Received 28/8/2022 . Accepted 10/1/2023)

### □ ABSTRACT

Error-free data transmission is a big challenge in communication systems, because of many errors that occur in the channel due to noise and other medium factors. Error detection and correction codes are one of the most important methods to confront these problems. These codes are used to protect information in the memory and during its transmission. Where coding quality is determined by two main factors: the number of detected errors and the ability to correct them.

One these codes is Hamming code, which is one of the most important codes witch can detects a single bit error and corrects it. In this research we developed a Hamming encoder and decoder to be able to detect a double bit error and correct it. The VLSI architecture has been modified to be able to determine double bit error using Matlab and the Simulink tool for design and simulation.

Since reversible logic is one of the promising methods to reduce wasted energy, as it is able to produce very high-speed electronic devices and save energy, and given that fault tolerance increases system reliability, fault-tolerant reversible gates have been used.

**Key Words:** EDC, hamming, encoder, decoder, Matlab, Simulink, double error, Reversible logic, Landauer's principle, KMD.

---

\* Master at Electronical Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering, Tartous University, Syria.

## 1- المقدمة:

يعد نقل البيانات الرقمية أساس لجميع التطبيقات في عصرنا الحديث، حيث تحدث أخطاء في البيانات أثناء نقلها من المرسل إلى المستقبل بسبب الضجيج والتداخلات ووجود عوامل الوسط الخارجية. يحدث الخطأ عندما يتم تبادل بت بين المرسل والمستقبل، لحل هذه المشكلة تم إدخال دارات الكشف عن الأخطاء وتصحيحها في جميع الدارات الرقمية، حيث يضيف تصحيح الخطأ بتات التكرار إلى البيانات الموجودة لجعل نقل البيانات مقاوماً لعوامل الوسط الخارجية.

توجد العديد من أنواع اكتشاف الأخطاء وتصحيحها مثل فحص التكافؤ، وفحص التكرار الدوري CRC و Reed solmon code. يعد ترميز هامينغ أكثر رموز كشف الأخطاء وتصحيحها استخداماً لأنه سهل التنفيذ، حيث يضيف بتات تكرار محدودة إلى البيانات مما يجعل الكود بسيطاً. ومع ذلك، فإن ترميز هامينغ هو ترميز تصحيح خطأ واحد فقط، ويمكن استخدامه في حالة واحدة وهي عندما يكون معدل الخطأ منخفضاً.

إن تصميم ترميز هامينغ باستخدام بوابات تقليدية غير عكوسة تبعد قدرًا هائلاً من الطاقة، وبما أن استهلاك الطاقة هو الاعتبار الأساسي في تصميم أي دارة، لذلك كان لابد من استبدال البوابات التقليدية ببوابات قابلة للانعكاس، مما يقلل من إجمالي استهلاك الطاقة في الدارة.

يمكن استرداد البيانات المدخلة من نتائج الخرج باستخدام الدارات المنطقية العكسية، حيث يمكن للنظام أن يعمل للأمام وللخلف، كما أنه يحسن الأداء العام للدارة من خلال السماح بكثافة أعلى وسرعات أعلى عن طريق تقليل تبديد الطاقة.

## 2- الدراسات المرجعية:

لقد أجريت العديد من الأبحاث في مجال دارات كشف وتصحيح الأخطاء في مجال الاتصالات والشبكات، وقدرتها على تحسين وثوقية النظام وقدرته على الإرسال والاستقبال، وذلك رغم وجود أخطاء في الرسالة المستلمة عن طريق تصحيحها بواسطة ترميزات متعددة في مجال نظرية المعلومات.

قدم الباحثان Kumar و Umashankar في عام 2007 اقتراح تحسين على ترميز هامينغ، حيث تم إلحاق بتات التكرار في نهاية بتات البيانات، مما أدى إلى التخلص من الحمل الزائد لتداخل بتات التكرار في نهاية المرسل وإزالتها في نهاية جهاز الاستقبال بعد التحقق من وجود خطأ أحادي البت وما يترتب عليه من تصحيح إن وجد. بالإضافة إلى ذلك، فإن الجهد المطلوب في تحديد قيم بتات التكرار أقل في الطريقة المقترحة [1].

وفي العام نفسه تم تقديم تطبيقات مختلفة لدارات ترميز هامينغ (7، 4) لكشف وتصحيح الأخطاء، حيث ثبت أن التصميم باستخدام بوابة  $HCG4*4$  هو الأمثل للغاية من حيث عدد البوابات والمخارج المهمة القابلة للانعكاس، وقد وفر هذا التصميم أيضاً طريقة لدمج التسامح مع الأعطال في دارات قابلة للعكس دون وجود جهد إضافي كبير في التصميم وبأجهزة بسيطة متواضعة. لكن لم يتم تطبيق هذه الدارات عملياً على محاكي بسبب وجود نقص في أدوات المحاكاة التي تدعم البوابات القابلة للانعكاس، حيث تم استخدام بوابات FG،HCG [2].

في عام 2017 قام مجموعة من الباحثين بتصميم دارة مرز ومفكك ترميز هامينغ باستخدام dsch و vhdl ودراسة قدرته على كشف خطأ وحيد وتصحيحه [3].

وفي عام 2017 أيضا قام الباحثون V. Shiva Prasad Nayak و Madhulika Chinthaparthi و Pravalu Uppugunduri بتقديم طريقة مبتكرة لتقليل استهلاك الطاقة في دارات ترميز هامينغ باستخدام البوابات المنطقية القابلة للعكس. تحتوي دارة تشفير ومفكك التشفير القابلة للانعكاس المقترحة على 27 بوابة واستهلاك ال طاقة 7.2PW. لكن ترميز هامينغ يعتبر من أبسط الطرق للتصحيح، حيث تمكن من تصحيح خطأ وحيد ولم يتم تحقيق التسامح مع العطل، إذ تم استخدام بوابات F2G, FG [4].

وفي بداية العام 2019 طبق مجموعة من الباحثين بنية لمرمز ومفكك الترميز لكود هامينغ باستخدام Verilog pro 6.5 و fpga حيث تم إرسال n-bit من المعلومات مع (n-1) بتات تكافؤ إضافية وتم التحقق من عملية الاستقبال بنجاح عند وجود خطأ وحيد [5].

وفي العام 2019 ظهرت بوابات KMD الأربعة حيث تم تصميم وحدة حساب ومنطق بالاعتماد على البوابات العكوسة متسامحة العطل وهي kmd1، kmd2، kmd3، kmd4 لتقليل المساحة المستهلكة والحفاظ على الطاقة وتمت مقارنتها مع تصميم آخر يعتمد على البوابات العكوسة العادية Fredkin و Toffoli ، حيث لوحظ انخفاض في التكلفة الكمومية بمقدار 69% وعدد البوابات بنسبة 21% [6].

### 3- أهمية البحث:

تأتي أهمية هذا البحث من حقيقة أن:

- التقنيات العكوسة هي التقنيات الأكثر تطوراً حالياً وتوجه العلم نحوها بشكل كبير لأهميتها في مجال الحوسبة الكمومية.
- الحاجة إلى سرعات معالجة أكبر وقدرات تخزين أكثر.
- تقليل تبديد الطاقة والحفاظ عليها.
- تحقيق وثوقية عالية جداً.
- الحاجة إلى دارات كشف وتصحيح الأخطاء في جميع الدارات والأنظمة الإلكترونية وأهمية نظرية المعلومات والترميز في مجال الترميز العصبي مع كيفية تمثيل المعلومات الحسية والإشارات العصبية داخل الدماغ بعد ترميزها رقمياً.

### 4- طرق البحث وأدواته:

تم الاعتماد في هذا البحث بشكل أساسي على برنامج الماتلاب، وهو برنامج رائد في التطبيقات الهندسية والرياضية من إنتاج شركة math work، يستخدم لبناء المصفوفات والتعديل عليها، وفي الرسم البياني للتتابع الرياضية، وتنفيذ الخوارزميات المختلفة، وإنشاء واجهات رسومية، تم استخدام الأداة (Simulink) لبناء البوابات العكوسة وتصميم النظام منطقياً.

## 5- نظرية المعلومات وأساسيات الترميز

### 1-5 تعريف نظرية المعلومات:

هي فرع من فروع نظرية الاحتمالات مع تطبيقات واسعة لأنظمة الاتصالات. مثل العديد من فروع الرياضيات الأخرى، فإن نظرية المعلومات لها أصل مادي، وقد بدأ من قبل علماء الاتصالات الذين كانوا يدرسون التركيب الإحصائي لمعدات الاتصالات الكهربائية وقد أسسها بشكل أساسي كلود إي شانون من خلال المساهمة البارزة في النظرية الرياضية للاتصالات. حيث طور شانون الحدود الأساسية لضغط البيانات والنقل الموثوق به عبر القنوات الضجيجية. منذ نشأتها، اجتذبت نظرية المعلومات قدرًا هائلًا من الجهود البحثية وقدمت الكثير من الأفكار الملهمة في العديد من مجالات البحث، ليس فقط الاتصالات ومعالجة الإشارات في الهندسة الكهربائية، بل وأيضاً الإحصاء والفيزياء وعلوم الكمبيوتر والاقتصاد والبيولوجيا [7].

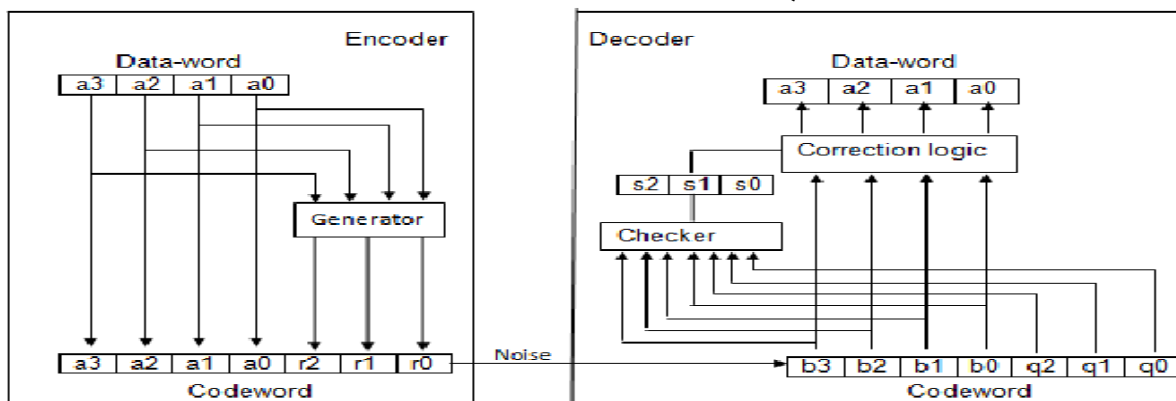
### 2-5 ترميزات كشف وتصحيح الأخطاء:

تتعرض المعلومات أثناء عملية الإرسال إلى عوامل تؤدي إلى تلفها، لذلك نحصل على إشارة في جهاز الاستقبال تختلف عن إشارة المعلومات الأصلية. الفكرة العامة لتحقيق اكتشاف الأخطاء وتصحيحها هي إضافة بعض البيانات الإضافية مع الرسالة، والتي يمكن لأجهزة الاستقبال استخدامها للتحقق من صحة الرسالة التي تم تسليمها، واستعادة البيانات التالفة [8].

في نظام الاتصالات، يعتبر النقل الآمن للبيانات من المرسل إلى المستقبل قضية رئيسة للغاية، وهناك العديد من ترميزات كشف وتصحيح الأخطاء التي تعتمد على إضافة بتات إلى الكلمة المرسلة ومن ثم إزالتها في مفكك الترميز للحصول على كلمة صحيحة دون وجود أخطاء فيها [9].

### 3-5 ترميز هامينغ:

ترميز هامينغ هو ترميز خطي لكشف وتصحيح الأخطاء أوجده ريتشارد هامينغ. يمكن أن يكتشف ما يصل إلى خطأين متزامنين في البتات، وتصحيح أخطاء أحادية البت، وبالتالي يكون الاتصال موثوقاً عندما تكون مسافة هامينغ بين البتات المرسلة والمستقبلة أقل أو تساوي واحداً [10].



الشكل (5-1): بنية رمز ومفكك ترميز هامينغ

في ترميز هامينغ يقوم المصدر بترميز الرسالة عن طريق إدخال وحدات بت زائدة في الرسالة. هذه البتات الزائدة هي بتات إضافية يتم إنشاؤها وإدراجها في مواضع محددة في الرسالة نفسها لتمكين اكتشاف الأخطاء وتصحيحها. عندما تتلقى الوجهة هذه الرسالة، فإنها تجري عمليات إعادة الحساب لاكتشاف الأخطاء والعثور على موضع البت الذي يحتوي على خطأ. إذا كان عدد البتات المرسلة  $X$  فإن عدد بتات التكاوؤ  $P$  تحدها العلاقة (1): [3]:

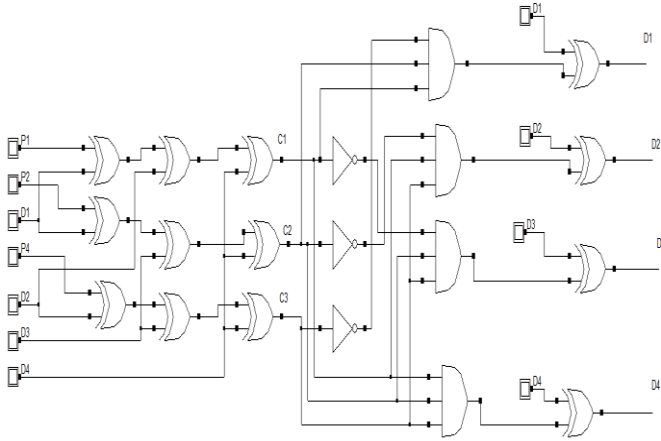
$$2^P \geq X + P + 1 \quad (1)$$

لأربع بتات معلومات  $X=4$ ، يتم الحصول على عدد بتات التكافؤ  $P$  باستخدام المعادلة (1). وبالتالي يلزم وجود 3 بتات تكافؤ لـ 4 بتات معلومات ويتم وضع بتات التكافؤ الأربعة هذه في المواقع من القوة 2. أما في عملية فك ترميز الرسالة يتلقى جهاز الاستقبال الرسائل الواردة التي تتطلب إجراء عمليات إعادة الحساب للعثور على الأخطاء وتصحيحها [11].

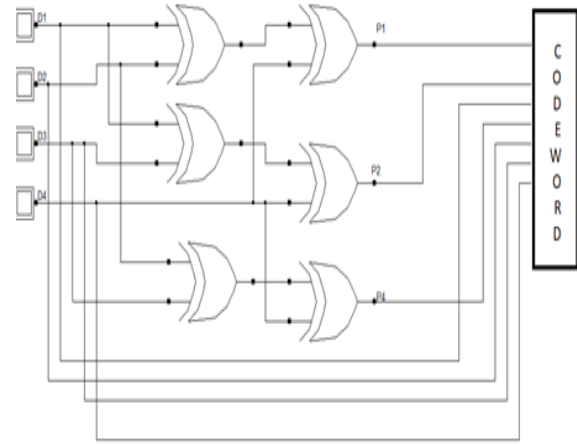
### 1-3-5 دائرة المرز ومفكك الترميز:

يتم تطبيق كلمة البيانات كمدخل لدائرة التشفير التي تقوم بعمليات XOR على كلمة البيانات المعطاة، وبالتالي يتم إنشاء بتات التكافؤ المطلوبة من مولد بت التكافؤ. تشكل بتات التكافؤ وبتات البيانات معاً الكلمة المرزومة. الشكل (5-2) دائرة ترميز هامينغ لكلمة بيانات من 4 بتات [3].

يظهر في الشكل (5-3) دائرة مفكك ترميز هامينغ لكلمة بيانات 4 بت. تتكون الدارة من 3 إلى 8 وحدات فك ترميز وبوابات XOR. في هذه الدارة، يتم تطبيق كلمة الترميز كمدخل ثم يتم إنشاء بتات الفحص بواسطة مولد اعتماداً على خوارزمية التصحيح، حيث سيتم اكتشافها أو تصحيحها [3].



الشكل (5-3): دائرة مفكك ترميز هامينغ لكلمة بيانات 4 بت.



الشكل (5-2): دائرة ترميز هامينغ لكلمة بيانات من 4 بتات

## 6- المنطق العكوس

أجهزة الكمبيوتر الموجودة في السوق الآن أسرع وأصغر حجماً وأكثر تعقيداً من سابقتها [12]. ومع ذلك، فإن ضريبة هذه السرعة والتعقيد هو زيادة استهلاك الطاقة. الأسباب الرئيسية لارتفاع استهلاك الطاقة تكمن في الزيادة في تردد الساعة وزيادة عدد الترانزستورات المتوضعة على الشريحة.

تسمى العمليات المنطقية المعروفة (ضرب منطقي، جمع منطقي...) بعمليات غير عكوسة. بمعنى أنه يتم مسح بعض المعلومات للدخل في كل مرة يتم فيها تنفيذ عملية منطقية (دالة). وبالتالي، لا يمكننا استنتاج الدخل بمجرد معرفة الخرج وحده.

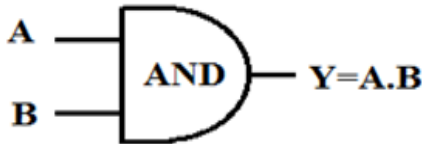
من أهم العوامل التي تساعد في تبديد الطاقة هي تلف المعلومات أو فقدانها كما أوضح لاندور [13]. حيث أن كل خسارة لبت في الدارات المنطقية تشارك في فقدان  $(k_B T \ln 2)$  Joules من الحرارة في البيئة، حيث  $k_B$  هو ثابت Boltzmann و  $T$  هي درجة الحرارة المطلقة التي يتم عندها تنفيذ العملية. حيث يبلغ معدل تبديد الحرارة لكل بت 2.9

Joules ( $10^{-21} \times$ ) [13]. وبالرغم من أنه صغير جداً ولكن لا يمكن تجاهله حيث يكون معدل تردد المعالج مرتفعاً جداً. دفعت هذه المشكلة المهندسين والباحثين إلى تطوير المنطق العادي الذي يتم فيه فقدان المعلومات من خلال إدراج بوابات قابلة للانعكاس في عملية التصميم المنطقي.

### 1-6 المنطق العادي والمنطق العكوس

جميع دارات المنطق الرقمي ليست عكوسة لأنها تتكون من بوابات غير عكوسة. يتم تحويل الطاقة التي يوفرها المصدر في النهاية إلى حرارة مع كل خسارة إضافة إلى أن المنطق العادي لا يستطيع العودة من الخرج للدخل لتحقيق الحالة الأولية بعد إكمال الوظائف المنطقية [14]. مثلاً في بوابة AND الشكل (1-6) لدينا أربعة احتمالات للدخل وتعطي احتمالين للخروج كما هو موضح في الجدول (1-6) بالتالي عند وجود خطأ فمن الصعب تحديد أي من المداخل قد سببت الخطأ.

الجدول (1-6): جدول الحقيقة لبوابة AND

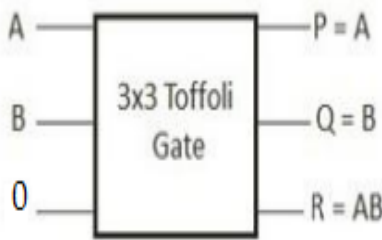


Inputs		Output
A	B	Y=A.B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

الشكل (1-6): بوابة AND

أما في البوابة العكوسة TOFFOLI التي تعطي وظيفة البوابة AND عند تثبيت المدخل الثالث على القيمة 0 يكون لدينا أربع حالات دخل مع أربع حالات خرج مختلفة وهذا يساعد على تحديد الخطأ كما هو موضح في الشكل (2-6) والجدول (2-6).

الجدول (2-6): جدول الحقيقة لبوابة TOFFOLI



Input			Output		
A	B	C	P	Q	R
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0
1	1	0	1	1	1

الشكل (2-6): بوابة TOFFOLI

### 2-6 البوابات العكوسة متسامحة العطل

يقال إن البوابة هي بوابة منطقية قابلة للانعكاس تتسامح مع الأخطاء فقط عندما تحقق الخصائص الثلاث

التالية:

- الانعكاس: يتم اشتقاق وظائف الدخل والخرج بشكل مستقل عن بعضها والعكس صحيح [15].
- عدد المداخل للبوابة يساوي عدد المخارج.
- الشمولية: البوابة العكوسة قادرة على تحقيق وظائف NAND / AND & NOR / OR/ NOT في الخرج

[15].

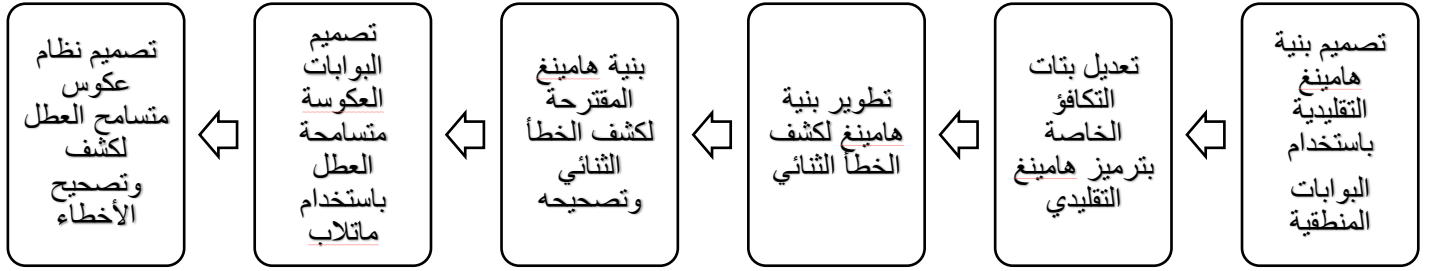
- التسامح مع الخطأ: أي البوابة تحافظ على نفس التكافؤ بين المدخلات والمخرجات، ويمكن التعبير عن التسامح مع خطأ البوابة القابلة للانعكاس  $k * k$  تحليلياً  $k = I1 \oplus I2 \oplus I3 \dots \oplus In = O1 \oplus O2 \dots \oplus On$ .

الخاصية المهمة للبوابة المتسامحة مع الخطأ هي أنه يمكن اكتشاف إشارة الخطأ بسهولة. من أهم البوابات المتسامحة العطل العكوسة هي KMD1، KMD2، KMD3، KMD4 Fredkin gate، KMDG ، NFT gate، MRG GATE، gate ، وهي تحقق خاصية الانعكاس والشمولية والتسامح مع الخطأ لأن تكافؤ الدخل يساوي تكافؤ الخرج.

## 7- التصميم المقترح:

### 7-1 منهجية التصميم:

تم اتباع منهجية التصميم في الشكل (7-1) لبناء النظام بدء من التصميم التقليدية لهامينغ وصولاً إلى



النظام النهائي كما يلي:

الشكل (7-1): منهجية التصميم

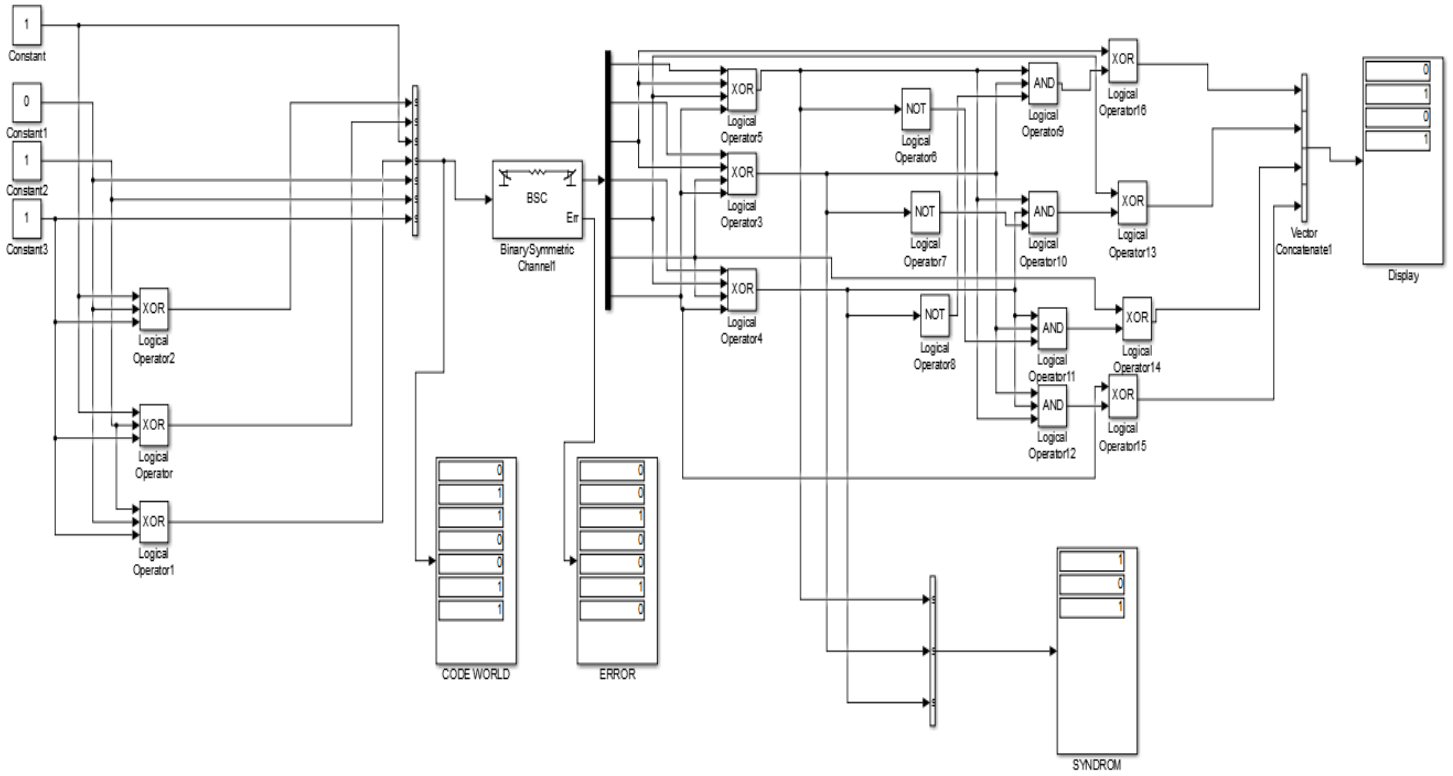
### 7-2 تصميم بنية هامينغ التقليدية باستخدام البوابات المنطقية

تم تطبيق دائرة مرمز ومفكك ترميز هامينغ التقليدي حيث تم في المرمز ترميز 1011 وإضافة بتات التكافؤ لتصبح الكلمة المرزمة 0110011 وإرسالها عبر قناة BSC كما في الشكل (7-2). حيث تمت المحاكاة في ثلاث حالات (عدم وجود خطأ، وجود خطأ وحيد ووجود خطأ ثنائي) كما هو موضح في الجدول (7-1).

الجدول (7-1): نتائج ترميز هامينغ التقليدي باستخدام الدارة المنطقية

Sending Data	Code word	Decoded data	syndrome	Number of error	Number of Detected error	Number of corrected error
1011	0110011	1011	000	0	0	0
1011	0110011	1011	011	1	1	1
1011	0110011	1011	101	2	0	0





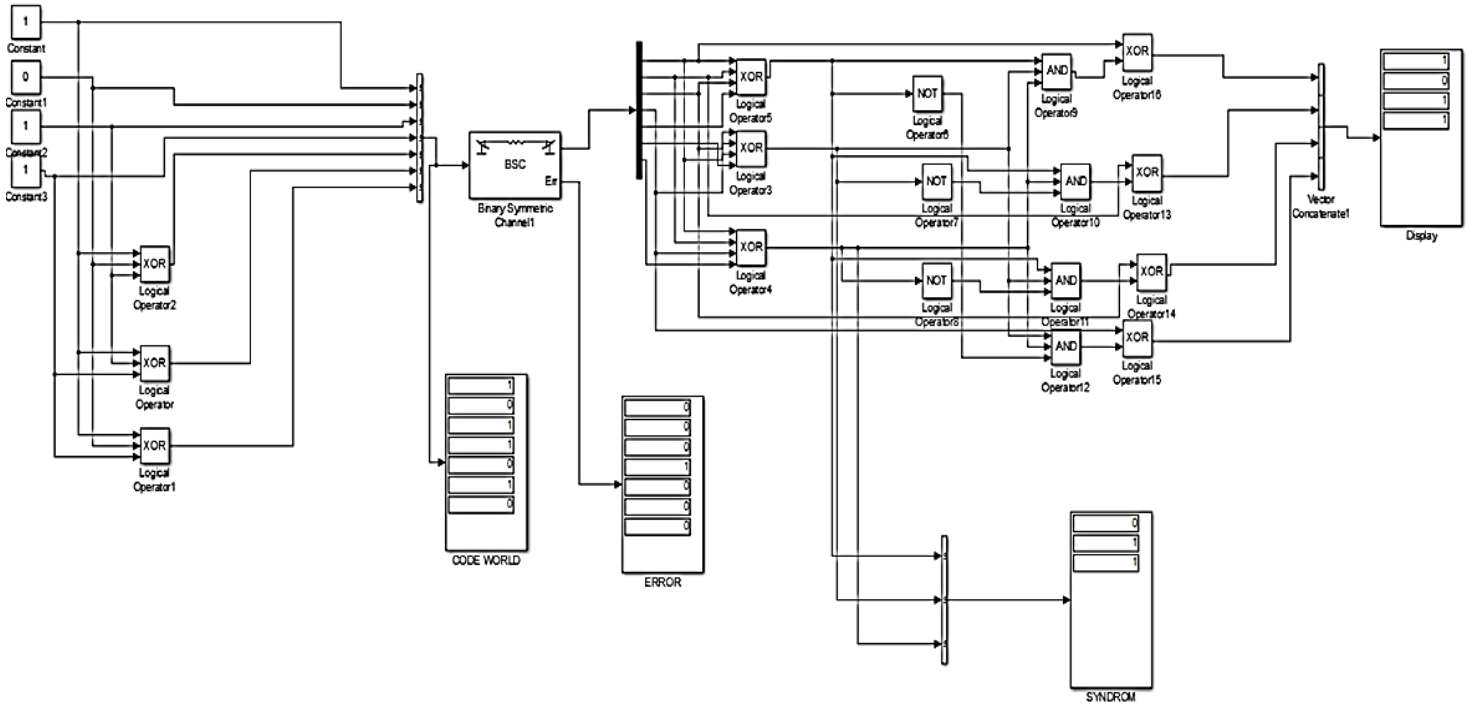
الشكل (7-2): ترميز هامينغ التقليدي باستخدام الدارة المنطقية عند وجود خطأ ثنائي

### 3-7 تغيير مواقع بتات التكافؤ:

تم إجراء تعديل على ترميز هامينغ في كثير من الدراسات الحديثة، حيث تبين أن وضع بتات التكافؤ بعد بتات المعلومات بدلاً من وضعها بينها تسهل عملية كشف وتصحيح الأخطاء كما في الشكل (7-3)، حيث حصلنا على نفس الكلمة المرزمة في ترميز هامينغ التقليدي مع اختلاف في مواقع البتات فقط، وبقيت القدرة على تصحيح الخطأ الوحيد نفسها كما هو مبين في الجدول (7-2).

الجدول (7-2): نتائج ترميز هامينغ بعد تغيير مواقع بتات التكافؤ عند وجود خطأ وحيد

Sending Data	Code word	Decoded data	syndrome	Number of error	Number of Detected error	Number of corrected error
1011	1011010	1011	011	1	1	1



الشكل (3-7): ترميز هامينغ بعد تغيير مواقع بتات التكافؤ عند وجود خطأ وحيد

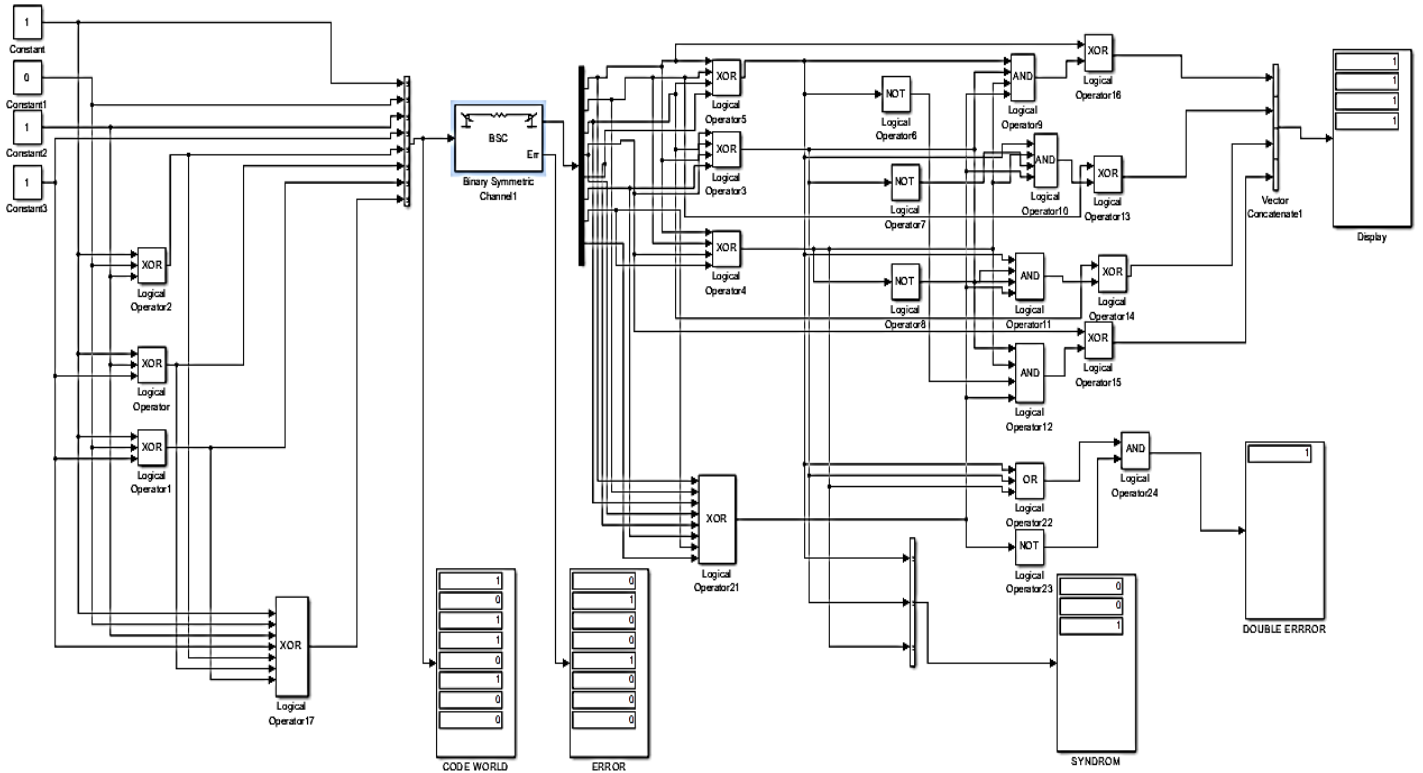
## 4-7- بنية هامينغ المقترحة لكشف الخطأ الثنائي:

من أهم مشاكل ترميز هامينغ هو أن الدارة قادرة على كشف الخطأ الأحادي وتصحيحه وتحديد موقعه بواسطة Syndrome ولكن عند حدوث خطأ ثنائي فليس هناك طريقة لتمييز الخطأ الثنائي. لذا تم التعديل على المفكك لكي يظهر لدينا وجود الخطأ الثنائي عن طريق إضافة بت تكافؤ للكلمة المرزمة. فعند وجود خطأ ثنائي سوف يكون error double=1 كما في الشكل (4-7) ويظهر الجدول (3-7) نتائج المحاكاة في هذه الحالة.

الجدول (3-7): نتائج ترميز هامينغ المقترح وقدرته على كشف خطأ ثنائي

Sending Data	Code word	Decoded data	syndrome	Number of error	Number of Detected error	Number of corrected error
1011	10110100	1111	100	2	2	1

الشكل (7-4): ترميز هامينغ المقترح وقدرته على كشف خطأ ثنائي



### 5-7 بنية هامينغ المقترحة لكشف وتصحيح الأخطاء الثنائية والأحادية:

تبقى المشكلة الأهم في ترميز هامينغ هو عدم قدرته على تصحيح الخطأ الثنائي، وهذه مشكلة أساسية تؤثر على وثوقية النظام، وقد تم حلها بالبنية المقترحة في الشكل (7-5). هنا تم تطوير البنية السابقة لتستطيع تصحيح الخطأ الثنائي أيضاً عن طريق إضافة بت تكافؤ إضافي في المرمز مع بت التكافؤ الكلي، بالتالي تصبح الكلمة المرمزة عبارة عن 9 بتات مع التعديل على مواقع هذه البتات لنتمكن من تصحيح الخطأ الثنائي.

أما في دارة مفكك الترميز فإنه يتم فك ترميز الكلمة المستقبلية مع تصحيح الخطأ الثنائي عن طريق بت التكافؤ الإضافي، وعن طريق إضافة دارة للتصحيح وكشف الخطأ الثنائي عن طريق دارة مكونة من البوابات التالية (OR، AND، NOT) ويكون دخلها بتات التكافؤ الأربعة  $S_0, S_1, S_2, S_3$  مع بت التكافؤ الكلي ST. حيث تمثل المعادلة (2) خرج هذه الدارة حيث تعطي 1 عند وجود خطأ ثنائي وتمثل المعادلة (3) موقع حدوث الخطأ الأحادي.

$$DOUBLE\ ERROR = v(S_0 + S_1 + S_2 + S_3). \overline{ST} \quad (2)$$

(3)

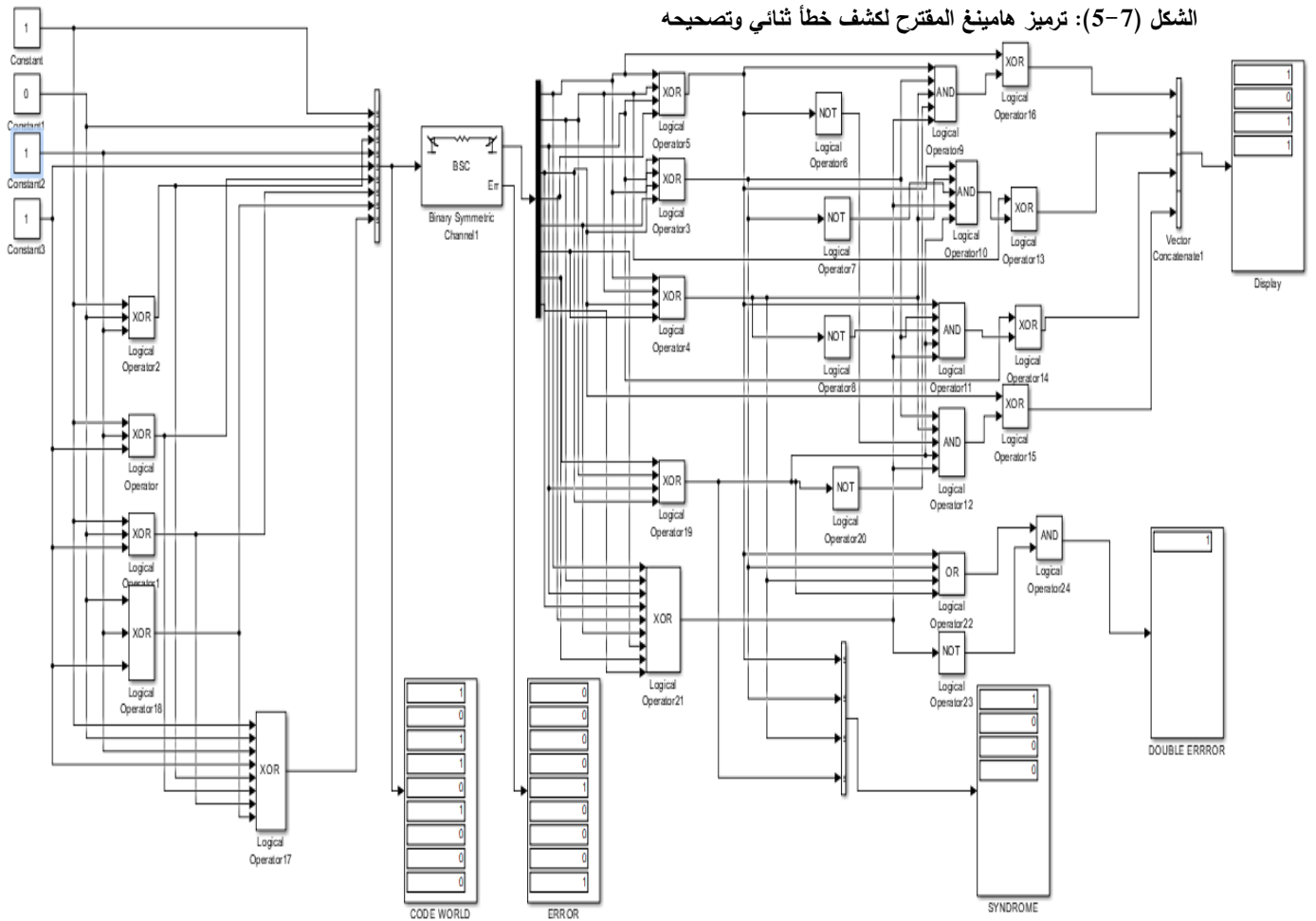
وهنا لدينا ثلاث حالات:

1.  $S = 0000$  و  $double\ error = 0$  بالتالي لا يوجد خطأ.
2.  $S \neq 0000$  و  $double\ error = 0$  بالتالي يوجد خطأ أحادي وسيتم تصحيحه.
3.  $S \neq 0000$  و  $double\ error = 1$  بالتالي يوجد خطأ ثنائي وسيتم تصحيحه.

يظهر الجدول (4-7) حالات متعددة من كلمات البيانات المرسله وحالات متعددة من عدد الأخطاء، وأماكن تواجدها. مبينا قدرة هذا التصميم المقترح على التسامح مع خطأين، وبالتالي زيادة وثوقية ترميز هامينغ على الرغم من زيادة كلمة الترميز بتين إضافيين، إلا أن ذلك لم يؤثر تأثيرا كبيرا على حجم المعطيات المرسله والمستقبله، وبقي أداء النظام مستقرا مع تحسن في وثوقيته وتصحيحه للأخطاء، فاحتمالية حدوث الأخطاء زادت مع ذلك أصبح النظام قادراً على تصحيح خطأين معاً.

الجدول(4-7): نتائج ترميز هامينغ المقترح وقدرته على كشف خطأ ثنائي وتصحيحه

Sending Data	Code word	Received code word	Decoded data	syndrome	Double error	Number of error	Number of Detected error	Number of corrected error
1011	101101000	101101000	1011	0000	0	0	0	0
1011	101101000	101111000	1011	1000	0	1	1	1
1011	101101000	101111001	1011	1000	1	2	2	2
1001	100110010	100110111	1001	0010	1	2	2	2
0001	000101110	000110110	0001	1100	1	2	2	2



### 6-7 تصميم البوابات العكوسة باستخدام ماتلاب:

نظرا لعدم وجود محاكي خاص بالمنطق العكسي تم استخدام الماتلاب لتصميم البوابات التي سنقوم باستخدامها في هذا البحث وقد تم اختيار بوابات KMD أولا لأنها تحقق التسامح مع الخطأ وثانيا لأنها تحتل مساحة منخفضة على الشريحة بالمقارنة مع غيرها من البوابات.

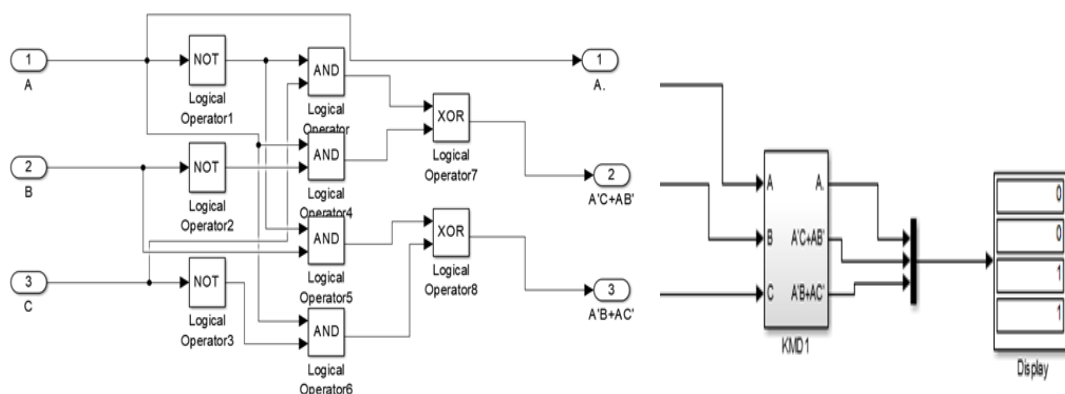
• بوابة KMD 1:

تم تصميم بوابة KMD1 كما في الشكل(6-7) حيث تقوم بالعمليات المبينة في الجدول (5-7) وهي

. NAND,OR,NOT

الجدول(5-7):جدول العمليات المنطقية لبوابة KMD1

Constant input	Logic function	expression
A=1;C=0/1	NOT (B)	B'
C=1	NAND(A,B)	A'+AB'
C=0	OR(A,B)	A+A'B



الشكل (6-7): التصميم الخاص لبوابة KMD1

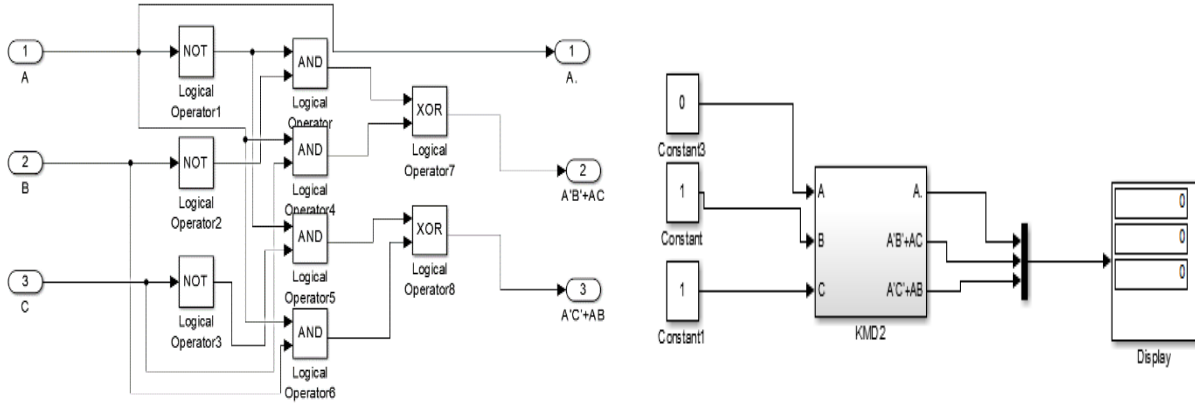
• بوابة KMD2:

تم تصميم بوابة KMD2 كما في الشكل (7-7) حيث تقوم بالعمليات المبينة في الجدول (6-7) وهي NOT،

. NOR,AND

الجدول(6-7): جدول العمليات المنطقية لبوابة KMD2

Constant input	Logic function	expression
B=C=0	NOT (A)	A'
C=0	NOR(A,B)	A'B'=(A+B)'
C=1	AND(A,B)	AB



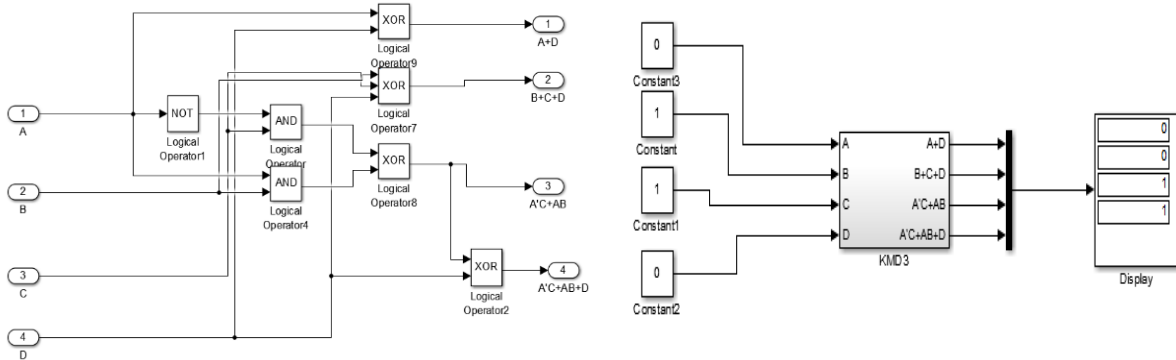
الشكل (7-7): التصميم الخاص لبوابة KMD2

• بوابة KMD3:

تم تصميم بوابة KMD3 كما في الشكل (7-8) حيث تقوم بالعمليات المبينة في الجدول (7-7) وهي .OR، AND، NOT

الجدول (7-7): جدول العمليات المنطقية لبوابة KMD3

Constant input	Logic function	expression
B=D=0 ; C=1	NOT (A)	$A'$
C=0	AND(A,B)	$AB$
B=1	OR(A,C)	$A+A'C$



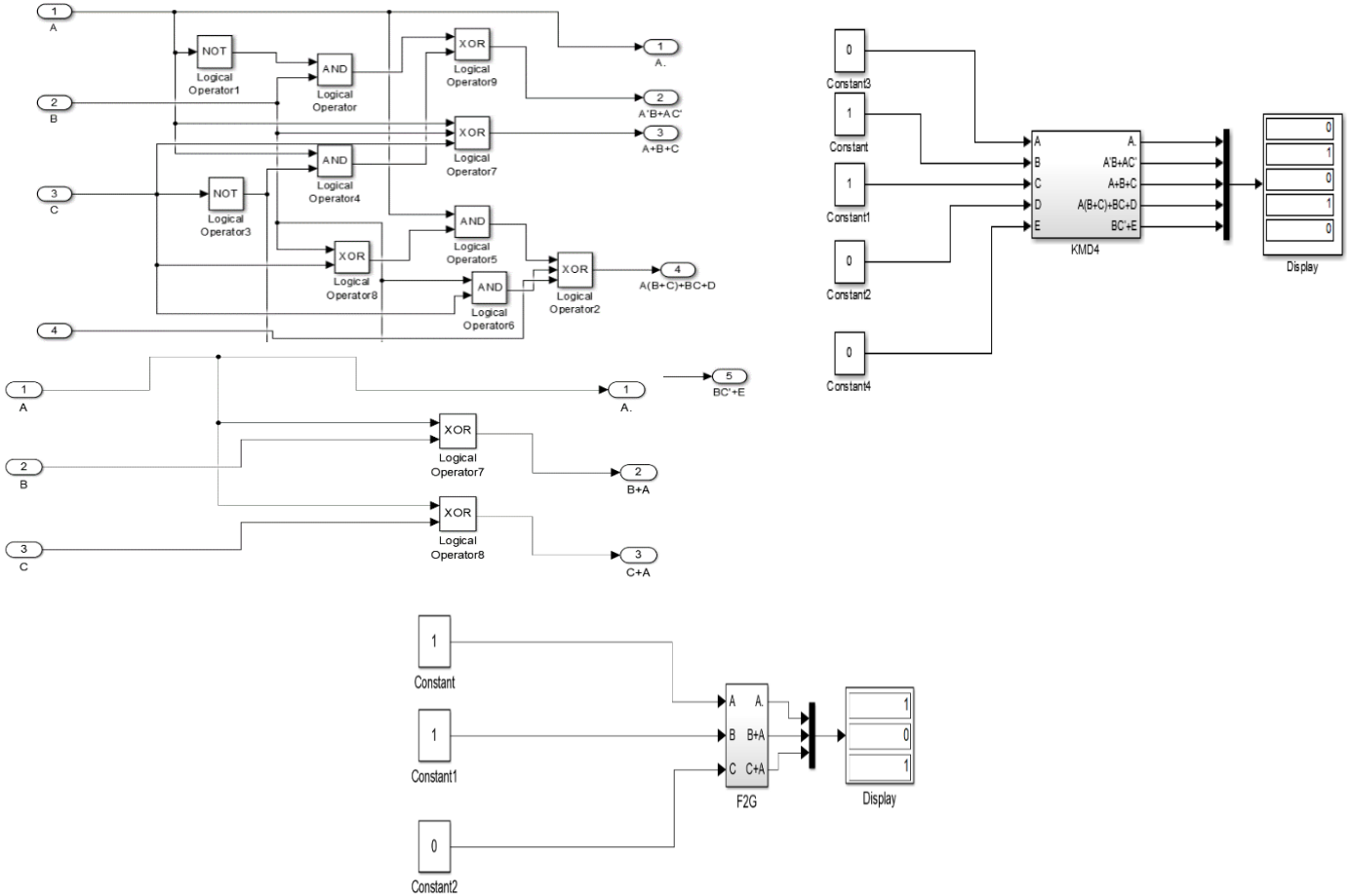
الشكل (7-8): التصميم الخاص لبوابة KMD3

• بوابة KMD 4:

تم تصميم بوابة KMD4 كما في الشكل (7-9) حيث تقوم بالعمليات المبينة في الجدول (7-8) وهي OR، NAND، NOT

الجدول (7-8): جدول العمليات المنطقية لبوابة KMD4

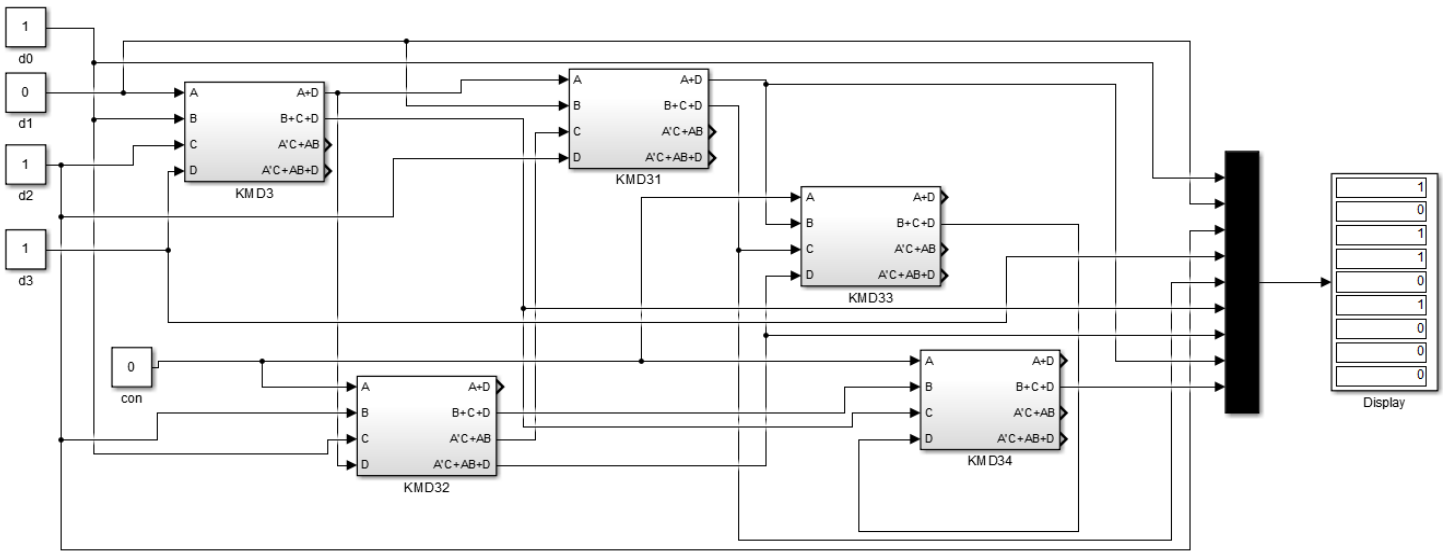
Constant input	Logic function	expression
B=C=1 ; C=0	NOT (A)	A'
B=1;D=0	OR(A,C)	AC'+C
B=1	NAND(A,C)	A'+AC'



الشكل (7-10): التصميم الخاص لبوابة F2G

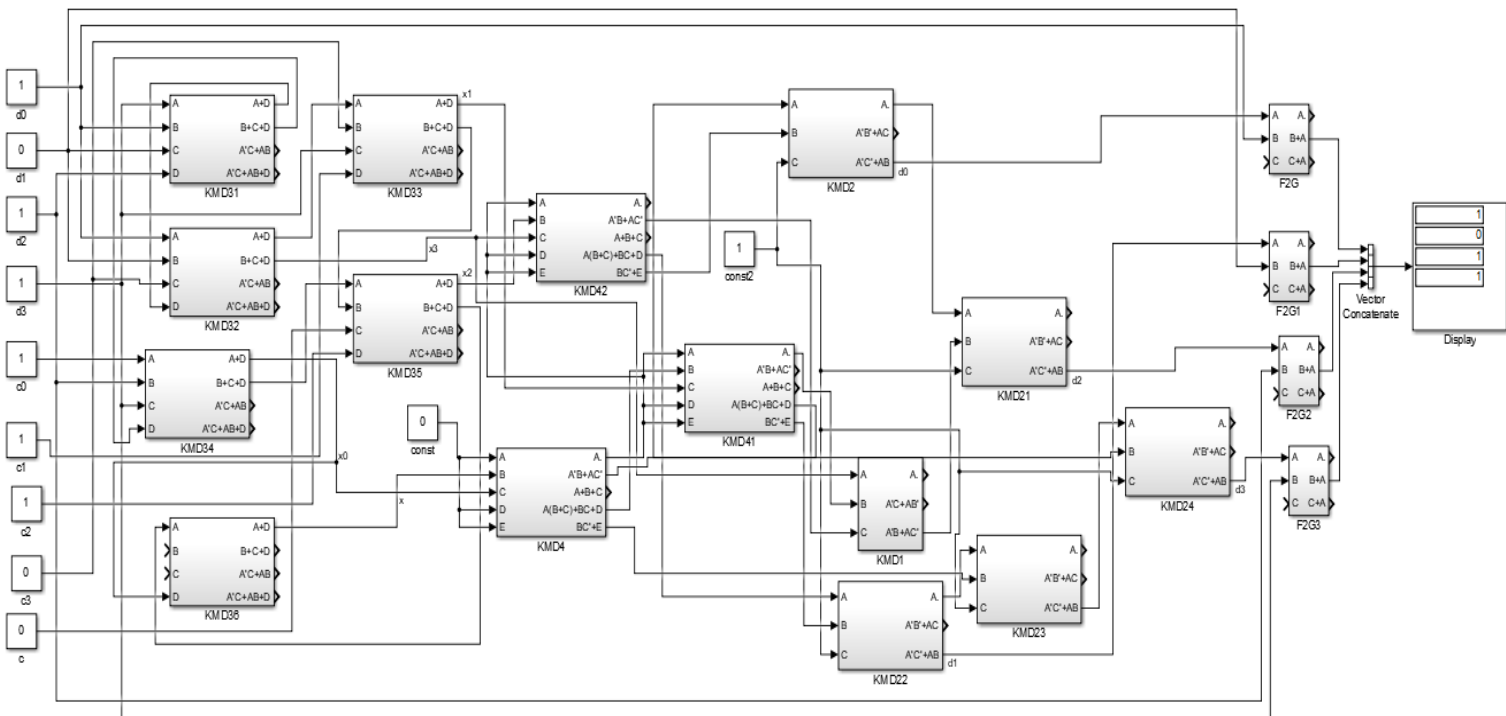
7-7 تصميم رمز هامينغ الجديد المقترح العكوس متسامح العطل:

تم استخدام البوابات العكوسة لتصميم رمز هامينغ الجديد المقترح العكوس متسامح العطل باستخدام بوابات KMD حيث تم ترميز كلمة المعطيات 1011 إلى الكلمة 101101000 كما هو مبين في الشكل (7-11) حيث تم تحقيق مفهوم التسامح مع العطل من خلال هذه البوابات مع الحفاظ على وظيفة الرمز الأساسية.



الشكل (7-11): رمز هامينغ الجديد المقترح العكوس متسامح العطل  
 7-8 تصميم مفكك ترميز هامينغ الجديد المقترح العكوس متسامح العطل:

تم استخدام البوابات العكوسة لتصميم مفكك ترميز هامينغ الجديد المقترح العكوس متسامح العطل باستخدام بوابات KMD و F2G حيث تم فك ترميز الكلمة 101101000 إلى الكلمة 1011 وهي نفسها كلمة المعطيات الأصلية كما هو مبين في الشكل (7-12).

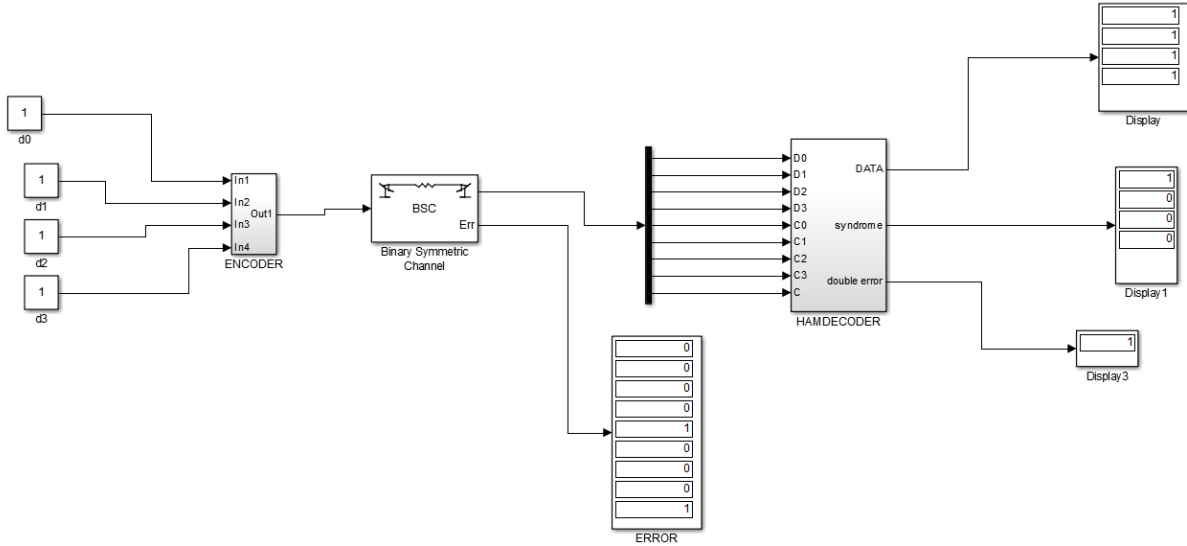


الشكل (7-12): مفكك ترميز هامينغ الجديد المقترح العكوس متسامح العطل



### 9-7 النظام النهائي المقترح:

تبين البنية في الشكل (7-13) النظام النهائي المقترح حيث يمثل نظام عتادي مكون من مرمرز ومفكك ترميز وقناة قادر على كشف وتصحيح الأخطاء الأحادية والثنائية وهو نظام عكوس يقلل تبديد الطاقة حسب مبدأ لاوندر ويحقق التسامح مع العطل لاستخدامه البوابات العكوسة متسامحة العطل



الشكل(7-13): نظام عتادي عكوس متسامح العطل لكشف وتصحيح الأخطاء

### 8- مناقشة النتائج

يتألف هذا البحث من تصميم نظام عتادي عكوس متسامح العطل لكشف وتصحيح الأخطاء بالاعتماد على مفهومين رئيسيين هما فائضية المعلومات والمنطق العكسي. حيث تم اقتراح تصميم جديد لترميز هامينغ قادر على اكتشاف الخطأ الثنائي وتصحيحه حيث تم تصميمه باستخدام البوابات المنطقية باستخدام برنامج الماتلاب لاختباره ثم إعادة التصميم باستخدام المنطق العكوس متسامح العطل وهذا بحد ذاته حل مثالي لمشكلة تبديد الطاقة التي تعاني منها الأجهزة الإلكترونية صغيرة الحجم. ولكن لعدم توفر محاكي للمنطق العكسي قمنا بتصميم البوابات العكوسة باستخدام الماتلاب لاختبارها وتصميم النظام بأكمله واختباره والجدول (8-1) يبين نتائج الاختبار التي حصلنا عليها حيث نلاحظ قدرة النظام على اكتشاف الخطأ الثنائي وتصحيحه. تتميز هذه الطريقة بانخفاض تبديد الطاقة حسب مبدأ لاوندر وبوثوقيتها العالية التي تعد عاملا مهما في أنظمة الإرسال والاستقبال.

الجدول (8-1): نتائج المحاكاة

Number of corrected error	Sending Data	Code word	Received code word	Decoded data	syndrome	Double error	Number of error	Number of Detected error	Number of corrected error
0	1011	101101000	101101000	1011	0000	0	0	0	0
1	1011	101101000	101111000	1011	1000	0	1	1	1
2	1011	101101000	101111001	1011	1000	1	2	2	2
2	1001	100110010	100110111	1001	0010	1	2	2	2
2	0001	000101110	000110110	0001	1100	1	2	2	2
2	1111	111111110	111101111	1111	1000	1	2	2	2
2	0111	011100010	011110011	0111	1000	1	2	2	2
2	0100	010010110	010011010	0100	1001	1	2	2	2

## 9- التوصيات

إنَّ للمنطق القابل للعكس مستقبل واعد جداً في مجال بناء الدارات الكمومية. سيكون من الرائع وجود لوحة تحوي صفوف من بوابات منطقية عكوسة وتتم عملية ايجاد الوصلات الداخلية بينها لتحقيق وظيفة معينة على مبدأ لوحة الـ FPGA.

يعتبر هذا البحث خطوة أولية متواضعة ولكنه يشكل نقطة بداية لنظام كمومي قادر على تصحيح عدد لانهائي من الأخطاء الأكثر تعقيداً.

**-10 المراجع العلمية:**

- [1] Ibrahim, M., Baloch, N. K., Anjum, S., Zikria, Y. B., & Kim, S. W. (2021). An energy efficient and low overhead fault mitigation technique for internet of thing edge devices reliable on- chip communication. *Software: Practice and Experience*, 51(12), 2393-2410.
- [2] Distler, T. (2021). Byzantine fault-tolerant state-machine replication from a systems perspective. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(1), 1-38.
- [3] Vo, T. T., Nguyen, T. K., Nguyen, Q. T., Huynh, H. H., Nguyen, N. L., & Do, D. T. (2022). Ứng Dụng Mã Hamming Trong Kiểm Soát Lỗi Bộ Nhớ. *Journal of Technical Education Science*, (71B), 19-28.
- [4] Sarath, M. S., Subbarao, T., & Musala, S. (2020, July). Low Power SEC-DED Hamming Code Using Reversible Logic. In *2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)* (pp. 1072-1075). IEEE.
- [5] Umapathy, K., Yuvaraj, S. A., Gunasekaran, K., & Muthukumar, D. (2021). FPGA Based Implementation of Hamming Encoder and Decoder. In *Micro-Electronics and Telecommunication Engineering* (pp. 245-251). Springer, Singapore.
- [6] Thakral, S., & Bansal, D. (2020). High functionality reversible arithmetic logic unit. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(3), 2329.
- [7] Atanasiu, V. (2021). The Structural Information Potential and its Application to Document Triage. *IEEE Access*, 10, 13103-13138.
- [8] Ahmed, R., Sreeram, V., Mishra, Y., & Arif, M. D. (2020). A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: Techniques and optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109792.
- [9] Ravi, P., Roy, S. S., Chattopadhyay, A., & Bhasin, S. (2020). Generic Side-channel attacks on CCA-secure lattice-based PKE and KEMs. *IACR Trans. Cryptogr. Hardw. Embed. Syst.*, 2020(3), 307-335.
- [10] Khan, I. A., Mahmood, M. R., Keshari, J. P., & Tariq Beg, M. (2022). Design of Low-Power CNTFET Parity Generators for High-Speed Data Transmission. In *Innovations in Electronics and Communication Engineering* (pp. 605-611). Springer, Singapore.
- [11] Kang, M., & Park, D. (2021). Lightweight Microcontroller with Parallelized ECC-Based Code Memory Protection Unit for Robust Instruction Execution in Smart Sensors. *Sensors*, 21(16), 5508.
- [12] Drakopoulos, G. On Feynman's Simulating Physics With Computers.
- [13] Pechnikov, A. A., & Nwohiri, A. M. (2020, October). Kolmogorov Complexity-Based Similarity Measures to Website Classification Problems: Leveraging Normalized Compression Distance. In *International Conference Dedicated to the Memory of Professor Vladimir Zubov* (pp. 351-358). Springer, Cham.
- [14] Shamsoshoara, A., Korenda, A., Afghah, F., & Zeadally, S. (2020). A survey on physical unclonable function (PUF)-based security solutions for Internet of Things. *Computer Networks*, 183, 107593.
- [15] Gayathri, S. S., Kumar, R., Dhanalakshmi, S., & Kaushik, B. K. (2021). T-count optimized quantum circuit for floating point addition and multiplication. *Quantum Information Processing*, 20(11), 1-18.