الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الحواسيب والأتمتة

تطوير آلية تحكم بالإقفال الميت في أنظمة التصنيع المؤتمتة باستخدام شبكات بتري والذكاء الصنعي

رسالة أعِدَّت لنيل درجة الماجستير في هندسة التحكم والأتمتة

إعداد:

م. مهدي حمد عليوي

إشراف:

د. م. هيام صالح خدام

2023-2022

شكر وتقدير

الحمد لله حمداً يليق بجلاله وعظيم سلطانه، الحمد لله خيراً مما نقول وفوق ما نقول ومثل ما نقول، أحمده وأشكره جل شأنه على توفيقه واحسانه وعلى ما منَّ به علي بكرمه وفضله من وصول هذه الرسالة إلى المستوى الذي وصلت إليه.

أشكر الصرح العظيم التي كان لي الشرف أن انتمي إليه وأحمل شعاره، جامعتي ومنارةُ دربي **جامعة دمشق**

وأخص بالامتنان ذوي الفضل **أعضاء الهيئة التدريسية في قسم هندسة الحواسيب والأتمتة** – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية الذين كانوا منارات النجاح.

إلى من تعجز السطور عن شكرها، إلى صاحبة الفضل الأكبر، إلى من قدم لي من خبرته وعلمه الكثير إلى من غرس في داخلي كثيراً من الخصال الجميلة **الأستاذة الدكتورة المهندسة هيام خدام** أقدم أسمى آيات الشكر بكل ما أملك من طاقات التقدير على ما قدّمتهِ لي من دعم وتوجيه، أعدكِ بأن يزهر عطاؤك ثمار يانعة.

الشكر الكبير **للأستاذ الدكتور المهندس رؤوف حمدان** رئيس قسم هندسة الحواسيب والأتمتة الذي كان داعماً لي بكل ما احتاجه، لك منّي كل المحبة والاحترام.

وأقدم عظيم الشكر لكم أساتذتي الأفاضل لجنة التحكيم

معلمي، ملهمي، قدوتي وداعمي الدائم ومثلي الأعلى **الأستاذ الدكتور المهندس يزن أصلان**

رمز التفاني والعطاء، من علمني أن لا أستسلم لعثرات الفشل **الأستاذة الدكتورة المهندسة رأفة خازم**

إلى من علمني معنى الطموح، إلى من كان لي خير الداعم ونعم الناصح **الأستاذ المهندس حسن نوفل**

لكم خالص محبتي وامتناني لتفانيكم في تقديم يد العون، جزاكم الله عني كل خير.

آمل أن يوظف هذا العمل لخدمة الوطن وأبناءه وأن يكون الحجر الأساس للزملاء القادمين لتطويره بشكل أكبر

(وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْماً) صدق الله العظيم

الإهداء

إلى من تقف الأبجدية شامخة أمامه وتعجز أحرفها عن وصف عطائه، إلى من حصد الأشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم، إلى رمز المحبة، إلى من استمد منه القوة والاستمرار، إلى من علمني العطاء دون انتظار، القلب الحنون والسند الدائم، لك.. يا صاحب الصبر والطيبة

والدي حفظه الله

إلى من كان دعائها يرافقني ويرفع عني البلاء، إلى ملهمتي وقدوتي والنور في عيني، إلى من أكرمها الله ووضع الجنة تحت أقدامها، من سهرتِ الليالي من أجلي دعماً وخوفاً، إلى من أمدتني بحب يتسع أرجاء عالمي.. إلى من نمَت شخصيتي ووثقت بي، إليكِ .. يا جنتي في الأرض

والدتي حفظها الله

من بعضي إلى كلي، إلى عزوتي وسندي وبسمتي وأُنسي وثقتي، إلى الكتف المتين الذي اعتمد عليه، إلى من بهم يشتد أزري وبهم تنجلي وحدتي، إلى من قدرهم عندي ليس له حدود...

إخوتي

طارق، داليا، نور، عمار

إلى الروح التي لازالت ترافقنا، يامن اشتاقت عيناي لرؤيته، لروحك البقاء بيننا...ولجسدك ألف رحمة من الله...

لروحك السلام أخي سالم

إلى من تحلو بالإخاء، وكانوا بجانبي في السرّاء والضرّاء، إلى من جمعتني الأيام بهم فباتوا جزءاً من عائلتي

فادي، عاصم، إلين، ناره

إلى أجزاء الروح، الملائكة التي تملؤ بيتنا أمل... إلى هديتي الأجمل من القدر، إلى براعم المستقبل

نايا، هادي، زين، سام، حمزة، أسينات، تولين

إلى من كان عوناً في أصعب أوقاتي، إلى الصديق الغالي والقلب الحاضر، إلى صاحب الجلسات والأوقات الجميلة، ممتن لكل شيء جعل منك صديقي، إلى أخي الذي لم تلده أمي....

المهندس حكمت صقر

إلى الملاك الصغير، إلى من تؤمن بي في كل الأوقات، إلى الريحانة التي لا تعرف الذبول

المهندسة ماري ناصيف

إلى صاحب المواقف التي لا تنسى، إلى من كنا سوياً في السعادة والحزن، إلى صاحب القلب الجميل

المهندس سامر خطيب

إلى صاحبة القلب الطيب المفعم بالبراءة، إلى من تحلت بروح الإخاء، إلى الصديقة الغالية

المهندسة رغد برهان

إلى رفاق الخطوة الأولى والخطوة الأخيرة، إلى من تكافلنا يداً بيد لنقطف زهور العلم، إلى من تذوقت معهم أجمل اللحظات، إلى من كانوا معي في رحلتي الجامعية وخارجها

أنس رضوان، آية الخطيب، بهاء بكري، جلال كمال الدين، ضحى عبيد دبوس
غفران أبو حسون، فادي صفايا، ملهم حمدان، منذر صقر، ندى حمد، نور الحسن، هديل صفايا
مجد النجم، ينال أبو الخير

إلى من أغدو مشرقاً عندما ألقاهم، إلى مصدر التفاؤل والأمل

طلابي الأعزاء

إلى كل من وقف بجانبي وكان دعماً لي في تحقيق أهدافي...

إلى أقربائي وزملائي...

إلى كل من وسعتهم ذاكرتي ولم تسعهم مذكرتي...

أهدي ثمرة جهدي المتواضع

فهرس المحتويات

الملخص 1

المقدمة والإطار العام للبحث 2

1- المقدمة العامة 3

2- أهمية البحث 4

3- أهداف البحث 4

4- طرائق البحث 5

الفصل الأول: شبكات بتري 7

1-1 مقدمة عامة عن شبكات بتري 8

1-1-1 مفهوم شبكات بتري 8

1-1-2 أنواع شبكات بتري 10

1-2 أنظمة الأحداث المتقطعة 12

1-3 تعاريف هامة لشبكات بتري 14

1-4 الثوابت الهيكلية 19

1-5 أصناف فرعية لشبكة بتري 20

الفصل الثاني: الإقفال الميت 24

2-1 ما هو الإقفال الميت 25

2-2 طرق معالجة الإقفال الميت 26

2-2-1 منع الإقفال الميت 27

2-2-2 تجنب الإقفال الميت 28

2-2-3 استخدام خوارزمية الكشف 29

2-2-4 التعافي من الإقفال الميت 30

2-2-4-1 إنهاء الإجرائية 30

2-2-4-2 الاستيلاء على الموارد 31

2-3 الإقفال الميت ضمن شبكات بتري 32

الفصل الثالث: الذكاء الصنعي 36

3-1 ما المقصود بالذكاء الصنعي 37
3-2 المكونات الرئيسية لتطبيقات الذكاء الصنعي 40
3-3 تعلم الآلة 41
3-3-1تعلم الآلة الخاضع للإشراف 41
3-3-2 تعلم الآلة غير الخاضع للإشراف 43
3-3-3 تقليل الأبعاد 43
3-3-4 تعزيز البيانات 44
3-3-5الشبكات العصبونية 45
3-3-6 أشجار القرار 48
3-3-7 الآلة متجه الدعم 50
3-4التعلم العميق 51
3-4-1الشبكات العصبونية العميقة 52
3-4-2 الشبكات العصبونية العودية 52
3-4-3 الشبكة العصبونية العودية ذات الذاكرة طويلة وقصيرة المدى (LSTM) 55
3-4-4 الشبكة العصبونية العودية ذات البوابات(GRU) 58
3-5 توابع التفعيل 61
3-6 مقاييس الأداء 62
الفصل الرابع: الدراسات المرجعية 64
الفصل الخامس: الإجراء العملي 72
5-1 مقدمة 73
5-2 بنية النظام المدروسة 73
5-3 نمذجة النظام المدروس باستخدام شبكة بتري 78
5-4 الآلية الأولى المقترحة لمعالجة الإقفال الميت 79
5-4-1 تنجيز الآلية الأولى المقترحة باستخدام الشبكات العصبونية 80
5-4-2 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام الآلة متجهة الدعم 82
5-4-3 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام أشجار القرار 83
5-5 الآلية الثانية المقترحة لمعالجة الإقفال الميت 86

5-5-1 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام الشبكات العصبونية العودية RNN 87
5-5-2 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام الشبكة العصبونية العودية ذات الذاكرة طويلة وقصيرة المدى LSTM 88
5-5-3 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام الشبكة العصبونية العودية ذات البوابات GRU 89
5-5-4 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام أشجار القرار DT 90
الفصل السادس: الاستنتاجات والأفاق المستقبلية 93
6-1 الاستنتاجات العامة 94
6-2 الآفاق المستقبلية 95
المراجع 96

فهرس الأشكال

الشكل(1– 1)العناصر الهيكلية لشبكات بتري 8
الشكل(1– 2)مسألة عشاء الفلاسفة الأربعة باستخدام شبكة بتري 9
الشكل(1– 3)مثال لشبكة بتري العادية 10
الشكل(1– 4) مثال لشبكة بتري الزمنية 11
الشكل(1–5)مثال لشبكة بتري الاحتمالية 11
الشكل(1– 6) مثال لشبكة بتري ملونة..... 12
الشكل(1– 7) انتقال المورد والانتقال النهائي 15
الشكل(1– 8) مثال لرسم مخطط الوصولية لشبكة بتري..... 16
الشكل(1– 9) مثال توضيحي لحساب مصفوفة الحدث..... 17
الشكل(1– 10) آلة الحالة 21
الشكل(1– 11) رسم بياني معلم..... 21
الشكل(1– 12) شبكة حرة الاختيار 22
الشكل(1– 13)شبكة موسعة للشبكات حرة الاختيار 22
الشكل(1– 14) شبكة اختيار غير متماثل 23
الشكل(1– 15) شبكة بتري تسلسلية..... 23
الشكل(2– 1) العلاقة بين الإقفال الميت والحالة الآمنة 25
الشكل(2– 2) مثال يوضح الإقفال الميت في شبكات بتري..... 33
الشكل(2– 3) معالجة الإقفال الميت ضمن شبكة بتري 34
الشكل(2– 4) العقد المتصلة بقوى 35
الشكل(3– 1)) الذكاء الصنعي وتنوع تقنياته..... 37
الشكل(3– 2) أنواع النماذج المختلفة لتعلم الآلة..... 41
الشكل(3– 3) تصنيف البيانات في تعلم الآلة الخاضع للإشراف 42
الشكل(3– 4) تصنيف البيانات في التعلم الآلي غير الخاضع للإشراف..... 43
الشكل(3– 5) تقنية الحد من الأبعاد..... 44
الشكل(3– 6) البنية العامة للشبكات العصبونية..... 45
الشكل(3– 7) آلية العمل داخل الشبكات العصبونية 46
الشكل(3– 8) الشبكة العصبونية متعددة الطبقات 47
الشكل(3– 9) مخطط شجري يوضح عمل شجرة القرار 49
الشكل(3– 10) نموذج آلة متجه الدعم الخطي 50
الشكل(3– 11) اختلاف التعلم العميق عن تعلم الآلة 51
الشكل(3– 12) البنية العامة للشبكة العصبونية العودية 53
الشكل(3– 13) مشكلة تناقص المشتق 55
الشكل(3– 14) بنية خلية LSTM 56

الشكل(3- 15) بنية خلية GRU 59
الشكل(3- 16) الأنواع الشائعة من التوابع اللاخطية 61
الشكل(3- 17) مصفوفة الارتياب ، منحني ROC 63
الشكل(4- 1) تمثيل شبكة بتري S^3PR مع العقد التحكمية الناتجة عن SMSs 67
الشكل(4- 2): اختصار العقد التحكمية بعقدة واحدة بالاعتماد على شبكات بتري الملونة 68
الشكل(4- 3) التعامل مع حالات فشل الموارد 69
الشكل(4- 4) شبكة بتري خالية من الإقفال الميت بعقدة تحكمية واحدة بالاعتماد على شبكات بتري الملونة 70
الشكل(4- 5) : شبكة تعافي فرعية لمعالجة فشل الموارد 70
الشكل(4- 6) شبكة هجينة تجمع بين الشبكات العصبونية وعقدة بتري التحكمية الملونة لمعالجة فشل الموارد 71
الشكل(5- 1) بنية النظام المدروس 73
الشكل(5- 2) السيناريو المعتمد 74
الشكل(5- 3) تمثيل النظام المدروس باستخدام شبكة بتري 75
الشكل(5- 4) مخطط الوصولية للنظام المدروس 76
الشكل(5- 5) نمذجة النظام المدروس باستخدام المحاكيPetri.NET 78
الشكل(5- 6) دخل وخرج المراقب الذكي المقترح 79
الشكل(5- 7) مصفوفة الارتياب للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام الشبكات العصبونية 81
الشكل(5- 8) منحني ROC للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام الشبكات العصبونية 81
الشكل(5-9) مصفوفة الارتياب للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام الآلة متجهة الدعم 82
الشكل(5- 10) منحني ROC للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام الآلة متجهة الدعم 83
الشكل(5- 11)منحني ROC للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام أشجار القرار 83
الشكل(5 -12) مصفوفة الارتياب للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام أشجار القرار 84
الشكل(5- 13) مقارنة النماذج الذكية المقترحة وفق الآلية الأولى 84
الشكل(5- 14) منحني الدقة ومنحني الخسارة للنموذج الذكي المعتمد على الشبكات العصبونية العودية 88
الشكل(5- 15) منحني الدقة ومنحني الخسارة للنموذج الذكي المعتمد على LSTM 88
الشكل(5- 16) منحني الدقة ومنحني الخسارة للنموذج الذكي المعتمد على GRU 89
الشكل(5 -17) مصفوفة الارتياب للنموذج الذكي وفق الآلية الثانية المعتمد على أشجار القرار 91

فهرس الجداول

الجدول(1- 1) الاستخدامات المختلفة لعناصر شبكة بتري 10
الجدول (5- 1) توزيع الرموز المميزة لعلامات شبكة بتري 77
الجدول (5- 2) البيانات المستخدمة لبناء النموذج الذكي وفق الآلية الأولى المقترحة 80
الجدول (5- 3) مقارنة الآلية الأولى المقترحة مع الأدبيات السابقة 85
الجدول (5- 4) البيانات المستخدمة لبناء النموذج الذكي وفق الآلية الثانية المقترحة 87
الجدول (5-5) مقارنة النماذج الذكية وفق الآلية الثانية المقترحة 90
الجدول (5- 6) مقارنة الآلية الثانية مع الأعمال الأدبية السابقة 91

المصطلحات والاختصارات

المصطلح الأجنبي	الاختصار	المصطلح العربي
Automated Manufacturing Systems	**AMS**	**أنظمة التصنيع الآلية**
Petri Net	**PN**	**شبكة بتري**
Colored Petri Net	**CPN**	**شبكة بتري الملونة**
Discrete-event Systems	**DES**	**أنظمة الأحداث المتقطعة**
Supervisory Control Theory	**SCT**	**نظرية التحكم الإشرافي**
Artificial Intelligence	**AI**	**الذكاء الصنعي**
Machine learning	**ML**	**تعلم الآلة**
Support Vector Machine	**SVM**	**آلة متجه الدعم**
Artificial Neural Networks	**ANN**	**الشبكات العصبونية الاصطناعية**
Multilayer Perceptron Neural Networks	**MLP**	**الشبكات العصبونية متعددة الطبقات**
Mean Squared Error	**MSE**	**الخطأ التربيعي المتوسط**
Data Augmentation	**DA**	**تعزيز البيانات**
Decision Trees	**DT**	**أشجار القرار**
Deep Learning	**DL**	**التعلم العميق**
Deep Neural Network	**DNN**	**الشبكة العصبونية العميقة**
Recurrent Neural Networks	**RNN**	**الشبكات العصبونية العودية**
Convolutional Neural Networks	**CNN**	**الشبكات العصبونية الالتفافية**
Back propagation through time	**BPTT**	**الانتشار الخلفي عبر الزمن**
Long Short-term Memory	**LSTM**	**الشبكة العصبونية العودية ذات الذاكرة طويلة وقصيرة المدى**
Gated Recurrent Unit	**GRU**	**الشبكة العصبونية العودية ذات البوابة**

الملخص:

يمكن لأنظمة التصنيع الآلية معالجة منتجات متنوعة وفقاً لتسلسل عمليات محددة مسبقاً، ومع ذلك يتوقف النظام جزئياً أو كلياً بسبب حدوث الإقفال الميت نظراً لوجود عدد محدد من الموارد، ما يؤدي إلى عدم اكتمال بعض العمليات، لذلك فإن معالجة الإقفال الميت في الأنظمة الصناعية أمراً في غاية الأهمية لضمان صحة وكفاءة وموثوقية العمليات الصناعية، وأيضاً من أجل تجنب تدهور الأداء وتدهور المنتجات الذي يمكن أن يلحق الضرر بصحة الإنسان. ظهرت مقاربات عدّة من شأنها أن تعمل على حل مشكلة الإقفال الميت، والعديد منها يستخدم شبكات بتري إذ تحقق شبكات بتري تحكماً مستقراً لأنظمة التصنيع وهي أداة مناسبة للجدولة وتحليل الإقفال الميت. في هذا البحث، اقتُرحت آليتين منفصلتين لمعالجة الإقفال الميت بالاعتماد على شبكات بتري والذكاء الصنعي عن طريق مراقب خارجي ذكي. تعتمد الآلية الأولى على تحديد حالات الإقفال انطلاقاً من الحالة الحالية لشبكة بتري والقدح المطلوب، في حين تعتمد الآلية الثانية على توقع الانتقال المطلوب تفعيله فيما إذ كان يؤدي إلى حالة الإقفال انطلاقاً من الانتقالات الأخيرة المفعلة. وأثبت البحث إمكانية معالجة الإقفال الميت باستخدام تقنيات الذكاء الصنعي ما يقلل من التعقيد الهيكلي لشبكة بتري مقارنة مع الدراسات الأدبية السابقة مع الحفاظ على الحالات المطلوبة للنظام.

المقدمة والإطار العام للبحث

1- المقدمة العامة:

مع التطور الحاصل في تقنية المعلومات واستخدامها بوصفها عاملاً أساسياً وإشراكها في أنماط الحياة جميعها خاصة في مجال التحليل وفي أنظمة الزمن الحقيقي، ظهرت مشكلة السيطرة على الموارد وكيفية توفيرها للأنظمة في اللحظة الزمنية المناسبة تلافياً لفشل النظام وتوقفه عن العمل عندما لا يتوفر مورد ما وهذا ما يسمى بمشكلة الإقفال الميت (Deadlock)، وهي مشكلة شائعة نظراً لوجود عدد محدود من الموارد، فظهرت مقاربات عدّة من شأنها أن تعمل على حل مشكلة الإقفال الميت إمّا عن طريق المنع (Prevent) أو التجنب (Avoidance) أو الكشف والتعافي (Detection and Recovery)، بغرض استمرار النظام في العمل بشكل صحيح وتام.[2][1]

يمكن لأنظمة التصنيع الآلية Automated Manufacturing Systems (AMSs) معالجة منتجات متنوعة وفقاً لتسلسل عمليات محددة مسبقاً، ومع ذلك يتوقف النظام بسبب حدوث الإقفال الميت، وتحقق شبكات بتري تحكماً مستقراً لأنظمة التصنيع وهي عبارة عن واجهة رسومية وأداة نمذجة رياضية موثوقة و أداة مناسبة للجدولة وتحليل الإقفال الميت، فهنالك سياسات عدّة تعالج الإقفال بالاعتماد على شبكات بتري التي تستند إلى الاستراتيجيات السابقة، معظم هذه السياسات تتحكم في الإقفال الميت في شبكات بتري عبر تحليل البنية (Structural Analysis) أو تحليل المخطط البياني لجميع الحالات التي يمكن الوصول إليها (Reachability Graph Analysis) وبناءً على ذلك اقترِحت ثلاثة معايير لتقييم وبناء متحكم مشرف في أنظمة التصنيع الآلية وهي:

- الشفاعية (السماحية) السلوكية (Behavioral Permissiveness): إن زيادة السماحية السلوكية يحقق استخداماً عالياً للموارد في شبكة بتري التحكمية.
- التعقيد الحسابي (Computational Complexity): كلما كان التعقيد الحسابي للمتحكم منخفض كلما أمكن تطبيقه على النظم واسعة النطاق.
- التعقيد البنيوي (Structural Complexity): وتعني أن تنفيذ المتحكم بعدد أقل من المراقبين والأقواس ينعكس ايجاباً على التكاليف العتادية والبرمجية.

وللتعامل مع الإقفال الميت في أنظمة التصنيع الآلية تم اقتراح العديد من الأنواع لشبكات بتري مثل:

- S^3PR (system of simple sequential processes with resources)
- ES^3PR (extended S^3PR)
- LS^3PR (linear system of simple sequential processes with resources)

- S^4PR (system of sequential systems with shared resources)
- S^3PGR^2 (system of simple sequential processes with general resource requirements)

وغيرها من الأنواع حيث أن الاختلاف الرئيسي بينها في عدد الموارد التي تطلبها العمليات وبنية الشبكة.[2]

يعد نظام التصنيع الآلي نموذج من أنظمة الأحداث المتقطعة (Discrete Event) إذ يسمح لأنواع منتجات مختلفة بالدخول إلى نقاط بأزمنة متقطعة عبر عمليات متزامنة أو غير متزامنة من خلال تشارك الموارد مثل الروبوتات، الآلات، المخازن المؤقتة وغيرها، إذ يعالج كل نوع وفقاً لتسلسل عمليات محددة باستخدام مجموعة من الموارد وبهذا التشارك يمكن أن يحدث الإقفال الميت، ما يؤدي إلى عدم اكتمال بعض العمليات، لذلك فإن معالجة الإقفال الميت في الأنظمة الصناعية أمراً في غاية الأهمية، لضمان صحة وكفاءة وموثوقية العمليات الصناعية، وأيضاً من أجل تجنب تدهور الأداء وتدهور المنتجات الذي يمكن أن يلحق الضرر بصحة الإنسان. بالتالي من الضروري تطوير آلية تحكم قوية لمعالجة الإقفال الميت، هنالك العديد من الأدبيات التي تتحكم في الإقفال الميت والتي تعتمد على إضافة مراقب يمنع الشروط المؤدية إلى حالة الإقفال. ويهدف هذا البحث إلى تطوير آلية جديدة للكشف عن حالات الإقفال الميت بالاعتماد على تقنيات الذكاء الصنعي.

2- أهمية البحث:

تبرز أهمية البحث في محاولة تحسين أداء العمليات في المنظومات الصناعية بتطوير مراقب (Monitor) خارجي ذكي يعالج الإقفال الميت، مع محاولة تحسين الكفاءة وتقليل التعقيد الحسابي والهيكلي.

3- أهداف البحث:

يهدف البحث إلى معالجة مشكلة الإقفال الميت في منظومات التصنيع الآلية الممثلة باستخدام شبكات بتري، عبر تصميم متحكم ذكي يقوم بتخمين وجود الإقفال ويعالجه، وذلك بالاعتماد على دراسة عدة نماذج ذكية واختيار النموذج الذكي الأفضل. مع دراسة أداء المراقب ومقارنته مع دراسات أخرى سابقة.

4- طرائق البحث:

يشمل هذا البحث العمل على بناء آلية تحكم لمعالجة الإقفال الميت في أنظمة التصنيع المؤتمتة بالاعتماد على تقنيات الذكاء الصنعي وشبكة بتري. بناءً على ذلك يشمل البحث الآليتين التاليتين:

- تعتمد الآلية الأولى على استخدام تقنيات الذكاء الصنعي انطلاقاً من الحالة الحالية لشبكة بتري والقدح المطلوب. إذ دُرس عدد من النماذج الذكية باستخدام الشبكات العصبونية، والآلة متجهة الدعم، وأشجار القرار والمقارنة بينها لدعم التصنيف النهائي للمراقب.
- في حين تعتمد الآلية الثانية على توقع الانتقال فيما اذ كان يؤدي إلى حالة الإقفال انطلاقاً من الانتقالات الأخيرة المفعلة باستخدام الذكاء الصنعي. إذ دُرس عدد من النماذج الذكية المعتمدة على الشبكات العصبونية العودية RNN، الشبكات العصبونية العودية ذات الذاكرة طويلة وقصيرة المدى LSTM، والشبكات العصبونية العودية ذات البوابة GRU، وأشجار القرار والمقارنة بينها، وتحديد المراقب الأمثل.

ثم دمج كلا من المراقبين مع شبكة بتري ودراسة حيوية النظام ومقارنة النتائج مع الدراسات الأدبية السابقة.

وتم تقسيم الرسالة إلى مجموعة من الفصول هي:

الفصل الأول: شبكات بتري

يقدم شرح عن شبكات بتري وأنواعها واستخداماتها، وأنظمة الأحداث المتقطعة وطرق تحليلها، فضلاً عن بعض التعاريف المهمة عن شبكات بتري والثوابت الهيكلية. كما يسلط الضوء على بعض الأصناف الفرعية لشبكة بتري.

الفصل الثاني: الإقفال الميت

يقدم شرحاً عن الإقفال الميت والحالة الأمنة، وطرق معالجة الإقفال الميت، يوضح الإقفال الميت ضمن شبكة بتري.

الفصل الثالث: الذكاء الصنعي

يوضح هذا الفصل مفهوم الذكاء الصنعي ومكوناته، والشبكات العصبونية وأهميتها والخلية العصبية، والآلة متجهة الدعم، وأشجار القرار، كما يقدم شرحاً عن الشبكات العصبونية العميقة والعودية.

الفصل الرابع: الدراسات المرجعية

يتضمن هذا الفصل الدراسات الأدبية السابقة وكيفية معالجة الإقفال الميت، كما يسلط الضوء على مزايا كلا منها.

الفصل الخامس: الإجراء العملي

يقدم شرحاً عن الآليات المقترحة ضمن البحث وكيفية تطبيق كلا منها، ويوضح البنية العامة للنظام المدروس، ونتائج تنفيذ كلا من الآليات المقترحة باستخدام عدد من النماذج الذكية، ومقارنة النتائج مع الأدبيات السابقة.

الفصل السادس: الاستنتاجات والأفاق المستقبلية.

الفصل الأول

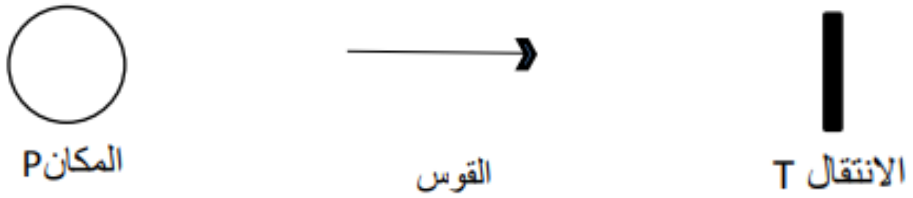
شبكات بتري

1-1 مقدمة عامة عن شبكات بتري:

تعد شبكات بتري نموذج رياضي شائع لتحقيق التحكم الإشرافي في أنظمة الأحداث المتقطعة، وخاصة في تحليل الإقفال الميت والتحكم في أنظمة التصنيع المؤتمتة، إذ تقوم بتمثيل الأنظمة تمثيلاً تخطيطياً ورياضياً. قُدمت هذه الشبكة من قبل الألماني كارل أدم بتري عام 1962، واستخدمت لتمثيل العديد من أنظمة الاتصالات والتحكم ونظم الإنتاج والأتمتة، والشبكات الصناعية وإلى ما ذلك.[3]

1-1-1 مفهوم شبكات بتري:

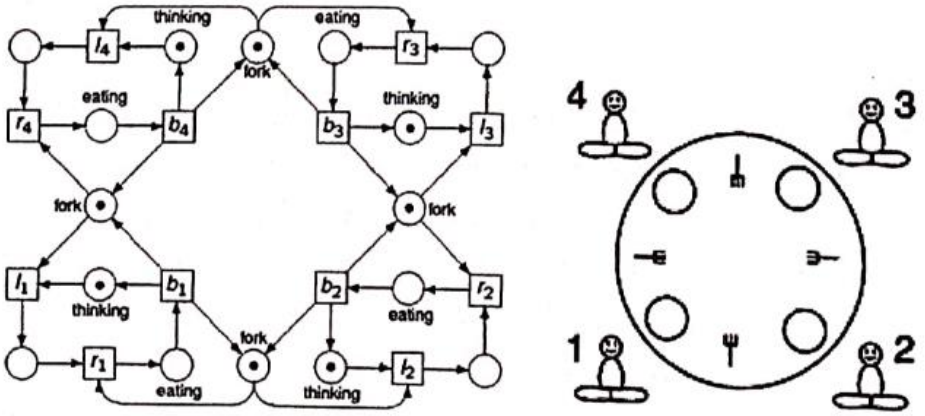
شبكة بتري عبارة عن بيان موجه ثنائي الأجزاء له مكونين : هيكل الشبكة والعلامة الأولية (**Initial Marking**)، هيكل الشبكة يحوي نوعين من العقد: **الأماكن (Places) والانتقالات (Transitions)** وهناك **أقواس** موجهة بينهما، يتم تمثيل المكان بيانياً بدائرة والانتقال بمربع أو شريط، ويمكن أن يحتوي المكان على **رموز مميزة (Tokens)** التي يشار إليها بنقاط سوداء أو عدد صحيح يمثل عددها، إذ توفر شبكات بتري بنية مناسبة لتمثيل الأنظمة فضلاً عن أنها تستخدم جبر المصفوفات الخطية والذي يجعلها مفيدة ولاسيما لنمذجة وتحليل ومراقبة أنظمة الأحداث المتقطعة. يوضح الشكل(1-1) العناصر الهيكلية لشبكات بتري.



الشكل(1- 1)العناصر الهيكلية لشبكات بتري

يتم بناء الشبكة ووضع رموز في الأماكن، ويتم تمكين الانتقال عندما يكون عدد الرموز في المكان المؤدي له أكبر أو تساوي الوزن الموجود على السهم الداخل إليه، وعند قدح انتقال ما فإنه يتم حذف الرموز من أماكن الدخل وإعادة وضعها في أماكن الخرج. عندما يتم تمكين انتقالات عدّة في الوقت نفسه فمن الممكن أن يتم قدح أي منها، كما قد توجد رموز متعددة في أي مكان من الشبكة.

يوضح الشكل (1−2) استخدام شبكة بتري لمحاكاة مسألة عشاء الفلاسفة الذين اجتمعوا حول مائدة مستديرة لتناول العشاء وبين كل اثنين منهما شوكة. [4]



الشكل(1- 2)مسألة عشاء الفلاسفة الأربعة باستخدام شبكة بتري

يسمى توزيع الرموز المميزة على أماكن الشبكة **بالعلامة (Marking)** التي تتوافق مع حالة النظام المصمم، إن توزيع الرموز الأولي يسمى بالعلامة الأولية. يمكن تعريف شبكة بتري المعممة بأنها عبارة عن 4 مجموعات $N=(P, T, F, W)$ إذ إنّ P هي مجموعة الأماكن $(P_1,P_2,\ldots.P_m)$ و T مجموعة الانتقالات $(T_1,T_2,\ldots T_n)$ وكلاهما مجموعات منتهية وغير فارغة ومنفصلة تحقق:

$$P \cup T \neq \emptyset \text{ and } P \cap T = \emptyset$$

و F مجموعة علاقات التدفق في الشبكة $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ ممثلة بأقواس ذات أسهم من أماكن إلى انتقالات أو من انتقالات إلى أماكن، أما W فهي تعبر عن أوزان الأقواس وفق:

$$W : (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}$$

إذ إنّ $\mathbb{N}$ تشير إلى مجموعة الأعداد الصحيحة غير السالبة، ومن أجل $x,y \in P \cup T$ تحقق $W(x,y)$ $0 <$ وغير ذلك تكون $W(x,y) = 0$. وعموماً يمكن ترميز شبكة بتري وفق $N=(P,T,F)$ إذا كانت الأوزان لجميع لأقواس تساوي 1.[2]

وعندما يقدح انتقال ما، فإن العلامات تعبر من مكان الدخل إلى مكان الخرج المرتبطين بذلك الانتقال وفق الوزن المناسب، يوضح الجدول(1−1) الاستخدامات المختلفة لعناصر شبكة بتري.

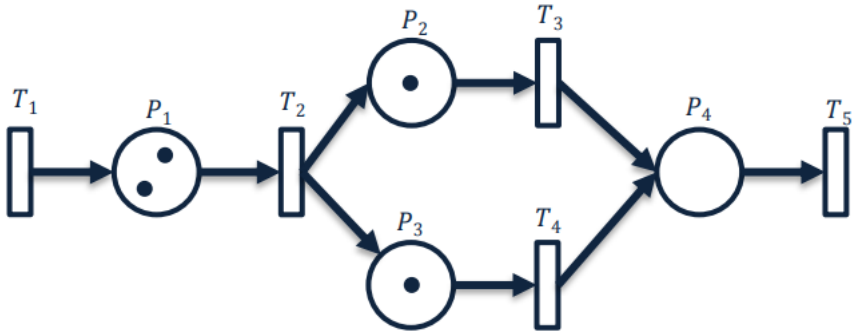
الجدول(1- 1)الاستخدامات المختلفة لعناصر شبكة بتري.

مكان الخرج	الانتقال	مكان الدخل
الحالة التالية للحدث	الحدث	الحالة السابقة للحدث
معطيات خرج	خطوة حسابية	معطيات دخل
إشارة الخرج	معالجة للإشارة	إشارة الدخل
المنتج	عمل أو مهمة	منبع قطع
نتيجة	عبارة منطقية	شرط
مخزن	عملية أو معالجة	مخزن

1-1-2 أنواع شبكات بتري:

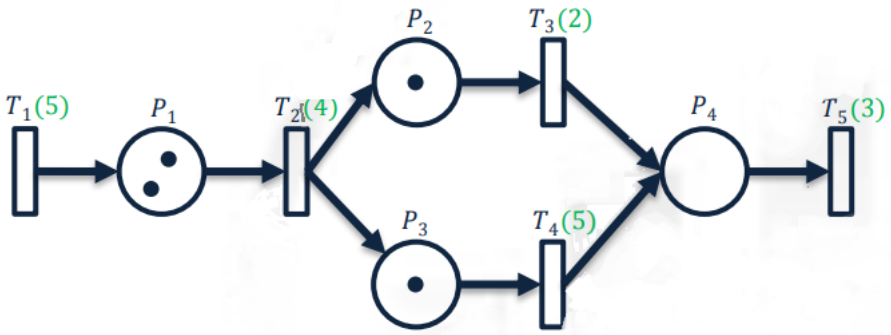
اعتمدت العديد من الدراسات على شبكات بتري، وظهرت أنواع عدّة لها منها:

- شبكة بتري العادية: تتألف من أماكن وانتقالات كما ذكرنا سابقاً، يوضح الشكل (1-3) مثالاً لشبكة بتري عادية:



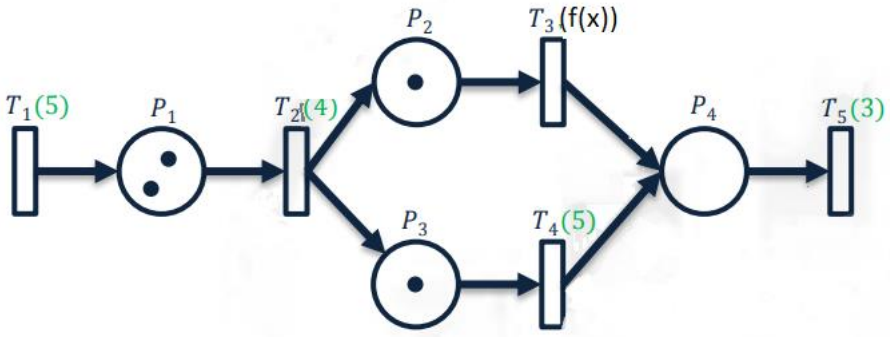
الشكل(1- 3)مثال لشبكة بتري العادية

- شبكات بتري الزمنية: تهدف إلى تحليل سلوك الأنظمة التي يشكل الزمن فيها عاملاً مستمراً وقابلاً للقياس إذ تساعد في التعبير عن القيود الزمنية المطلوبة، وتحوي على العناصر نفسها ولكنها محملة بأزمنة للانتقالات، كما يمكن تحميل العقد بأزمنة أيضاً. يوضح الشكل(1-4) مثالاً لشبكات بتري الزمنية. [5]



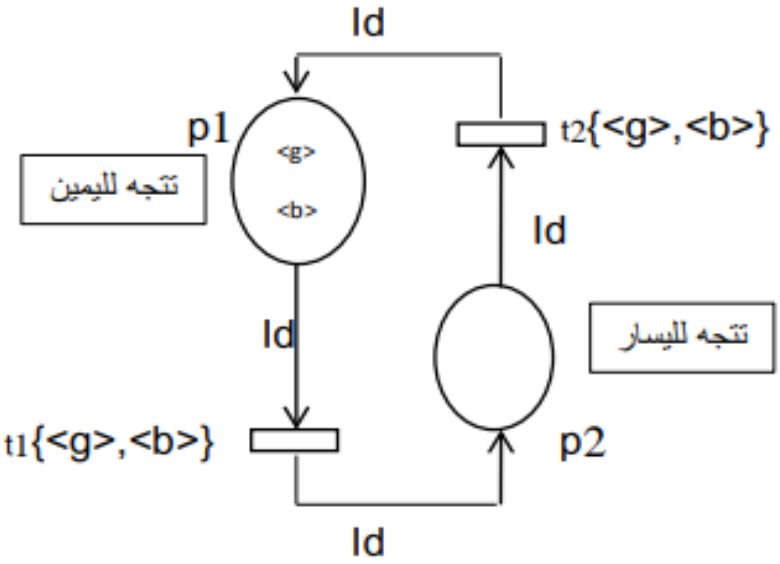
الشكل(1- 4) مثال لشبكة بتري الزمنية

- شبكات بتري الاحتمالية: وهي عبارة عن شبكة بتري الزمنية، ولكن زمن التشغيل لأحدى الانتقالات على الأقل يتبع لتوزيع احتمالي. يوضح الشكل (1–5) مثالاً لشبكات بتري الاحتمالية.



الشكل(1-5)مثال لشبكة بتري الاحتمالية

- شبكات بتري الملونة: تجمع بين الخصائص المفيدة لشبكات بتري مع إمكانيات لغات البرمجة عالية المستوى، إذ إنّها تركز على جمع شبكات عدّة في شبكة واحدة، بوضع ألوان لكل رمز وتوابع لكل قوس وحارس لكل انتقال، يوضح الشكل(1–6) نموذج لشبكة بتري الملونة التي تعالج حركة سيارتين نحو اليمين واليسار. [6]



الشكل(1- 6) مثال لشبكة بتري ملونة

كما يوجد العديد من الأنواع الأخرى مثل شبكات بتري العائمة...وغيرها.

1-2 أنظمة الأحداث المتقطعة:

تحوي أنظمة الأحداث المتقطعة على مجموعة من الحالات المنفصلة، إذ تحدث الانتقالات بين الحالات المختلفة في لحظات زمنية منفصلة غير متزامنة استجابةً لحدث ما، عادةً لا يمكن وصف العلاقات بين الانتقالات والأحداث بواسطة معادلات تفاضلية أو معادلات فروق، فتستخدم أنظمة الأحداث المتقطعة العديد من النماذج والتقنيات الرياضية، وتُدرس أنظمة الأحداث المتقطعة على مستويين مختلفين:

- **المنطق (Logical).**
- **الأداء (Performance).**

يستخدم مستوى المنطق لوصف الخصائص النوعية والتحكم في تسلسل الأحداث، دون أخذ التوقيت بالحسبان، فإن المسألة الأساسية هي تجنب الحالات الممنوعة **(Forbidden States)** أو تسلسل الأحداث وذلك لضمان الحيوية **(Liveness)**، أن المقاربة الأكثر شهرة للتحكم في هذا المستوى هي نظرية التحكم الإشرافي SCT **(Supervisory Control Theory)**، إذ يتم التحكم في سلوك النظام من قبل المشرف الذي يمنع أحداث محددة تلبيةً لمواصفات التحكم المطلوبة.

أما مستوى الأداء يتعامل مع الخصائص الكمية **(Quantitative)** ويهدف إلى التحكم في السلوك الزمني لأنظمة الأحداث المتقطعة، إذ إنّ المسألة الأساسية هي تحقيق شروط الزمن والجدولة، من ثم تحسين بعض معايير الأداء الرئيسية لأنظمة الأحداث المتقطعة، على سبيل المثال معدل إنتاج النظام. [7,8]

في أنظمة الأحداث المتقطعة عادةً ما يسمى النظام الذي يجب التحكم فيه ب **Plant**، وإذا صُمِّم باستخدام شبكات بتري فإن شبكة بتري الناتجة تسمى **Plant Petri Net Model**.

أن سلوك ال **Plant** قد ينتهك بعض القيود التي يجب فرضها على النظام، لذلك غالباً نحتاج إلى وكيل خارجي **(External Agent)** للتحكم فيه ليحقق السلوك المطلوب، يطلق على نموذج Plant والمشرف عليه معاً نظام خاضع للتحكم أو شبكة خاضعة للتحكم إذ كان كلاهما يتخذ شكل شبكة بتري، فنظراً لأنّ فضاء الحالة لشبكة بتري منظماً بوصفه شعاعاً، تستخدم على نطاق واسع في نظرية التحكم للنظم الأحداث المتقطعة.[9]

وتعود شهرة شبكة بتري في نمذجة DES والتحكم فيها للأسباب التالية:

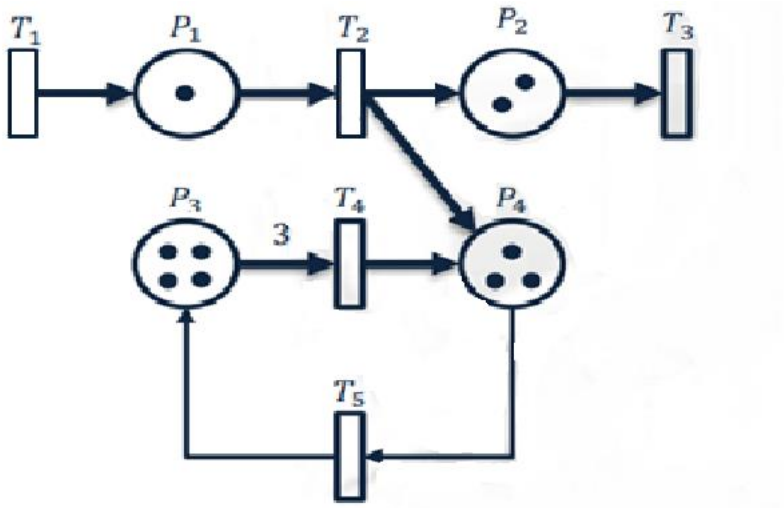
- ❖ طور علماء الحاسب عائلة كبيرة من نماذج شبكة بتري في العديد من التخصصات، إذ يمكن أن تمثل أنواع مختلفة من DES، أي تستخدم لتمثيل المستوى المنطقي ل DES، فيمكن تمثيل الرسوم البيانية للأحداث المحددة بوقت محدد وهي فئة فرعية من شبكات بتري تعادل الأنظمة الخطية، ويمكن استخدام شبكات بتري الزمنية المحددة والعشوائية لتقييم الأداء، وتقدم شبكات بتري عالية المتسوى **(High-level)** نموذجاً للأنظمة المعقدة، ويمكن للشبكات الهجينة **(Hybrid)** أن تمثل أنظمة هجينة تتضمن عمليات منفصلة ومستمرة، وهذا يوضح أن عائلة شبكات بتري المطورة في المقالات العلمية يمكن أن تستخدم في المحاكاة **(Simulation)** والتحكم **(Control)** والتحقق **(Verification)** و تحليل الأداء **(Performance Analysis)** والجدولة **(Scheduling)** والأمثلة **(Optimization)**.
- ❖ تستخدم شبكات بتري في المراحل جميعها بدءاً من النمذجة وإلى التحكم في التنفيذ، كما يمكن تمثيل كل من النظام والمشرف بشبكات بتري، هذه الميزة يمكن أن تسهل إلى حد كبير نمذجة نظام الحلقة المفتوحة وتنفيذ التحكم وتحليل وتقييم نظام الحلقة المغلقة.

- ❖ تقليل التعقيد الحسابي من خلال الاستفادة الكاملة من المعلومات الهيكلية لشبكات بتري، فضلاً عن أن لشبكات بتري مجموعة من أدوات التحليل الرياضي التي تستخدم جبر المصفوفة الخطي.
- ❖ كانت نتائج الأبحاث باستخدام شبكات بتري للنمذجة والتحكم في ال DES مثمرة للغاية على مدى العقود الماضية.

على الرغم من أن قوة اتخاذ القرار لشبكات بتري هي محدودة إلا أن مجموعة كبيرة من مشكلات التحكم في ال DES يمكن حلها بفعالية وكفاءة باستخدام شبكات بتري [10]، على سبيل المثال : أثبتت شبكات بتري نجاحها في التعامل مع الحالات الممنوعة وهذا مهم جداً في مواصفات التحكم الخاضع للإشراف في أنظمة الأحداث المتقطعة، من ثم بحسب الحقائق المذكورة أعلاه فإن شبكات بتري أصبحت وبشكل متزايد نموذجاً رياضياً مهماً ومتكاملاً لنمذجة أنظمة الأحداث المتقطعة والتحكم بها.

1-3 تعاريف هامة لشبكات بتري:[2]

- ❖ أن وضع العلامة M لشبكة بتري N تعني مقابلة كل مكان P برقم **M(P)** الذي يشير إلى عدد الرموز المميزة في المكانP، ونقول عن مجموعة فرعية $S \subseteq P$ أنها معلمة من العلام M إذا وفقط إذا وجد مكان واحد من S يحوي على رمز، ونقول عن المجموعة S إنها فارغة ضمن M إذا وفقط إذا تحقق: $M(S) = 0$
- ❖ نطلق على (N,M_0) شبكة النظام و M_0 العلامة الابتدائية، ولاختصار الترميز على سبيل المثال العلامة التي تضع أربعة رموز في المكان P2 ورمزان في المكان P4 في شبكة تحوي على 6 أماكن يمكن أن يرمز لها ب 4p2 +2p4 بدلاً من الشعاع $p=(0,4,0,2,0,0)^T$، وفي بعض الأحيان يستخدم $N=(P,T,F,W,M_0)$ للدلالة على شبكة معلمة.
- ❖ نقول عن انتقال t أنه انتقال **مورد** إذا وفقط إذا لم يوجد على دخله أية عقدة، إذ يمثل في العمليات الصناعية على سبيل المثال عمليات سحب المواد الأولية من المخازن، وهو دائماً فعال أي شرط قدحه محقق دائماً، ونعرف الانتقال النهائي بالانتقال الذي لا توجد على خرجه أي عقدة، على سبيل المثال عملية التخزين في العمليات الصناعية. يوضح الشكل (1-7) شبكة بتري تحوي على انتقال T1 يشكل انتقال مورد وانتقال T3 يشكل انتقال نهائي.



الشكل(1- 7) انتقال المورد والانتقال النهائي

- دارة العمل وهي الدارة التي تنطلق من مكان أو انتقال وتعود إلى نفس المكان أو الانتقال مع احترام اتجاه الأسهم ومن دون تكرار.
- الاتصال القوي وهو عبارة عن قوس يصل بين المكان والانتقال وهو محقق دائماً.
- بفرض $x \in P \cup T$ تكون عقدة لشبكة بتري $N = (P,T,F,W)$، نعرف **المجموعة السابقة** ل x بالرمز **•x** والتي تتكون من جميع العقد السابقة للعقدة x أي:

$$\bullet x = \{y \in P \cup T \mid (y,x) \in F\}$$

ونعرف **المجموعة التالية** ل x بالرمز **x•** والتي تتكون من جميع العقد اللاحقة للعقدة x أي تحقق:

$$x\bullet = \{y \in P \cup T \mid (x,y) \in F\}.$$

- من أجل $t \in T$ نعرف أماكن الدخل للانتقال t وفق $p \in \bullet t$، ونعرف أماكن الخرج للانتقال t وفق: $p \in t\bullet$.
- من أجل $p \in P$ نعرف انتقالات الدخل للمكان p وفق $t \in \bullet p$، ونعرف انتقالات الخرج للمكان p وفق: $t \in p\bullet$.
- نقول عن $t \in T$ انه مفعل **(Enabled)** من أجل العلامة M إذا وفقط إذا تحقق:

$$\forall p \in \bullet t,\ M(p) \geq W(p,t)$$

ويشار اليها بالرمز M[t> وقدحها يولد علامة جديدة M` تحقق:

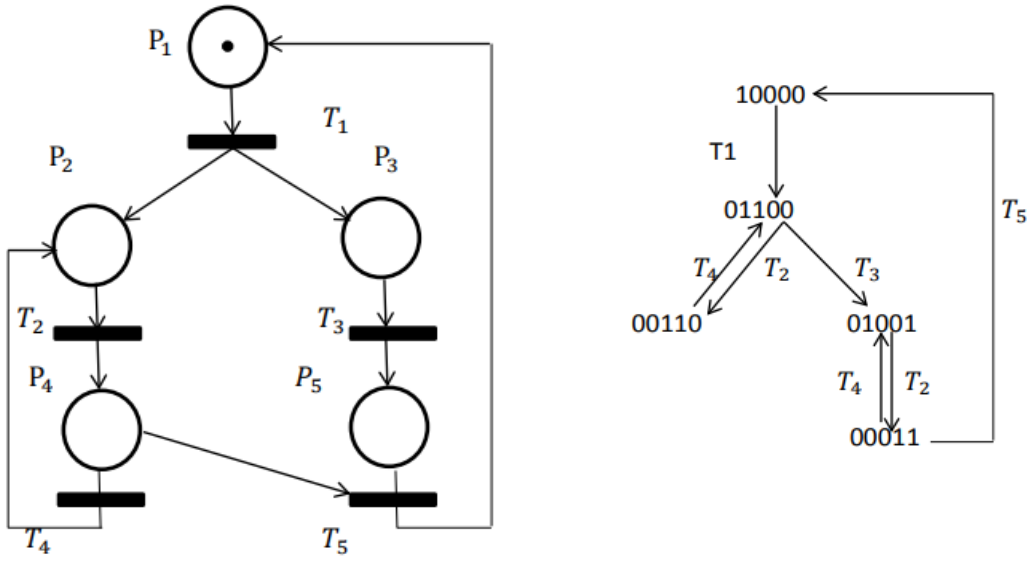
$$\forall p \in P,\ M`(P) = M(p) - W(p,t) + W(t,p)$$

ونقول عندها أن **M[t>M`** أي أن M` علامة يمكن الوصول اليها مباشرةً من العلامة M، واذ كان الوصول إلى العلامة M`` يحتاج الى قدح متسلسل لمجموعة من الانتقالات $\sigma = t_1 t_2 \cdots t_n$ وبالتالي الوصول إلى مجموعة من العلامات $M_1, M_2 \cdots, M_n$ نقول عندها أن $M[t_1>M_1[t_2>M_2 \ldots M_n[t_n>M``$ أي يمكن الوصول إلى العلامة M`` بصورة غير مباشر، وفي كلا الحالتين **تسمى مجموعة العلامات التي يمكن الوصول إليها من M في N مجموعة قابلية الوصول لشبكة N، ويتم الاشارة اليها وفق** .R(N,M)

❖ نقول عن شبكة بتري (N,M_0) أنها محدودة **(Bounded)** من أجل العلامة الإبتدائية M_0 :

$$\exists k \in \mathbb{N}+,\ \forall M \in R(N,M_0),\ \forall p \in P,\ M(p) \leq k$$

أي نقول عن الشبكة أنها محدودة إذا كانت مجموعة قابلية الوصول تحوي على عدد محدد من العناصر ويمكن التعبير عنها عن طريق رسم بيان قابلية الوصول **Reachability Graph وهو عبارة عن رسم بياني موجه كل عقدة فيه تعبر عن علامة يمكن الوصول إليها، ولأقواس تعبر عن الانتقالات التي تؤدي إلى الانتقال من العلامة إلى الأخرى.** يوضح الشكل(1-8) مثال لرسم لمخطط الوصولية لشبكة بتري.



الشكل(1- 8) مثال لرسم مخطط الوصولية لشبكة بتري

❖ نقول عن شبكة بتري $N = (P,T,F,W)$ أنها نقية **(Pure)** خالية من الحلقات الداخلية **Self-loop** إذا وفقط إذا تحقق:

$$\forall x,y \in P \cup T,\ W(x,y) > 0 \rightarrow W(y,x) = 0$$

❖ يمكن تمثيل شبكة بتري النقية بالمصفوفة [N] وهي مصفوفة من الأرقام الطبيعية تحقق:

$$[N](p,t) = W(t,\ p) - W(p,t)$$

وتسمى **مصفوفة الحدث** ويمكن بها معرفة كيفية انتقال العينات ضمن الشبكة بقدح انتقال واحد أو مجموعة من الانتقالات، ويجب الملاحظة أنها لا تعتمد على الرموز الابتدائية بل تتعلق ببنية الشبكة نفسها، وبالتالي فإن مصفوفة الحدث تكفي لتوصيف التغير النسبي في ترميز الأماكن عند حدوث انتقال معين، ويمكن التعبير عنها باستخدام مصفوفتي المخارج و المداخل وفق الشكل التالي:

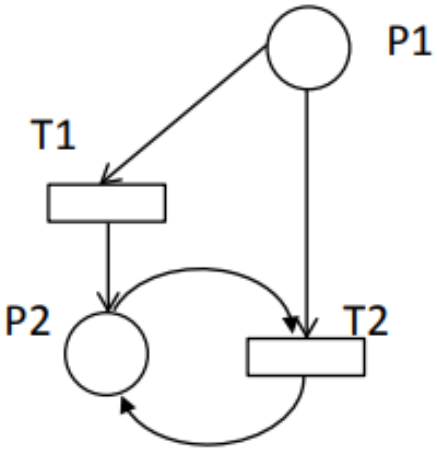
$$[N]=[N]^{+} - [N]^{-}$$

$$[N]^{+}(p,t) = W(t,\ p)$$

$$[N]^{-}(p,t) = W(p,t)$$

إذ إنّ استخدام مصفوفتي الدخل والخرج يتيح وصف بنية الشبكة بشكل دقيق.

مثال : لتكن لدينا شبكة بتري الموضحة بالشكل(1−9).



الشكل(1- 9) مثال توضيحي لحساب مصفوفة الحدث

نعرف مصفوفة الخرج وفق:

$$[N]^{+} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

نعرف مصفوفة الدخل وفق:

$$[N]^{-} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

بالتالي فإن مصفوفة الحدث :

$$[\mathrm{N}] = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ومن الواضح أن قدح الانتقال T1 يؤدي إلى زيادة رمز في المكان P2 وأخذ رمز من المكان P1، كما أن قدح الانتقال T2 يؤدي إلى أخذ رمز من المكان P1 ، وتبين مصفوفة الحدث ذلك.

❖ بفرض (N = (P,T,F,W شبكة بتري و σ سلسلة محددة من لانتقالات، نعرف الشعاع $\overrightarrow{\sigma}$ الذي يقابل كل t في T برقم يعبر عن عدد مرات تكرار t في σ وفق:

$$\overrightarrow{t_1} = (1,0, \dots 0)^T$$
$$\overrightarrow{t_2} = (0,1, \dots 0)^T$$
$$\overrightarrow{t_k} = (0,0, \dots 0,1)^T$$

إذ k عدد الانتقالات الموجودة في الشبكة.

ويمكن استخدام مصفوفة الحدث لمعرفة العلامة الناتجة `M انطلاقاً من العلامة الحالية M بعد قدح أو تسلسل معين من القدح σ وفق المعادلة:

$$\mathrm{M`} = M + [N]\vec{\sigma}$$

يطلق على هذه المعادلة بمعادلة **الحالة لشبكة بتري State Equation** التي تقدم وصفاً جبرياً لتغير العلامات في الشبكة، أي أنها طريقة للتعبير عن العلاقة المتبادلة بين العلامات وعدد مرات حدوث الانتقال في تسلسل انتقالات معين، وهو تعبير مهم لأنه يسمح بتطبيق مفاهيم الجبر الخطي في مجال شبكات بتري، علماً أنه أي علامة يمكن الوصول اليها يجب أن تحقق معادلة الحالة ولكن العكس غير صحيح. من ثم أن الشرط الضروري للوصول الى العلامة M انطلاقاً من العلامة الأولية M_0 هو تحقيق معادلة الحالة.

4-1 الثوابت الهيكلية Structural Invariants:

إحدى السمات المهمة لشبكات بتري أنه يمكن الحصول على خواصها الهيكلية باستخدام الجبر الخطي وهذه الخصائص تعتمد فقط على طوبولوجية الشبكة وليس لها علاقة بالعلامات الأولية ولهذا تسمى ثوابت هيكلية، وهي وسيلة مهمة لتحليل سلوك الشبكة من جهة نظر هيكلية.[11,12,13]

- نعرف **P-vector** هو شعاع عامودي مفهرس وفق $I : P \to \mathbb{Z}$، و **T-vector** شعاع عامودي مفرس وفق $J : T \to \mathbb{Z}$ حيث أن $\mathbb{Z}$ هي مجموعة الأعداد الصحيحة.
- نقول عن شعاع الأماكن I أنه ثابت **P-invariant** (المكان الثابت) إذا وفقط إذا تحقق ما يلي: $I \neq 0$ و $I^T[N] = 0^T$ ، أي يتوافق مع مجموعة من الأماكن التي يكون فيها عدد الرموز الموزونة ثابت لأي علامة يمكن الوصول إليها، ونقول عن شعاع الانتقالات J أنه ثابت **T-invariant** (الانتقال الثابت) إذا وفقط إذا تحقق $J \neq 0$ و $[N]\, J = 0$.
- بفرض (N,M_0) شبكة مع تسلسل الانتقالات σ بحيث يحقق $M_0[\sigma>M$ إذا وفقط إذا كان الشعاع $\vec{\sigma}$ يشكل T−invariant عندها يكون $M_0=M$.

نلحظ أنه ومن أجل شبكة خاصة ومعلمة، فإن وجود الثابت T لا يعني وجود تسلسل انتقالات يشكل **شعاع باريك Parikh**، وهو عبارة عن شعاع T ينقل قدحه الشبكة من العلامة الأولية ويعود إليها.

السايفون والمصائد Siphons and Traps:

ان الثوابت p (**P-invariants**) التي يمكن اشتقاقها من معادلة الحالة لشبكة بتري هي علامات ثابتة، وعدد الرموز في الأماكن المقابلة لها يبقى ثابتاً، أي أن العلامات التي يمكن الوصول إليها تخضع للقانون الثابت **P-invariant**، وفي شبكات بتري يعتبر السايفون والمصائد كائنات هيكلية تتضمن علامات ثابتة، إذ إنّ القوانين الثابتة المرتبطة بها لا تنطبق على أي علامة يمكن الوصول اليها، لكن بمجرد أن تصبح صحيحة فإنها تبقى صحيحة لأي علامة يمكن الوصول إليها لاحقاً، بمعنى أخر يبقى السايفون فارغاً بمجرد أن يفقد الرموز جميعها فيه، وتبقى المصيدة معلمة **marked** بمجرد احتوائها على أي رمز، إذ دُرس السايفون والمصائد على نطاق واسع واستخدامها للتحليل الهيكلي لشبكة بتري، كما أنها تلعب دوراً مهماً في تحليل حيوية الشبكة، وخاصة شبكات بتري العادية.[14]

❖ نقول عن مجموعة الأماكن غير االفارغة S أنها **سايفون** إذا وفقط إذا تحقق: $S^{\bullet} \subseteq {}^{\bullet}S$ ونقول عنها انها **مصيدة** إذا وفقط إذا تحقق: ${}^{\bullet}S \subseteq S^{\bullet}$، ونقول عن **السايفون أنه أصغري Minimal** إذ لم يحتوي بداخله أي سايفون؛ أي لا يوجد مجموعة فرعية منه تشكل سايفون، وكذلك الأمر بالنسبة للمصيدة نقول أنها أصغرية إذ لم يوجد مصيدة بداخلها.

ونقول عن السايفون الأصغري أنه **صارم Strict** اذا حقق $S^{\bullet} \subsetneq {}^{\bullet}S$.

وبفرض أن S1 وS2 كلا منهما سايفون من ثم فان S1∪S2 هو سايفون أيضاً، واذ كان S1 وS2 كلا منهما مصيدة بالتالي فان S1∪S2 هو فخ أيضاً.

❖ بفرض لدينا شبكة بتري المعرفة وفق $N = (P,T,F,W)$ وإن $N_X=(P_X ,T_X ,F_X ,W_X)$ علماً أنه $PX \subseteq P$ و $TX \subseteq T$، نقول عن N_X أنها شبكة فرعية مولدة وفق $PX \cup TX$ إذا وفقط إذا كان:

$$F_X = F \cap[(P_X \times T_X)\cup (T_X \times P_X)] \text{ and } \forall f \in F_X , W_X (f) = W(f)$$

❖ ليكن لدينا S سايفون أصغري في الشبكة N، يكون عندها المجموعة الجزئية المولدة $S \cup {}^{\bullet}S$ متصلة بقوة.

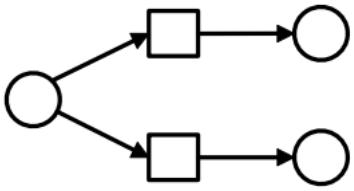
1-5 أصناف فرعية لشبكة بتري Subclasses of Petri Nets:

هناك عدد من الأصناف الفرعية لشبكات بتري العادية، وتعود أهمية هذه الأصناف إلى مايلي:

- تلعب دوراً مهماً في تطوير تطبيقات معينة لشبكات بتري.[15,16]
- يمكن حل بعض مشكلات التحليل المتعلقة في هذه الفئات بعلاقة زمنية كثيرة الحدود. على سبيل المثال يمكن حل مشكلة تحديد فيما إذ كانت شبكة بتري على قيد الحياة ومحددة بتعقيد مقداره $O(nm)$ حيث n وm عدد الأماكن والانتقالات لشبكة بتري المدروسة.[17]

❖ نقول عن شبكة بتري $N = (P,T,F)$ بانها **آلة حالة State Machine** إذا وفقط إذا كان t تنتمي الى T فإن $\forall t \in T, |{}^{\bullet}t| = |t^{\bullet}| = 1$ ، أي أنه في آلة الحالة يكون لكل انتقال مكان إدخال واحد فقط ومكان إخراج واحد فقط، ويسمح لكل انتقال بنقل الرمز المميز من مكان إلى آخر، وقد تسمح بعض الانتقالات من نقل الرمز من مكانه إلى المكان نفسه، فضلاً عن ذلك، فإن

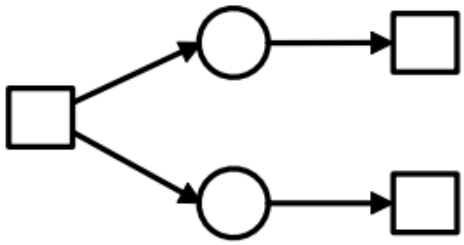
رمزاً مميزاً واحداً في المكان P يفعل الانتقالات جميعها p• ، وإن قدح أياً منها يعطل الأخر ويطلق على ذلك **بالتعارض Conflict**.الشكل(1−10).



الشكل(1- 10) آلة الحالة

ونلحظ أن آلة الحالة (N,M_0) تكون قيد الحياة Live إذا وفقط إذا كانت N متصلة بقوة وM_0 مؤشر بمكان واحد على الأقل.

- نقول عن شبكة بتري $N = (P,T,F)$ بأنها رسم **بيان معلم Marked Graph** إذا وفقط إذا تحقق $\forall p \in P, |•p| = |p•| = 1$، في الرسم البياني المعلم يحتوي كل مكان على انتقال دخل واحد فقط، وانتقال خرج واحد فقط. وقد يكون للانتقال العديد من أماكن الإدخال وأماكن الإخراج أي أن البيان المعلم يسمح ببنية متزامنة. الشكل(1−11).



الشكل(1- 11) رسم بياني معلم

ونلحظ أن آلة الحالة لا تقبل أي مزامنة، والرسم البياني المميز لا يسمح بأي تعارض.

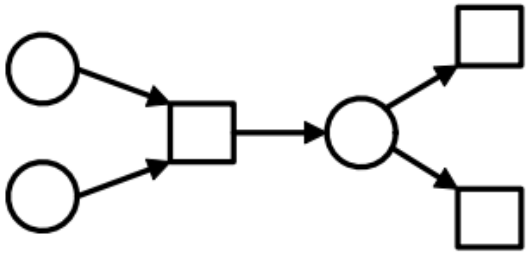
ونقول عن البيان المعلم **Marked Graph** (N,M_0) أنه حي إذا كان M_0 يضع رمزاً مميزاً واحداً على الأقل في كل دائرة في N.

- نقول عن شبكة بتري أنها شبكة حرة الاختيار **Free-choice** إذا وفقط إذا تحقق ما يلي:

$$\forall p1, p2 \in P, p_1^{\bullet} \cap p_2^{\bullet} \neq \phi \Rightarrow |p_1^{\bullet}| = |p_2^{\bullet}| = 1$$

أي في شبكات بتري حرة الاختيار لكل قوس من مكان ما هو إما قوس خرج وحيد أو قوس دخل وحيد إلى انتقال، حيث تسمح شبكات الاختيار الحر بحالة التعارض والمزامنة، أي إن كلا من آلات الحالة والرسوم البيانية المعلمة تندرج تحت فئة شبكات الاختيار الحر.

ونقول عن شبكة بتري حرة الاختيار بأنها قيد الحياة إذا وفقط إذا تحقق أن كل سيفون يحوي على مصيدة معلمة. الشكل(1−12).

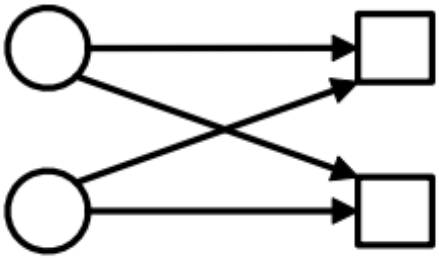


الشكل(1- 12) شبكة حرة الاختيار

❖ نقول عن شبكة بتري أنها موسعة لشبكات حرة الاختيار إذا وفق إذا تحقق:

$$\forall p1, p2 \in P, p_1^{\bullet} \cap p_2^{\bullet} \neq \phi \Rightarrow p_1^{\bullet} = p_2^{\bullet}$$

ويوضح الشكل(1−13) شبكة موسعة للشبكات حرة الاختيار.

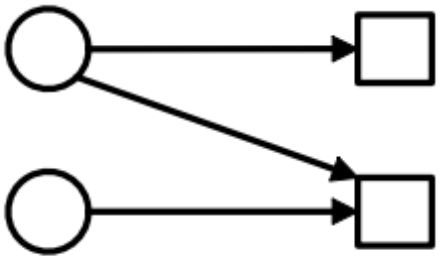


الشكل(1- 13)شبكة موسعة للشبكات حرة الاختيار

❖ نقول عن شبكة بتري أنها شبكة اختيار غير متماثل **Asymmetric Choice** إذا وفقط إذا تحقق:

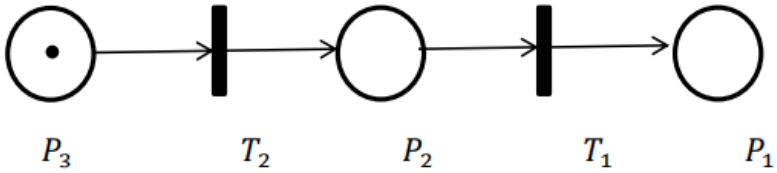
$$\forall p1, p2 \in P, p_1^{\bullet} \cap p_2^{\bullet} \neq \phi \Rightarrow p_1^{\bullet} \subseteq p_2^{\bullet} \; or \; p_2^{\bullet} \subseteq p_1^{\bullet}$$

تكون شبكة الاختيار غير المتماثل على قيد الحياة **إذا** احتوى كل سيفون على مصيدة معلمة.



الشكل(1- 14) شبكة اختيار غير متماثل

❖ نقول عن شبكة بتري أنها تسلسلية **Sequential** إذا كان قدح الانتقال التالي يعتمد على قدح الانتقال السابق. الشكل(1−15).



الشكل(1- 15) شبكة بتري تسلسلية

الفصل الثانـي

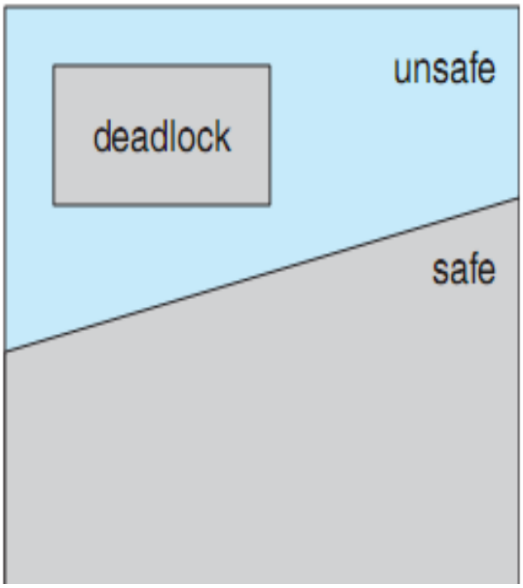
الإقفال الميت

2-1 ما هو الإقفال الميت:

يعرف الإقفال الميت بأنّه الإعاقة الدائمة لمجموعة إجرائيات إما تتنافس على موارد النظام أو تتصل مع بعضها البعض. أي نقول عن مجموعة إجرائيات أنها في حالة إقفال ميت عندما تكون كل إجرائية في المجموعة معاقة بانتظار حدث يمكن أن تسببه فقط إجرائية أخرى معاقة في المجموعة. ويكون الإقفال الميت دائم لأن الأحداث التي تنتظرها الإجرائيات لن تحدث أبداً.[19]

الحالة الآمنة Safe State:

تكون حالة النظام آمنة إذا كان بمقدور النظام تحصيص الموارد لكل إجرائية بترتيب ما وهو لا يزال يتجنب الإقفال الميت، ولا تكون الحالة الآمنة حالة إقفال ميت وعلى العكس تكون حالة الإقفال الميت حالة غير آمنة، ولا تكون كل الحالات غير الآمنة حالات إقفال ميت مع العلم أن الحالة غير الآمنة يمكن أن تؤدي إلى إقفال ميت. يوضح الشكل (2-1) العلاقة بين الإقفال الميت والحالة الآمنة. [19]



الشكل(2- 1) العلاقة بين الإقفال الميت والحالة الآمنة

ما دامت الحالة آمنة، سيكون بمقدور النظام تجنب الحالات غير الآمنة بما فيها الإقفال الميت، بينما في الحالة غير الآمنة لن يكون بمقدور النظام منع الإجرائيات من طلب الموارد بطريقة تسبب حدوث الإقفال الميت أي أن سلوك الاجرائيات هو الذي يتحكم بالحالات غير الآمنة.

2-2 طرق معالجة الإقفال الميت:

عموماً، يمكن التعامل مع مشكلة الإقفال الميت بإحدى الطرق الثلاثة التالية:

- استخدام بروتوكول لمنع أو تجنب الإقفال الميت أي ضمان أن النظام لن يدخل أبداً في حالة إقفال ميت.
- السماح للنظام بالدخول في حالة إقفال الميت وكشفها والتعافي منها.
- تجاهل المشكلة والتظاهر بأنها لا تحدث أبداً في النظام وهذه الطريقة تستخدم في معظم أنظمة التشغيل بما فيها **Linux** و**Windows** ، لكن لا يمكن اعتمادها في أنظمة التصنيع المؤتمتة.

لضمان عدم حدوث الإقفال الميت أبداً، يمكن للنظام أن يستخدم إما طريقة منع الإقفال الميت **(Deadlock Prevention)** أو طريقة تجنب الإقفال الميت **(Deadlock avoidance)**، توفر طريقة منع الإقفال الميت مجموعة من الطرق التي تضمن أنّ واحداً على الأقل من شروط الإقفال الميت لا يمكن أن يتحقق أي تمنع هذه الطرق الإقفال الميت من خلال فرض القيود على كيفية طلب المورد.

تتطلب طريقة تجنب الإقفال الميت أن يعطى النظام المدروس مسبقاً معلومات إضافية عن الموارد التي ستقوم الإجرائية باستخدامها خلال تنفيذها وبهذه المعرفة سيكون النظام قادراً على أن يقرر من أجل كل طلب فيما إذا كان على الإجرائية الانتظار أو المتابعة. إن أخذ القرار فيما إذا كان الطلب الحالي سيلبى أو سيؤجل يفرض على النظام المدروس الآخذ بالحسبان الموارد المتوفرة حالياً والموارد المحصصة حالياً لكل إجرائية والطلبات المستقبلية لكل إجرائية.

إذا لم يوظف النظام أي من الطريقتين السابقتين (منع الإقفال الميت أو تجنب الإقفال الميت) عندئذ يمكن أن يحدث الإقفال الميت في النظام وفي هذه الحالة يكون على النظام توظيف خوارزميتين إذ تقوم الأولى بفحص حالة النظام لمعرفة فيما إذا كان الإقفال الميت قد وقع وتقوم الخوارزمية الثانية بالتعافي من الإقفال الميت في حال وقوعه.

مع غياب خوارزميات الكشف والتعافي من الإقفال الميت نكون قد وصلنا إلى الحالة التي يكون فيها النظام في حالة إقفال ميت وليس لديه أي طريقة لمعرفة ماذا حدث. في هذه الحالة سيسبب الإقفال الميت الذي لم يكشف تدهور أداء النظام كون الموارد ممسوكة من قبل إجرائية لا يمكنها متابعة التنفيذ فضلاً عن أن هناك إجرائيات أكثر و أكثر ستدخل حالة الإقفال الميت عندما تقوم بطلب هذه الموارد، ونتيجة هذه الحالة سيتوقف النظام عن العمل وسيحتاج لإعادة إقلاعه يدوياً.

2-2-1 منع الإقفال الميت Deadlock Prevention:

إن حدوث الإقفال الميت يتطلب تحقق كل شرط من الشروط الأربعة الضرورية لتحقيقه، وبالتالي يمكن منع حدوثه بضمان عدم تحقق واحد من هذه الشروط على الأقل، وهذه الشروط هي:

- **الاستبعاد المتبادل Mutual Exclusion:**

يجب أن يتحقق الاستبعاد المتبادل وهذا يعني أن يكون واحد من الموارد على الأقل غير قابل للتشارك، على العكس لا تتطلب الموارد التشاركية نفاذ مستبعد تبادلياً من ثم لا يمكن أن تسبب إقفال ميت.

عموماً لا يمكن منع الإقفال الميت بمنع تحقق شرط الاستبعاد المتبادل لأن بعض الموارد تكون بطبيعتها غير تشاركية.

- **تمسك وتنتظر Hold and Wait:**

لضمان عدم تحقق هذا الشرط أبدا يجب ضمان أنه في كل مرة تطلب الإجرائية مورد يجب ألا تكون تمسك بمورد آخر.

- **لا استيلاء No Preemption:**

ينطوي الشرط الثالث لحدوث الإقفال الميت على عدم السماح بالاستيلاء على الموارد التي حصصت للتو.

- **الانتظار الدائري Circular Wait:**

إحدى الطرق لضمان عدم تحقق هذا الشرط أبداً هي بفرض ترتيب كلي على كل أنواع الموارد.

تمنع خوارزميات منع الإقفال الميت حدوثه من خلال تقييد كيفية طلب الموارد بحيث يضمن هذا التقييد عدم تحقق شرط واحد على الأقل من الشروط السابقة، ولكن منع الإقفال الميت بهذه الطريقة يكون له آثار جانبية تتجلى بانخفاض مدى الاستفادة من الموارد وتقليل إنتاجية النظام.

2-2-2 تجنب الإقفال الميت Deadlock Avoidance:

يتطلب تجنب الإقفال الميت توفر معلومات إضافية حول كيفية طلب الموارد، بهذه المعرفة للتسلسل الكامل للطلبات والتحريرات التي تقوم بها كل إجرائية سيكون بإمكان النظام أن يقرر من أجل كل طلب فيما إذا كانت الإجرائية ستنتظر أو لا تنتظر بهدف تجنب إي إقفال ميت محتمل في المستقبل.

يتطلب كل طلب عند إتخاذ هذا القرار أن يأخذ النظام بالحسبان الموارد المتوفرة حالياً والموارد التي تمسك بها كل إجرائية حالياً والطلبات والتحريرات المستقبلية لكل إجرائية، وتختلف الخوارزميات التي

تستخدم هذه المقاربة بكمية ونوع المعلومات المطلوبة، ومع هذه المعلومات المسبقة سيكون من المحتمل بناء خوارزمية تضمن عدم دخول النظام أبداً في حالة إقفال ميت.

تقوم خوارزميات تجنب الإقفال الميت بفحص حالة تحصيص الموارد ديناميكياً لضمان عدم تحقق شرط الانتظار الدائري أبداً. تعرف حالة تحصيص الموارد بعدد الموارد المتوفرة والمحصصة وبالمطالب الأعظمية للإجرائيات.

2-2-3 استخدام خوارزمية الكشف:

إن استدعاء خوارزمية الكشف يعتمد على العاملين التاليين:

- عدد المرات التي يمكن أن يحدث فيها الإقفال الميت.
- عدد الإجرائيات التي ستتأثر بالإقفال الميت عند حدوثه.

إذا كان الإقفال الميت يحدث حدوثاً متكرراً، عندئذ يجب استدعاء خوارزمية الكشف بصورة متكررة وستكون الموارد المحصصة إلى الإجرائيات المتورطة فيه عاطلة عن العمل ريثما يُكسر الإقفال الميت، كما وأن عدد الإجرائيات المتورطة في حلقة الإقفال الميت يمكن أن يزداد.

نعلم بأنّ الإقفال الميت يحدث فقط عندما تقوم إجرائية ما بطلب لا يمكن أن يلبى تلبيةً فورية، قد يكون هذا الطلب هو آخر طلب يكمل سلسلة من الإجرائيات المنتظرة. لذلك يمكن استدعاء خوارزمية الكشف في كل مرة لا يمكن تلبية طلب تحصيص مورد تحصيصاً فورياً. في هذه الحالة، لن يكون بمقدورنا فقط تحديد مجموعة الإجرائيات المتورطة في الإقفال الميت وإنما تحديد الإجرائية التي سببت الإقفال الميت مع العلم أنه في الواقع كل واحدة من الإجرائيات المتورطة في الإقفال الميت تكون رابطاً في الحلقة في بيان الموارد لذلك تكون كل الإجرائيات معاً مسببة للإقفال الميت. في حال كان هناك العديد من أنواع

الموارد المختلفة، فإنّ طلب واحد يمكن أن يخلق عدة حلقات في بيان الموارد وتكمل كل حلقة بالطلب الأحدث وتسبب من قبل إجرائية واحدة من السهل تحديدها.

بالطبع إن استدعاء خوارزمية الكشف في كل مرة تطلب فيها إجرائية مورد يتكبد عبئاً كبيراً بالنسبة لزمن الحساب ويكون البديل الأقل تكلفة هو استدعاء الخوارزمية في فترات محددة (مرة واحدة كل ساعة أو عندما يصبح مدى الاستفادة من النظام أقل من 40%) مع العلم أن الإقفال الميت يؤدي إلى انخفاض إنتاجية النظام ومدى الاستفادة من النظام. في حال استدعاء خوارزمية الكشف في فترات اعتباطية، فإن بيان الموارد يمكن أن يحتوي عدة حلقات وفي هذه الحالة لن يكون بإمكاننا تحديد من هي الإجرائية من بين عدة إجرائيات سببت حدوث الإقفال الميت.

2-2-4 التعافي من الإقفال الميت Recovery from Deadlock:

عندما تقرر خوارزمية الكشف أن الإقفال الميت موجود في النظام، يكون هناك عدة بدائل منها:

- يتم إبلاغ المشغّل أن الإقفال الميت حدث ويترك له التعامل معه يدوياً.
- تترك مسؤولية التعافي للنظام ليقوم بها أوتوماتيكياً، حيث أن هناك خيارين لكسر الإقفال الميت:

❖ إنهاء إجرائية أو أكثر لكسر الانتظار الدائري.

❖ الاستيلاء على بعض الموارد من واحدة أو أكثر من الإجرائيات المتورطة بالإقفال الميت.

2-2-4-1 إنهاء الإجرائية Process Termination:

للتخلص من الإقفال الميت بإنهاء إجرائية، نستخدم واحدة من طريقتين، في كلتا الطريقتين يستعيد النظام كل الموارد المحصصة إلى الاجرائيات التي أنهى تنفيذها:

- إنهاء كل الاجرائيات المتورطة في الإقفال الميت: بصورة واضحة، تكسر هذه الطريقة حلقة الإقفال الميت إلا أن تكاليفها باهظة، و قد تكون الاجرائيات المتورطة في الإقفال الميت قد قامت بالتنفيذ لفترة طويلة وسيكون علينا إهمال نتائج هذا التنفيذ الجزئي ومن المحتمل أن يعاد حسابها لاحقاً.
- إنهاء إجرائية واحدة في كل مرة حتى يتم إزالة حلقة الإقفال الميت: تتكبد هذه الطريقة أعباء إضافية لأنه بعد إجهاض كل إجرائية، يجب استدعاء خوارزمية كشف الإقفال الميت لتقرير فيما إذا كانت الإجرائيات ما تزال متورطة في الإقفال الميت.

هناك عوامل عدّة يمكن أن تؤثر على اختيار الإجرائية التي يجب إنهائها وهي تشمل:

- ❖ أولوية الإجرائية.
- ❖ الزمن الذي قضته الإجرائية بالتنفيذ والزمن المتبقي لتنهي الإجرائية تنفيذها.
- ❖ عدد وأنواع الموارد التي استخدمتها الإجرائية(هل من السهل الاستيلاء على هذه الموارد).
- ❖ عدد الموارد التي ما تزال الإجرائية تحتاجها لإنهاء تنفيذها.
- ❖ عدد الإجرائيات التي يجب إنهاؤها.

2-2-4-2 الاستيلاء على الموارد Resource Preemption:

لإزالة الإقفال الميت بالاستيلاء على الموارد، نقوم على التوالي بالاستيلاء على بعض الموارد من الإجرائيات وإعطاء هذه الموارد إلى إجرائيات أخرى ريثما يتم كسر حلقة الإقفال الميت.

في حال كان الاستيلاء مطلوباً للتعامل مع الإقفال الميت، لا بد من معالجة المواضيع الثلاثة التالية:

- ❖ اختيار الضحية **Selection a Victim:** من هي الموارد ومن هي الإجرائيات التي سيتم الاستيلاء عليها، ويجب تحديد ترتيب الاستيلاء لتقليل التكلفة. قد تشمل عوامل التكلفة بارامترات كعدد الموارد التي تمسك بها الإجرائية المقفلة وطول الزمن الذي قضته وهي تنفذ.
- ❖ العودة إلى الحالة السابقة **Rollback:** في حال تم الاستيلاء على مورد من إجرائية ما، من الواضح أنها لن تستطيع الاستمرار بتنفيذها العادي لأنّها أضاعت بعض ما تحتاجه من الموارد. في هذه الحالة يجب إعادة الإجرائية إلى حالة آمنة ما وإعادة تشغيلها من هذه الحالة.

ولأنه من الصعب تحديد ما هي الحالة الآمنة، يكون الحل الأبسط هو الإرجاع الكامل **Total Rollback** إجهاض الإجرائية وإعادة تشغيلها. بالرغم من أنه من الفعالية أكثر أن يتم إرجاع الإجرائية فقط بقدر ما هي ضرورية لكسر الإقفال الميت، تتطلب هذه الطريقة أن يقوم النظام بحفظ المزيد من المعلومات حول حالة كل الإجرائيات قيد التنفيذ.

- ❖ المجاعة **Starvation:** في نظام يعتمد فيه اختيار الضحية اعتماداً رئيسياً على عوامل التكلفة، قد يحدث بأن يتم اختيار الإجرائية نفسها دوماً بوصفها ضحيةً. نتيجة ذلك، لن تكمل هذه الإجرائية ابداً المهمة المسندة إليها وسيكون من الضروري معالجة حالة المجاعة. يجب أن نضمن أن الإجرائية يمكن أن يتم اختيارها بوصفها ضحيةً فقط عدد محدد من المرات ويتم ذلك بتضمين عدد مرات الإرجاع في عوامل التكلفة ويجب أن يؤخذ بالحسبان عند اختيار الضحية.

2-3 الإقفال الميت ضمن شبكات بتري:

تعد شبكات بتري نموذج رياضي شائع للتحقق من التحكم الإشرافي في أنظمة الأحداث المتقطعة، ولاسيّما في تحليل الإقفال الميت والتحكم في أنظمة التصنيع المؤتمتة، ويوجد ثلاث طرق أساسية للتعامل مع الإقفال الميت وهي اكتشاف الإقفال الميت والتعافي منه وتجنب الإقفال الميت ومنع الإقفال الميت، ويمكن تحقيق كل هذه الطرق بالاستفادة من خصائص شبكات بتري.

❖ اذا كانت (N,M_0) شبكة بتري، نقول عن الانتقال $t \in T$ أنه **على قيد الحياة Live** من أجل M_0 **إذا وفقط إذا** كان:

$$\forall M \in R(N,M_0), \exists M` \in R(N,M), M`[t>$$

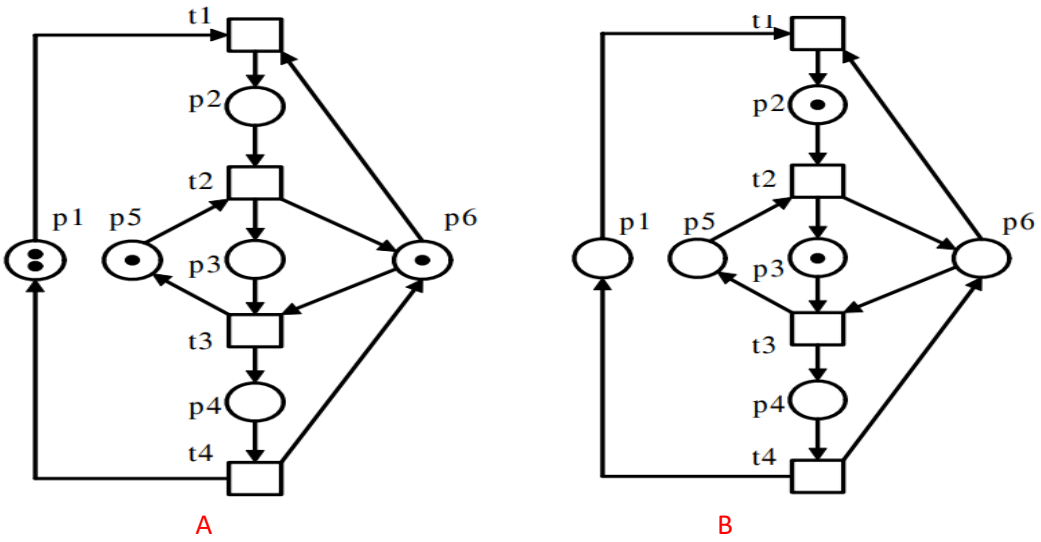
وإذا كانت جميع الانتقالات على قيد الحياة (حيّة) نقول عندها أن الشبكة على قيد الحياة، ونقول عن الشبكة أنها في حالة **إقفال ميت** من أجل العلامة الابتدائية M_0 في حال عدم وجود انتقال يمكن قدحه.

❖ لتكن لدينا شبكة بتري المعرفة (N,M_0) نقول عن الشبكة أنها **شبه حية Quasi-live إذا وفقط إذا** تحقق $\forall t \in T$ يوجد على الأقل علامة $M \in R(N,M_0)$ يمكن قدح t عندها $M[t>$.

❖ بمجرد أن يفقد السايفون جميع رموزه فإنه يبقى بدون رموز تحت أي علامة لاحقة يمكن الوصول إليها من العلامة الحالية. وبما أن السايفون S فارغ من ثم لا يوجد أي انتقال $S^\bullet$ يمكن قدحه، ومن ثم فإن هذه الانتقالات أُقفلت، هذا يشير إلى أن الشبكة الحاوية على هذه الانتقالات ليست على قيد الحياة، ومن ثم إن خلو شبكة بتري من الإقفال الميت، وحيوية الشبكة يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالسايفونات الموجودة بها.[20]

❖ نقول عن شبكة بتري العادية أنها **خالية من الإقفال الميت** لطالما أن السايفونات الأصغرية فيها ليست خالية.

إذا كانت شبكة بتري العادية في حالة إقفال ميت عندها تشكل الأماكن التي تحوي على رموز فارغة سايفون، يوضح الشكل (2-2)A مثال على شبكة بتري وفق العلامة الابتدائية.

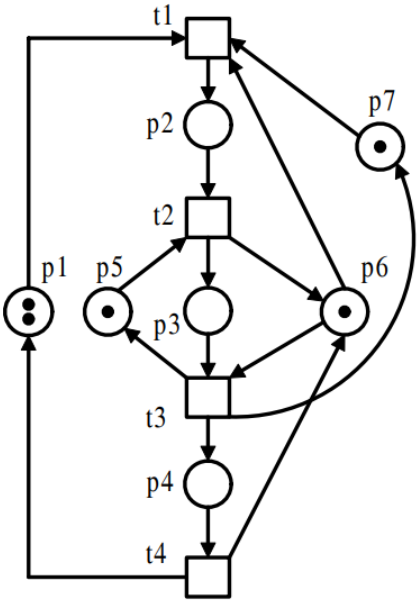


الشكل(2- 2) مثال يوضح الإقفال الميت في شبكات بتري

عند تطبيق شعاع الانتقالات σ=t1t2t1 نحصل على العلامة المبينة وفق الشكل (2-2) B إذ نلحظ أن الشبكة في حالة إقفال ميت.

الخلاصة: إن شبكة بتري العادية التي تعاني من الإقفال الميت تحوي على الأقل على سايفون فارغ واحد.

وكما أنه أي سايفون يحتوي على مصيدة لا يمكن إفراغه، أي يتم التحكم فيه، وإذا تم التحكم في السايفون ضمن شبكة بتري لن يؤدي ذلك إلى حالة الإقفال ميت، فبالنسبة للسايفون الذي يمكن إفراغه في الشبكة، يمكن إضافة بعض آليات التحكم الخارجية، على سبيل المثال إضافة المكان p7 في المثال السابق، كما يوضح الشكل(2-3) إذ نطلق على هذه العقدة **بالمراقب**، إذ بإضافة العقدة p7 أصبحت المجموعة سايفون ومصيدة بنفس الوقت ونتيجة لذلك لا يمكن إفراغ السايفون والشبكة خالية من الإقفال الميت.



الشكل(2- 3) معالجة الإقفال الميت ضمن شبكة بتري.

إذ يُركّز على التحكم بالسايفون الأصغري لأن قابلية التحكم فيه تعني ضمناً التحكم بالسايفون الحاوي له، وتكمن المشكلة في تحديد السايفون الأصغر في الشبكة. [21]

❖ ليكن لدينا S سايفون في شبكة بتري العادية (N,M_0) فإنه يتم التحكم الثابت بهذا السايفون من قبل I انطلاقاً من علامة الأولية M_0، وعندها لن تكون فارغة إذا وفقط إذا تحقق ما يلي:

$$I^T M_0 > 0$$

$$\forall p \epsilon P \backslash S, I(P) \leq 0$$

والتي تكافئ: $I^T M_0 > 0 \, , \|I\|^+ \subseteq S$

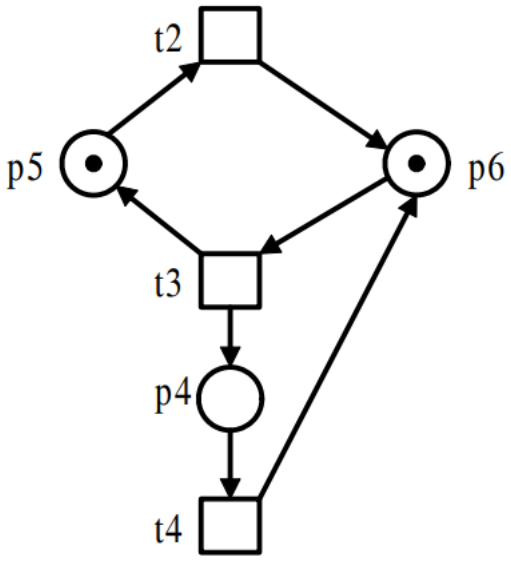
مثال: في الشكل السابق لدينا ثوابت P وهي:

$$I1 = P3 + P5,\ I2 = P2 + P4 + P6, I3 = P2 + P3 + P7$$

وأيضاً لدينا $I = I1 + I2 - I3 = P4 + P5 + P6 - P7$ هو ثابت P، ونلاحظ أن السايفون S4={P4,P5,P6} متحكم به من قبل الثابت I حيث أن $\|I\|^+ = \{P4, P5, P6\} = S4$

كما أن $I^T M_0 = \mathrm{M_0(P4)} + \mathrm{M_0(P5)} + \mathrm{M_0(P6)} - \mathrm{M_0(P7)} = 2 - 1 = 1 > 0$

إمكانية التحكم في S4={P4,P5,P6} يؤدي إلى التحكم في السايفون S = {p1, p4, p5, p6}، ونلحظ أن S4• = {t2,t3,t4} من ثم فإنَّ المجموعة الجزئية الناتجة عن S4• ∪ S4 متصلة بقوة، كما يوضح الشكل (2−4).



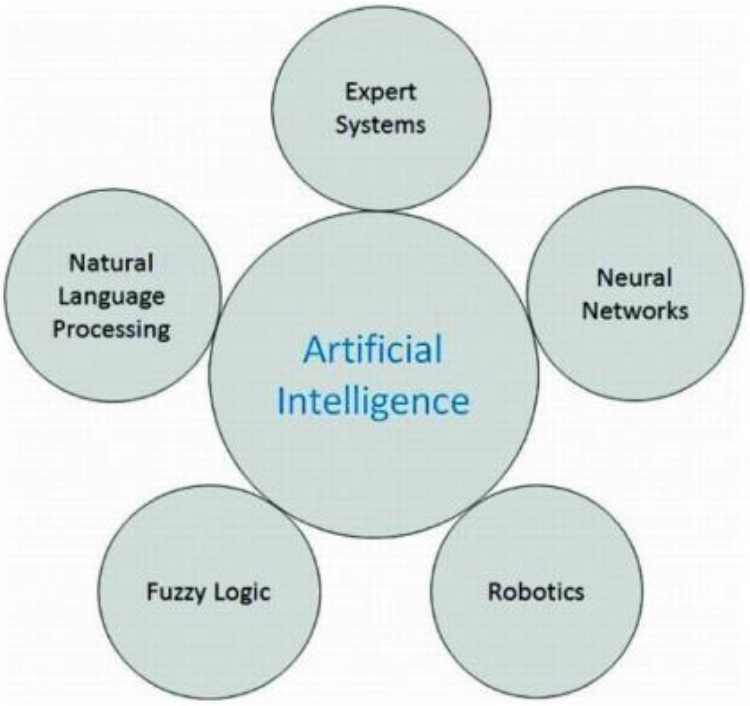
الشكل(2− 4) العقد المتصلة بقوى

الفصل الثالث

الذكاء الصنعي

3-1 ما المقصود بالذكاء الصنعي:

يشير الذكاء الصنعي **Artificial intelligence** (AI) إلى مجال واسع من العلوم الشكل(3-1)، وينطوي على تطوير أنظمة الحاسوب القادرة على أداء المهام التي تتطلب عادةً ذكاءً بشرياً، مثل الإدراك البصري والتعرف على الكلام واتخاذ القرار، والترجمة بين اللغات وغيرها. إن السمة المثالية للذكاء الصنعي هي قدرته على اتخاذ الإجراءات التي لديها أفضل فرصة لتحقيق هدف معين، هناك العديد من وجهات النظر حول الذكاء الصنعي وعدد من التعريفات ولا يوجد تعريف واحد متفق عليه عالمياً، منها " الذكاء الصنعي هو نظام محوسب يعرض سلوكاً يُعتقد عموماً أنه يتطلب الذكاء".[22]



الشكل(3- 1)) الذكاء الصنعي وتنوع تقنياته[1]

أن الذكاء الصنعي هو فرع في علوم الحاسب الذي يهتم بأتمتة السلوك الذكي، وهو قدرة الحاسب على أداء بعض الأعمال التي تقترن غالباً بالفهم البشري مثل القدرات الإنسانية على التعلم واتخاذ القرار.

[1] Gurumoorthy, S., et al. (2020).

يعرّف في معجم المعاني الجامع بأنه " قدرة آلة أو جهاز ما على أداء بعض الأنشطة التي تحتاج إلى ذكاء مثل الاستدلال الفعلي والإصلاح الذاتي".

كما عرف العالم جون مكارثي John McCarthy عالم 1956 الذكاء الصنعي بأنه "علم وهندسة صنع الآلات الذكية، وخاصة برامج الحاسب الذكية، وهو مرتبط بمهمة استخدام أجهزة الحاسب لفهم الذكاء البشري، إلا أنّه لا يقتصر على الأساليب التي يمكن ملاحظتها من الناحية البيولوجية" [23]

يشير مفهوم الذكاء الصنعي إلى القدرة على التخطيط والتفكير والتعلم والاستشعار وبناء نوع من إدراك المعرفة والتواصل بلغة طبيعية. ومن أشهر تقنيات الذكاء الصنعي [24]:

- **الطرق الاستدلالية Heuristics**: إنها واحدة من خوارزميات البحث الأكثر استخداما في الذكاء الصنعي. تُطبّق لحل المشاكل بصورة أسرع من الأساليب الكلاسيكية أو لإيجاد حلول لا يمكن للطرق الكلاسيكية حلها، ويستخدم الاستدلال عندما يكون من غير العملي حل مشكلة معينة باستخدام خوارزمية خطوة بخطوة. هذه التقنية هي واحدة من أبسط التقنيات المستخدمة للذكاء الصنعي وتستند إلى مبدأ التجربة والخطأ (تعلم من الأخطاء)، والاستدلال واحد من أفضل الخيارات لحل المشاكل الصعبة. على سبيل المثال: لمعرفة أقصر طريق إلى وجهة فإن أفضل طريقة هي تحديد جميع المسارات الممكنة ثم أقصرها.
- **الآلة متجهة الدعم Support Vector Machines**: هي خوارزمية تعلم آلي خاضعة للإشراف تستخدم لحل مشكلات التنبؤ أو مشكلات التصنيف. ومع ذلك، يُستخدم للتصنيف في معظم الحالات، على سبيل المثال، تستخدم أنظمة البريد الإلكتروني الآلة متجهة الدعم لتصنيف البريد الإلكتروني مثل **Social** أو **Promotion** أو غير ذلك. ويصنف كل بريد حسب فئاته.

تستخدم هذه التقنية على نطاق واسع لأنظمة التعرف على الوجوه، التعرف على النص والتعرف على الصور.

- **الشبكات العصبونية Artificial Neural Network:** توجد الشبكات العصبونية عادةً في أدمغة الكائنات الحية. وهي الدارات العصبية التي تساعد الكائنات الحية على نقل المعلومات ومعالجتها، وتحقيقاً لهذه الغاية هناك مليارات من الخلايا العصبية التي تساعد على إنشاء أنظمة عصبية لاتخاذ قرارات يومية وتعلم أشياء جديدة. ألهمت هذه الشبكات العصبونية الطبيعية تصميم شبكة عصبونية الصنعية.

تتكون الشبكات العصبونية الاصطناعية من العقد. وتستخدم لتحديد أنماط البيانات والتعلم منها. تحقيقاً لهذه الغاية تُستخدم أساليب تعلم مختلفة، كالتعلم الخاضع للإشراف **Supervised Learning** والتعلم غير الخاضع للإشراف **Unsupervised Learning** والتعلم المعزز**reinforced Learning.** لكن ومن وجهة نظر التطبيق تُستخدم في تعلم الآلة والتعلم العميق **Deep Learning** والتعرف على النماذج **Pattern Recognition.**

- **اجرائية قرار ماركوف (MDP) Markov Decision Process :** هي إطار عمل لنمذجة اتخاذ القرار، إذ تكون النتيجة في بعض الحالات عشوائية جزئياً وتعتمد جزئياً على المدخلات من صانع القرار. وتُستخدَم MDP في التخطيط الأمثل أيضاً. إنّ الهدف الأساسي لتقنية MDP هو إيجاد سياسة لصانع القرار تشير إلى الإجراء المحدد الذي يجب اتخاذه ضمن أي حالة ممكنة.
- **المنطق العائم (FL) Fuzzy logic:** هو طريقة تفكير تشبه المنطق البشري، ويحاكي طريقة صنع القرار في البشر التي تشتمل على الاحتمالات الوسيطة جميعها بين القيم الرقمية (نعم) و (لا) باستخدام قواعد عائمة وتوابع تحكيم واستدلال رياضي.

3-2 المكونات الرئيسية لتطبيقات الذكاء الصنعي:

تشمل تطبيقات الذكاء الصنعي عموماً استخدام البيانات والخوارزميات والتفاعل البشري، إذ إنّ ضمان هيكلة كل من هذه المكونات بصورة مناسبة والتحقق من صحتها أمر مهم لتطوير وتنفيذ تطبيقات الذكاء الصنعي، وفيما يلي يسلط الضوء على كيفية تأثير كل من هذه المكونات على تطوير تطبيقات الذكاء الصنعي:

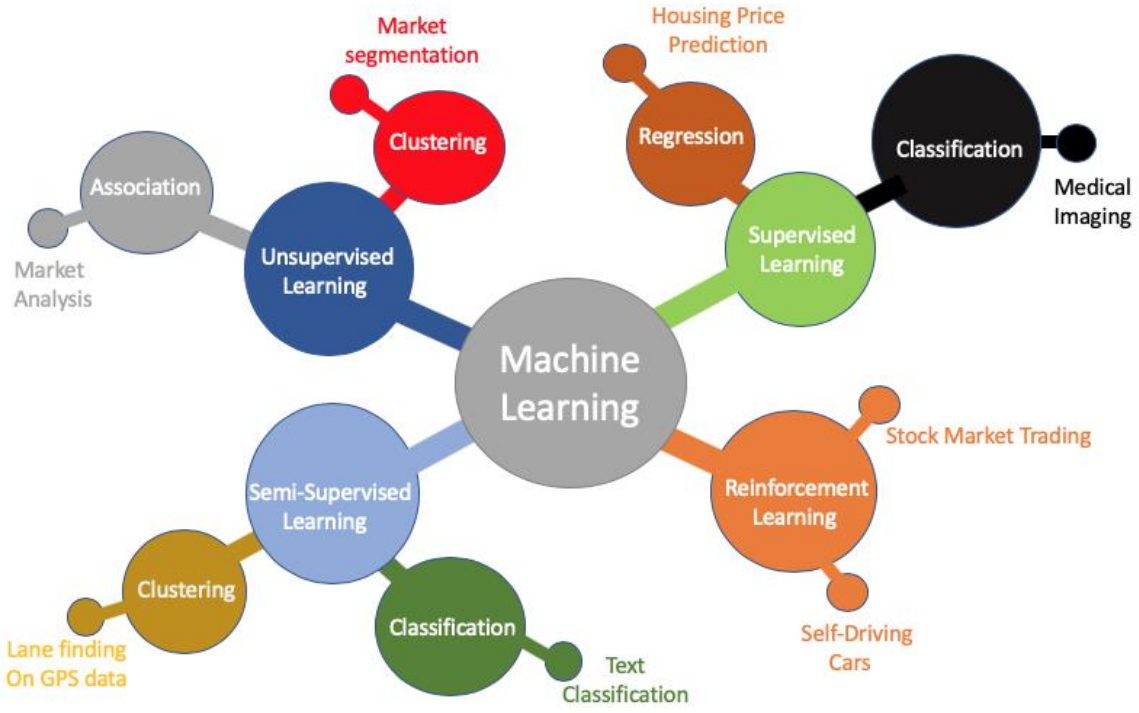
البيانات: تلعب البيانات دوراً مهماً في تدريب ونجاح أي تطبيق للذكاء الصنعي، إذ تُصمّم تطبيقات الذكاء عموماً لتحليل البيانات من خلال تحديد الأنماط وتحديد الأصناف أو التنبؤات بناءً على تلك الأنماط، وتتعلم التطبيقات تعلماً مستمراً ومتكرراً من أي قرارات غير دقيقة تتخذها، والتي تُحدّد عادةً بالمراجعات البشرية وكذلك من المعلومات الجديدة، وتُقيم النواتج وفقاً لذلك. عموماً تحقق تطبيقات الذكاء الصنعي نتائج ذات مغزى عندما تكون مجموعات البيانات الأساسية كبيرة وصحيحة.

الخوارزميات: الخوارزمية عبارة عن تسلسل من الخطوات تشمل التعليمات المعرفة جيداً خطوة بخطوة لحل مشكلة معينة وتوليد مخرج باستخدام مجموعة من بيانات الإدخال، وتشمل خوارزميات الذكاء الصنعي رمزاً رياضياً معقداً مصمماً لتمكين الآلات من التعلم باستمرار من بيانات الإدخال الجديدة وتطوير الخرج.

التفاعل البشري: المشاركة البشرية ضرورية خلال دورة حياة أي تطبيق للذكاء الصنعي، من إعداد البيانات والخوارزميات إلى اختبار المخرجات، وإعادة تدريب النموذج، والتحقق من النتائج.

3-3 تعلم الآلة:

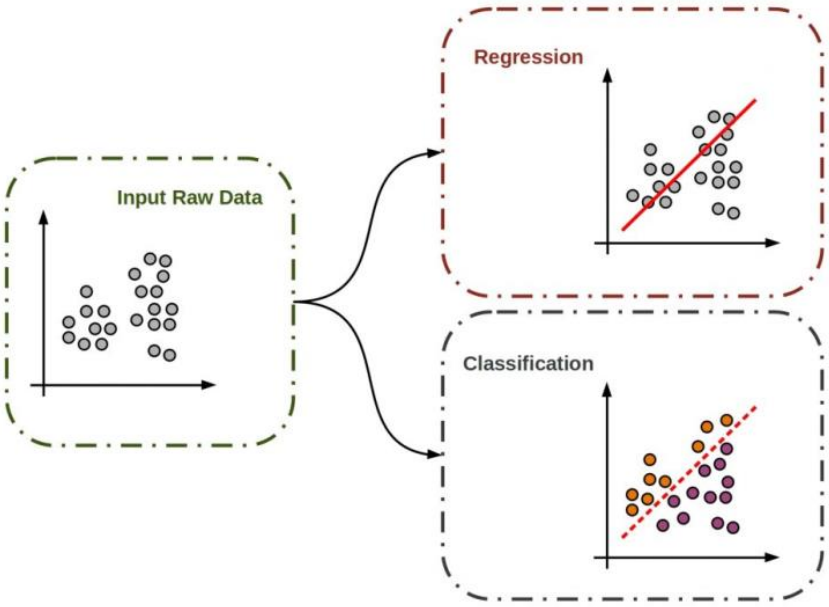
تعلم الآلة هو مجال من مجالات علوم الحاسب يستخدم الخوارزميات لمعالجة كميات كبيرة من البيانات والتعلم منها، على عكس البرمجة التقليدية القائمة على القواعد، تتعلم ML من بيانات الإدخال لعمل تنبؤات أو تحديد أنماط ذات مغزى دون أن يتم برمجتها صراحة للقيام بذلك، هناك أنواع مختلفة من نماذج ML عند تصنيفها وفق الوظيفة والبنية. يوضح الشكل(3-2) الأنواع المختلفة لنماذج تعلم الآلة.



الشكل(3- 2) أنواع النماذج المختلفة لتعلم الآلة

3-3-1 تعلم الآلة الخاضع للإشراف Supervised Machine Learning:

تقنية تتكون من توفر البيانات الموسومة لنموذج التعلم الآلي، وفيها تتعلم الآلة تعلماً متكرراً العلاقة بين البيانات، وتحدد الناتج الذي يجب تعلمه مسبقاً ويتم الإشراف على عملية التعلم بمطابقة التنبؤات، اعتماداً على حالة الاستخدام، تُستخدم إما نماذج التصنيف أو التوقع ويوضح الشكل(3-3) ذلك.

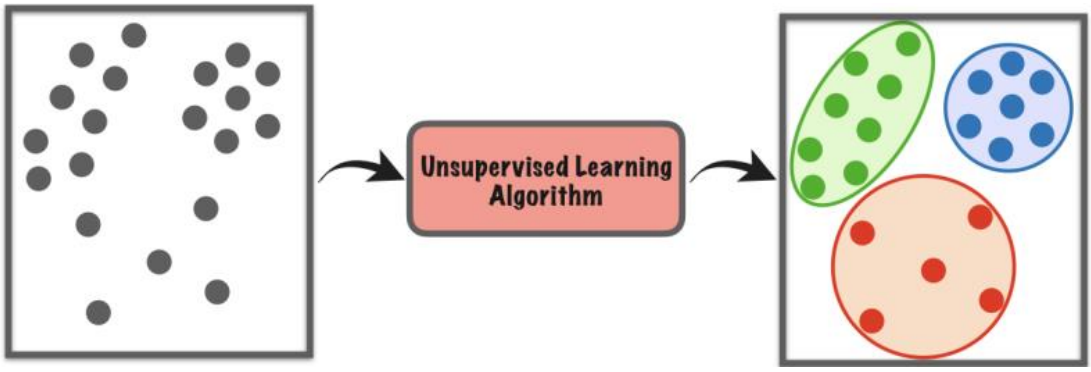


الشكل(3- 3) تصنيف البيانات في تعلم الآلة الخاضع للإشراف

- **التصنيف:** تُشكّل فئات مجردة من أجل تعيين وطلب البيانات بطريقة ذات مغزى لهذا الغرض يتم الحصول على الأشياء على أساس بعض الخصائص المتشابهة ويتم تنظيمها بين بعضها البعض. يمكننا اعتبار النموذج مثالياً إذا وصلت النتائج إلى مستوى معين من التنبؤ الصحيح. ويعتمد المستوى عادة على حالة الاستخدام. على سبيل المثال، يعد نموذج التخلص من الرسائل غير المرغوب فيها أقل أهمية من نموذج يشغل مركبة آلية. نحسب دقة النموذج باستخدام دالة الخسارة.
- **الانحدار:** يمكن استخدام خوارزميات الانحدار الخاضعة للإشراف لعمل تنبؤات واستنتاج العلاقات السببية بين المتغيرات المستقلة والمرتبطة. على سبيل المثال، لنفترض أن لدينا أعمار الناس وأطوالهم باستخدام هذه البيانات سنكون قادرين على بناء نموذج يتنبأ بما هو على الأرجح طول شخص ما بناءً على عمره.

3-3-2 تعلم الآلة غير الخاضع للإشراف Unsupervised Machine Learning:

لا تُصنّف بيانات الإدخال ولا يتم تحديد الخرج، بدلاً من ذلك، يتم تغذية النماذج بكميات كبيرة من البيانات الأولية إذ يتم تصميم الخوارزميات لتحديد الأنماط الأساسية ذات المغزى، قد تجمع الخوارزميات بيانات مماثلة ولكنها تفعل ذلك دون أي فكرة مسبقة عن الخرج، على سبيل المثال، يمكن إدخال سلسلة زمنية من الأحداث التجارية في نموذج غير خاضع للإشراف، مع تحديد النموذج لمجموعات من المهن المماثلة، ثم تُفسّر نتائج نماذج تعلم الآلة غير الخاضعة للإشراف من قبل البشر لتحديد ما إذا كانت ذات مغزى وذات صلة. يوضح الشكل(3-4) مفهوم التعلم غير الخاضع للإشراف.

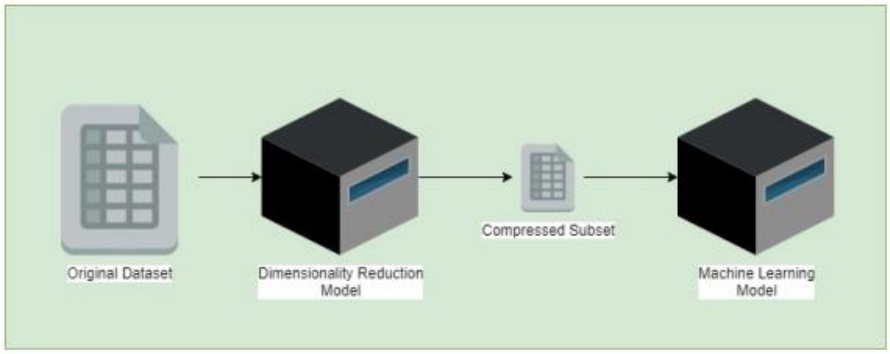


الشكل(3- 4) تصنيف البيانات في التعلم الآلي غير الخاضع للإشراف

3-3-3 تقليص الأبعاد Dimensionality Reduction:

الهدف من هذه التقنية هو اكتشاف الارتباطات بين الأبعاد المختلفة، بعبارة أخرى سيساعدنا في العثور على التكرار في سمات مجموعة البيانات وتقليلها، مثال يمكننا التفكير في ميزتين تعطيان المعلومات نفسها في أشكال مختلفة، نتيجة لذلك ستحتفظ الخوارزمية بواحد فقط من هذه الأعمدة في المجموعة الفرعية المضغوطة، بعد ذلك، سنحتفظ فقط بالحد الأدنى من الأبعاد الضرورية اللازمة دون فقدان أي

معلومات في النهاية تساعد هذه التقنية في الحصول على مجموعة بيانات أفضل. يوضح الشكل(3-5) تقنية الحد من الأبعاد.



الشكل(3- 5) تقنية الحد من الأبعاد

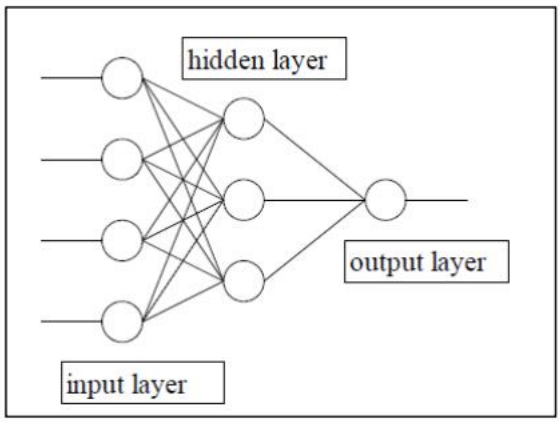
3-3-4 تعزيز البيانات Data Augmentation:

زيادة البيانات هي تقنية يمكن استخدامها لتوسيع حجم مجموعة التدريب بصورة مصطنعة عن طريق إنشاء بيانات معدلة من المجموعة الحالية، إذ إنّ من الممارسات الجيدة استخدام DA إذا كان الهدف هو منع الإفراط في الضبط **(Over fitting)**، أو إذا كانت مجموعة البيانات الأولية صغيرة جداً بحيث لا يمكن التدرب عليها، أو للحصول على أداء أفضل من النموذج الخاص بك، إذ يعد وجود مجموعة بيانات كبيرة أمراً بالغ الأهمية، يمكننا تحسين أداء النموذج بزيادة البيانات التي لدينا بالفعل.

هذا يعني أن تعزيز البيانات جيد أيضاً لتعزيز أداء النموذج. عموماً، يُستخدم DA استخداماً متكرراً إذ يمكن زيادة بيانات صوتية، نصية، وصور. يمكننا تطبيق تغييرات مختلفة على البيانات الأولية، على سبيل المثال، للصور يمكننا استخدام: التحولات الهندسية، بحيث يمكن قلب الصور أو قصها أو تدويرها، تحولات الفضاء اللوني أي تغيير قنوات ألوان RGB، تكثيف أي لون وما إلى ذلك.

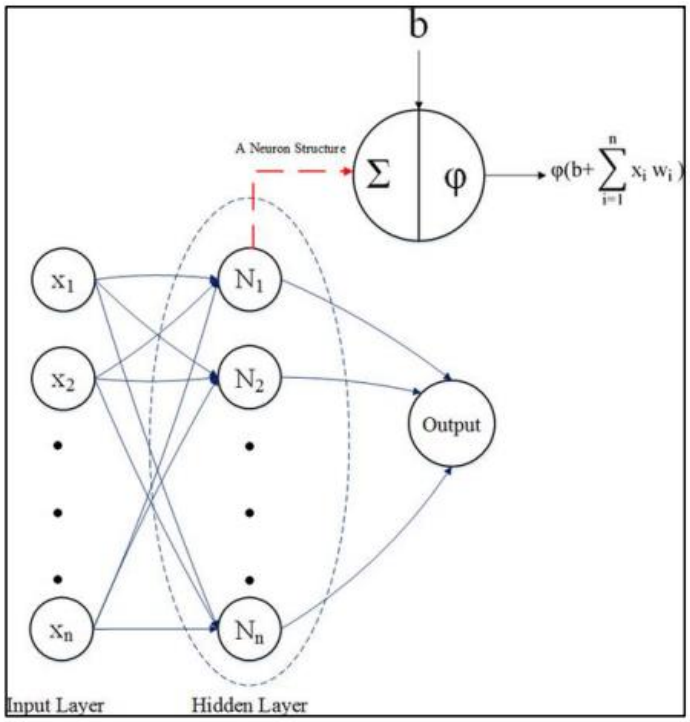
3-3-5 الشبكات العصبونية Artificial Neural Network:

الشبكات العصبونية (ANN) هي نموذج حسابي غير خطي يعتمد على الهيكل العصبي للدماغ قادر على أداء مهمّات مثل التصنيف والتنبؤ وصنع القرار والتصوير وغيرها بالنظر في الأمثلة. وتتكون الشبكة العصبونية من الخلايا العصبية أو عناصر المعالجة وهي منظمة في ثلاث طبقات مترابطة: طبقة الدخل والطبقة الخفية وقد تكون متعددة الطبقات وطبقة الخرج الشكل(3-6):



الشكل(3- 6) البنية العامة للشبكات العصبونية

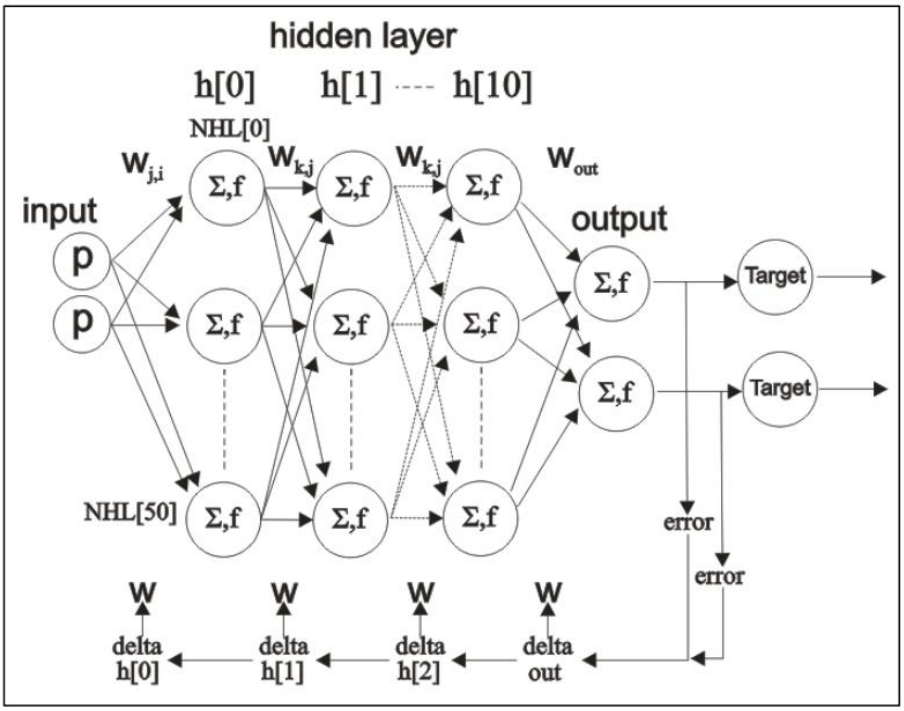
تحتوي طبقة الدخل على الخلايا العصبية المدخلة التي ترسل معلومات إلى الطبقة الخفية. ثمَّ ترسل الطبقة الخفية البيانات إلى طبقة الخرج. ويكون لكل خلية عصبية مداخل موزونة **weight** (نقاط التشابك العصبي **Synapses**)، تابع تفعيل **activation function** الذي يحدد خرج الخلية وفق مداخلها، وخرج واحد الشكل(3-7). المشابك **synapses** هي البارامترات القابلة للتعديل التي تحول الشبكة العصبونية إلى نظام ذي معاملات.[25]



الشكل(3- 7) آلية العمل داخل الشبكات العصبونية [2]

يشكل مجموع أوزان اللمدخلات إشارة التفعيل التي يتم تمريرها إلى تابع التفعيل للحصول على خرج الخلية العصبية. وتوابع التفعيل شائعة الاستخدام هي تابع : **linear ,step ,sigmoid ,tanh ,rectified relu(linear unit)**. وتسمى عملية تطبيق دخل ما وحساب الخرج الموافق بعملية الانتشار الأمامي **FeedForward Propagation**. والتدريب **Training** هو عملية تحسين الأوزان إذ يتم تقليل خطأ التنبؤات إلى الحد الأدنى لتصل الشبكة إلى مستوى محدد من الدقة. الطريقة المستخدمة في الغالب لتحديد الخطأ المرتكب في كل خلية عصبية تسمى الانتشار الخلفي **BackPropagation** الذي يحسب تدرج دالة الفقد أو الأداء. من الممكن جعل النظام أكثر مرونة وأكثر قوة باستخدام طبقات مخفية إضافية، الشكل(3-8). وتُسمَّى الشبكات العصبونية ذات الطبقات المخفية المتعددة بين طبقات الدخل والخرج بالشبكات العصبونية العميقة **Deep Neural Network** (DNNs)، ويمكنها نمذجة العلاقات المعقدة غير الخطية. [25]

[2] Bamorovat, M., et al. (2021)



الشكل(3- 8) الشبكة العصبونية متعددة الطبقات[3]

وبالمتابعة نحو طبقة الخرج بالطريقة نفسها سنحصل على خرج ما، نقيس مدى جودة هذا الخرج $\hat{y}$ بتابع التكلفة C والنتيجة المرغوبة في الخرج y حيث يقوم تابع التكلفة بحساب الفرق أو الخطأ بين الخرج المرغوب فيه والخرج الفعلي ويتم القيام بذلك من أجل كل دخل. ويُطلق على هذا الخطأ عادةً الخطأ التربيعي المتوسط **Mean Squared Error** (MSE) ويعطى بالمعادلة التالية:

$$C = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \qquad (3-1)$$

بالنظر إلى النتيجة الأولى نعدّل الأوزان والتحيزات حتى نتمكن من تحسين تابع التكلفة، فنحن نحاول بصورة أساسية ضبط الشبكة العصبونية بأكملها، لتحسين قيمة الخرج. بمعنى آخر، هذه هي الطريقة التي نخبر بها الخوارزمية أنها كانت ضعيفة الأداء أو جيدة. ونواصل محاولة تحسين تابع التكلفة في كل محاولة (كل مرة يُستخدم الدخل ومقارنة خرجه مع الخرج الفعلي) وتُعدّل الأوزان لتحقيق الخرج المرغوب.

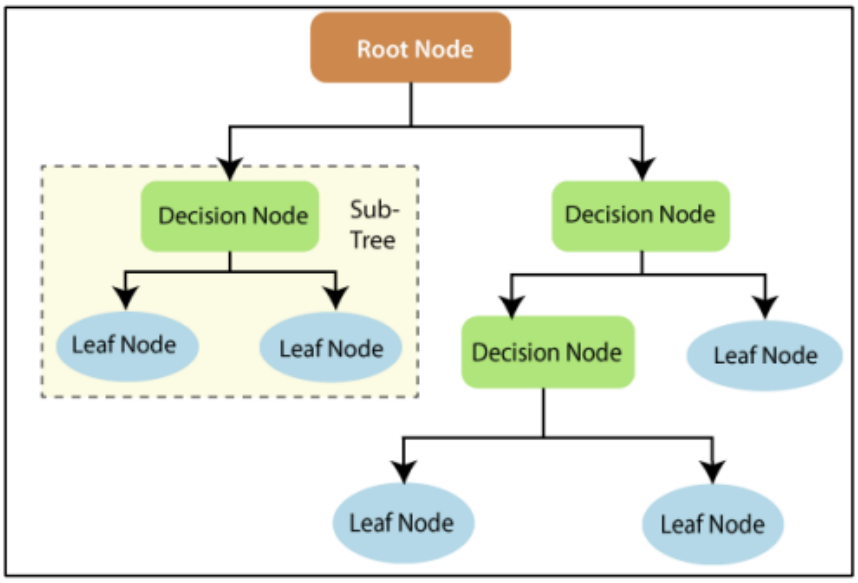
[3] Thiang, H. K., & Pangaldus, R. (2009).

3-3-6 أشجار القرار Decision Tree :

أشجار القرار (DTs) هي طريقة خاضعة للإشراف، تهدف إلى إنشاء نموذج يتنبأ بقيمة المتغير المستهدف من خلال تعلم قواعد القرار البسيطة المستنتجة من ميزات البيانات. يمكن النظر إلى الشجرة على أنها تقريب ثابت مجزأ. تؤطّر الشجرة المقلوبة المتفرعة من عقدة جذر موزعة باحتمالية متجانسة إلى عقد أوراق (نهاية تفرعات) غير متجانسة للغاية لاستنتاج الخرج. تُستمد شجرة القرار من المتغيرات المستقلة، إذ تحتوي كل عقدة على شرط يطبق على العنصر، وتقرر العقدة أي عقدة يجب الانتقال إليها بعد ذلك بناءً على الشرط. وبمجرد الوصول إلى عقدة الورقة(النهاية) يتم توقع الخرج. إنّ التسلسل الصحيح للشروط يجعل الشجرة فعالة. ويُستخدم **Entropy** معياراً لتحديد الشروط في العقد. وتُستخدم خوارزمية متكررة قائمة على قيمة الربح **gain** لكل مسار لاشتقاق بنية الشجرة الشكل(3-9)، كلما كانت الشجرة أعمق، زاد تعقيد قواعد القرار وكان النموذج أكثر لياقة.

بعض مزايا أشجار القرار هي:

- ❖ سهلة الفهم والتفسير.
- ❖ تتطلب القليل من إعداد البيانات، في حين تتطلب التقنيات الأخرى تقييس البيانات. إلا أنها تتطلب إنشاء متغيرات وهمية والتخلص من القيم الفارغة، كونها لا تدعم القيم المفقودة.
- ❖ قادرة على التعامل مع البيانات العددية والفصلية، في حين تختص التقنيات الأخرى بتحليل مجموعات البيانات التي تحتوي على نوع واحد فقط من المتغيرات.
- ❖ قادرة على التعامل مع مشاكل النواتج المتعددة.



الشكل(3- 9) مخطط شجري يوضح عمل شجرة القرار[4]

أما عيوب أشجار القرار فهي:

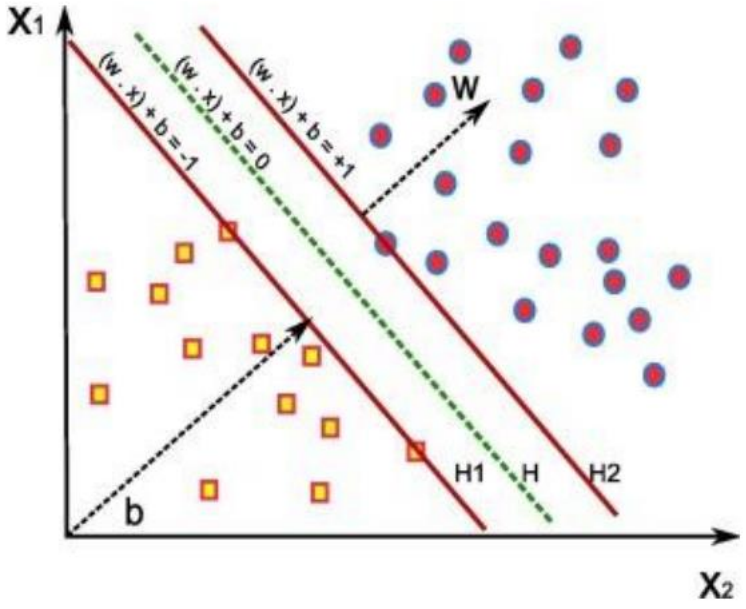
- ❖ يمكن لمتعلمي شجرة القرار إنشاء أشجار مفرطة التعقيد لا تعمم البيانات جيداً.
- ❖ يمكن أن تكون أشجار القرار غير مستقرة لأن الاختلافات الصغيرة في البيانات قد تؤدي إلى إنشاء شجرة مختلفة تماماً، يُخفّف من هذه المشكلة باستخدام أشجار القرار داخل المجموعة.
- ❖ التنبؤات من خلال أشجار القرار ليست سلسة وليست مستمرة.
- ❖ هناك مفاهيم يصعب تعلمها لأن أشجار القرار لا تعبر عنها بسهولة، مثل **XOR** أو التكافؤ.
- ❖ يقوم متعلمو شجرة القرار بإنشاء أشجار متحيزة، لذلك يوصى بموازنة مجموعة البيانات قبل تطبيقها على شجرة القرار.

[4] Tawade, S. (n.d.). Decision tree algorithm: By Sharad Tawade. Tealfeed. Retrieved July 22, 2022, from https://tealfeed.com/decision-tree-algorithm-k5tbl

3-3-7 الآلة متجه الدعم Support Vector Machine:[26]

هي تقنية من تقنيات ML يمكن استخدامها في كل من التصنيف والتوقع. تتكون بشكل رئيسي من نواة **Kernel**، تُنجز بحيث تحقق حلاً خطياً صغير الهامش للمشكلة. ويُستخدم SVM مع نواة عندما لا يكون الحل قابلاً للفصل خطياً. SVM هي تقنية تعلم خاضعة للإشراف تستخدم على نطاق واسع في تصنيف النصوص وتصنيف الصور وما إلى ذلك. في SVM الخطية يجب أن يكون فضاء المشكلة قابل للفصل خطياً كما هو موضح في الشكل (3-10). ويتم استنتاج منحني أو مستوي فائق من قبل النموذج، ما يزيد من هامش التصنيف. سيكون منحني أو مستوي فائقاً بدرجة N-1 إذا كانت هناك N سمة موجودة. واستناداً إلى موضعها النسبي، يُستنتج الهامش الأقصى ويتم رسم أو تعيين منحني أو مستوي فائق مثالي في نقطة المنتصف. تتناسب قيمة الهامش m عكساً مع $||w||$، حيث w هي مجموعة مصفوفات الوزن. لزيادة الهوامش إلى أقصى حد، يجب تقليل $||w||$ ستكون معادلة التحسين على الشكل:

$$Minimize\ \frac{\|\vec{w}\|^2}{2}\ where\ y_i(\vec{w}.\vec{x}+b) \geq 1\ for\ any\ i = 1,2,\ldots..n \qquad (3-2)$$

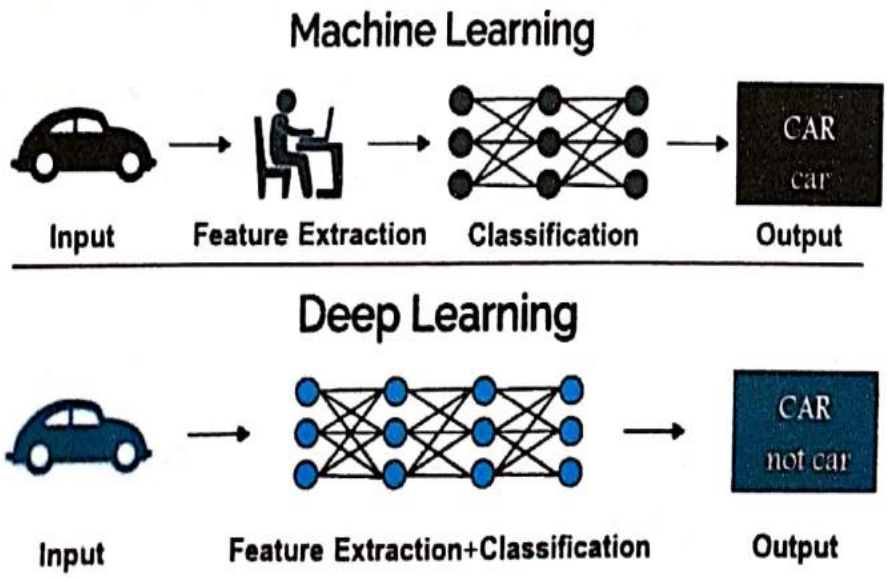


الشكل(3- 10) نموذج آلة متجه الدعم الخطي

3-4 التعلم العميق Deep Learning:

هو مجال فرعي من تعلم الآلة يطبق على مجموعة كبيرة من البيانات. يعتمد التعلم العميق على فهم العالم من البنية الهرمية للمعرفة من ثم يستطيع الحاسب أن يتعلم مفاهيم معقدة ببنائها من مفاهيم أبسط ويكون مخطط المفاهيم الهرمي على شكل طبقات كلما ازداد عددها يكون التعلم أكثر عمقاً، ويتم تعلم التمثيل الطبقي للتعلم العميق غالباً بنماذج الشبكة العصبونية الممثلة بنيوياً كطبقات متكدسة فوق بعضها البعض، ومن خوارزميات التعلم العميق الشبكات العصبونية العودية RNN ، والشبكات الطَّيّ العصبونية CNN.[27]

تتميز خوارزميات التعلم العميق عن خوارزميات تعلم الآلة بقدرتها على استخلاص السمات آلياً من البيانات إضافةً لمهام التصنيف والتجميع والتعرف والتنبؤ. يوضح الشكل (3-11) اختلاف التعلم العميق عن تعلم الآلة. [28]



الشكل(3- 11) اختلاف التعلم العميق عن تعلم الآلة

تعتمد معظم نماذج التعلم العميق الحديثة على الشبكات العصبونية. في التعلم العميق يتعلم كل مستوى تحويل بيانات الدخل إلى تمثيل مجرد ومركب أكثر، ففي تطبيق التعرف على الصورة قد يكون المدخل الخام مصفوفة من البيكسل؛ قد تقوم الطبقة التمثيلية الأولى بتجريد البكسلات وترميز الحواف، ويمكن للطبقة الثانية أن تشكل وترمز ترتيبات الحواف، والطبقة الثالثة قد تشفر الأنف والعينين، والطبقة الرابعة قد تدرك أن الصورة تحتوي على وجه. الأهم من ذلك، يمكن لعملية التعلم العميق معرفة الميزات التي يمكن وضعها بصورة مثالية في أي مستوى بمفردها.

3-4-1 الشبكات العصبونية العميقة Deep Neural Networks:

هي شبكة عصبونية لها طبقات متعددة بين طبقات الإدخال والإخراج، تتدفق البيانات من طبقة المدخلات إلى طبقة الخرج، في البداية يقوم DNN بإنشاء خريطة للخلايا العصبية الافتراضية ويعين القيم العددية العشوائية أو الأوزان للاتصالات بينها، يُضرب الأوزان والمدخلات ويرجع الناتج بين 0 و1، إذا لم تتعرف الشبكة بدقة على نمط معين، فإن الخوارزمية ستضبط الأوزان. بهذه الطريقة يمكن للخوارزمية أن تجعل بعض المعاملات أكثر تأثيراً، حتى تحدد المعالجة الرياضية الصحيحة لمعالجة البيانات بالكامل. تتضمن البنى العميقة العديد من الأنواع حققت كل بنية نجاحاً في مجالات محددة. ليس من الممكن دائماً مقارنة أداء البنى المتعددة، ما لم تُقيّم على مجموعات البيانات نفسها.

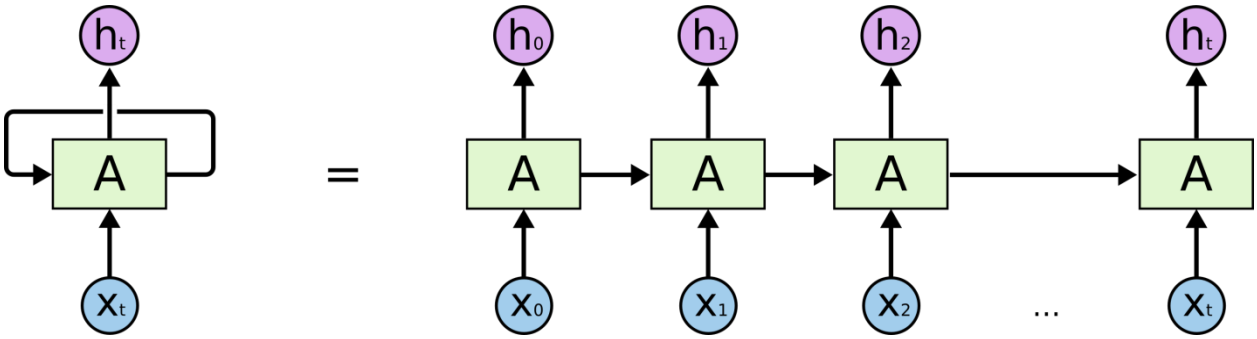
3-4-2 الشبكات العصبونية العودية Recurrent Neural Networks:

أن الشبكات العصبونية العودية هي نوع من الشبكات العصبونية المصممة لاكتشاف الأنماط في البيانات المتسلسلة، من خلال السماح للخلايا بالتعلم من الخلايا المرتبطة سابقاً، وتُستخدم الحالات الخفية كذاكرة لمعالجة تسلسل من المدخلات. اعتمدت الشبكات العصبونية العودية على العمل المقدَّم في البحث [29] عام 1986، أن القدرة على معالجة تسلسل الإدخال المخصص يجعلها قابلة للاستخدام في مهام مثل نمذجة اللغة والتعرف على الكلام وإلى ما لك. إذ يتم التعبير عن الأفكار بتسلسلات رمزية وتمثيلات

مجردة. في الشبكات العصبونية العودية دوماً لدينا تغذية خلفية من خرج الشبكة إلى دخلها بالإضافة إلى دخل مستقل، و كأنه لدينا نسخ متكررة من الشبكة و كل نسخة خرجها هي دخل للنسخة التالية. يوضح الشكل(3−12) البنية العامة للشبكة العصبونية العودية القياسية بخط تأخير زمني (**Delay Line**).

لدينا عدد من المدخلات x_t، حيث تمثل t خطوة زمنية أو تسلسل، لنفترض أن مدخلات t المختلفة مستقلة عن بعضها البعض يمكن كتابة نتائج الشبكة في كل خطوة وفق التالي:

$$h_t = f(x_t)$$



الشكل(3- 12) البنية العامة للشبكة العصبونية العودية

يمكن كتابة ناتج شبكة RNN في كل خطوة وفق التالي:

$$h_t = f(h_{t-1}, x_t)$$

إذ يمكن عدّ h_{t-1} بمثابة ملخص لجميع مدخلات الشبكة السابقة. وتحوي على ثلاث مجموعات من المعاملات :

- ❖ U يحوي الإدخال x_t إلى h_t.
- ❖ W يحوي الحالة السابقة h_{t-1} إلى الحالة الحاليةh_t.
- ❖ V يعين الحالة الداخلية المحسوبة حديثاً ل h_t إلى الناتج y .

تطبق U وW وV التحويل الخطي على المدخلات المقابلة. انطلاقاً من دالة التفعيل غير الخطية f، يمكن تحديد الحالة الداخلة ومخرجات الشبكة على النحو التالي:

$$h_t = f(h_{t-1} * W + x_t * U) \quad (3-3)$$

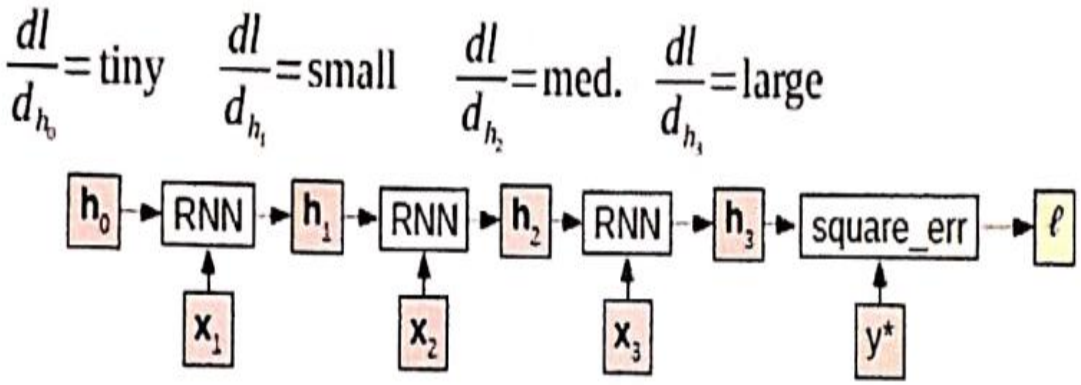
$$y_t = h_t * V \quad (3-4)$$

تمرِّر الشبكة العصبونية العودية المعلومات بين اللحظات الزمنية وتتعلم استخدام المعلومات السابقة في المهمة الحالية عن طريق إضافة $h_{t-1} * W$ التي تمرر المعلومة من الحالة الخفية h_{t-1} في اللحظة t−1 إلى الحالة الخفية h_t في اللحظة t وبدورها إلى الحالة الخفية h_{t+1} .

تتميز الشبكة العصبونية العودية بقدرتها على حل المشكلات المتعلقة بأهمية الزمن والاستفادة من الحالات السابقة، إذ لا يبدأ البشر بالتفكير في كل لحظة من البداية، فمثلاً عند قراءة مقالة ما سيتم فهم الكلمة الحالية بالاعتماد على فهم الكلمات السابقة، ويتم توقع سعر الأسهم هذه السنة من أسعار الأسهم في السنوات السابقة، كما يُصنّف أي حدث في فيديو ما في لحظة معينة بمعرفة وفهم الأحداث السابقة، كما تتميز الشبكات العصبونية العودية عن التقليدية بقدرتها على معالجة الاعتمادية **(Dependencies)** في اللغة عندما تكون المسافة بين الكلمات النسبية والكلمة في الموقع المطلوب قصيرة، وعلى الرغم من أن شبكة RNN تستطيع معالجة الاعتمادية طويلة المدى **(Long Distance Dependencies)** نظرياً، إلا أنها غير قادرة على ذلك عملياً بسبب ظهور مشكلة تناقص المشتق حتى الانعدام **(Vanishing Gradient)** [30].

يوضح الشكل (3−13) مفهوم مشكلة تناقص المشتق حتى الانعدام حيث تقوم الشبكة العصبونية العودية بتوقع تسلسل ما خلال خطوات زمنية عديدة باستخدام خوارزمية الانتشار الخلفي عبر الزمن BPTT **(BackPropagation Through Time)** المعتمدة على حساب المشتق في التعليم، وعند إنجاز التوقع سيحدث خطأ انتشار خلفي عبر كامل الخطوات الزمنية، وفي كل مرة يتم تمرير خوارزمية الانتشار الخلفي في الطور الخلفي سيتناقص المشتق، وعندما يتم العودة إلى بداية التسلسل سيكون المشتق صغيراً

لدرجة لن يكون عندها كافياً لتحديث المعاملات التي يجب تحديثها، من ثم تَكون الخلايا العصبية في الطبقات الأولى غير قادرة على التعلم.[31]



الشكل(3- 13) مشكلة تناقص المشتق

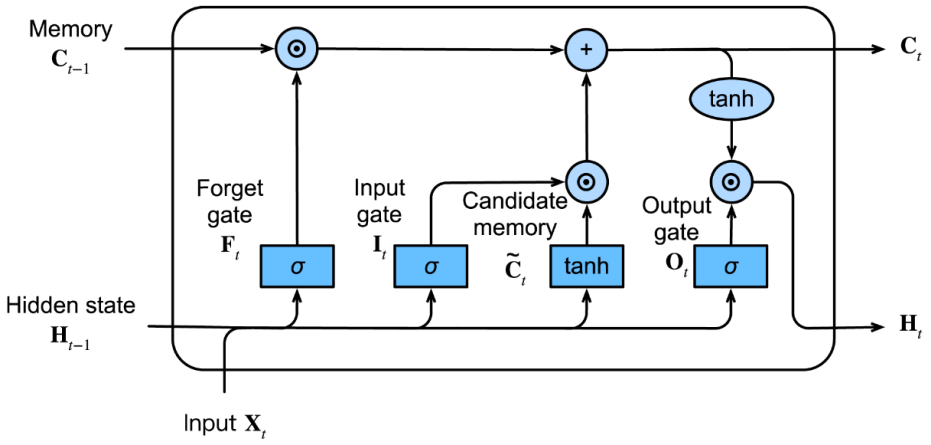
وتمّ حل هذه المشكلة باستخدام أنواع من شبكة RNN مثل الشبكة العصبونية العودية ذات الذاكرة طويلة وقصيرة المدى (LSTM) **Long Short-term Memory** والشبكة العصبونية العودية ذات البوابة (GRU) **Gated Recurrent Unit** عن طريق إضافة خلايا ذاكرة تسمى البوابات لتتحكم بكمية وتدفق المعلومات بين العصبونات الخفية.

3-4-3 الشبكة العصبونية العودية ذات الذاكرة طويلة وقصيرة المدى (LSTM):

الشبكة العصبونية العودية ذات الذاكرة طويلة وقصيرة المدى LSTM هي نوع خاص من الشبكات العصبونية العودية RNN قدمها باحثون عام 1997 في[32]. تتميز بقدرتها على حل مشكلة تناقص المشتق حتى الانعدام والاعتمادية طويلة المدى بين اللحظات الزمنية في شبكة RNN القياسية، إذ تتحكم بكمية وتدفق المعلومات بين العصبونات الخفية عن طريق البوابات.

تستطيع البوابات حفظ المعلومات عبر مراحل طويلة من الزمن، وتنظم تدفق المعلومات داخل وخارج الخلية، يكون الدخل للوحدة LSTM في كل لحظة زمنية tهو الدخل الحاليx_t، وشعاع الحالة الخفية السابقةh_{t-1}، وشعاع حالة الذاكرة السابقة c_{t-1}، ويكون الخرج هو شعاع الحالة الخفية الحالي h_t وشعاع حالة الذاكرة الحاليc_t، وتكون بنية وحدة LSTM كما يلي :[33]

- بوابة النسيان**Forget Gate (f)** : شبكة عصبونية بتابع تفعيل **sigmoid**.
- بوابة الدخل **Input Gate(I)**: شبكة عصبونية بتابع تفعيل **sigmoid**.
- بوابة الخرج **Output Gate(O)**: شبكة عصبونية بتابع تفعيل **sigmoid**.
- طبقة المرشح **Candidate layer($\tilde{C}$)**: شبكة عصبونية بتابع تفعيل **tanh**. يوضح الشكل(3-14) بنية ومبدأ عمل وحدة LSTM.



الشكل(3- 14) بنية خلية LSTM

تُستخدم LSTM في معالجة البيانات المتسلسلة **(Sequence Data)** التي يهمنا فيها التسلسل والترتيب التي وردت فيها البيانات والترتيب الزمني التي وردت ضمنه، مثل التعرف على الكلام الصوتي، والترجمة الآلية، الرعاية الصحية، التنبؤ بأحوال الطقس، وتطبيقات عديدة أخرى يهمنا فيها عامل الزمن والترتيب الأصلي للبيانات. وتساعد LSTM في هذا الموضوع لاحتوائها على خلية ذاكرة تستطيع بها تخزين

المعطيات المهمة التي ستؤثر لاحقاً على الخرج النهائي للنموذج المراد تدريبه. إذ يحمل كل خط في وحدة LSTM المعلومات بوصفه شعاعاً من القيم، ويمر من خرج عقدة إلى مدخل العقدة الأخرى، كما يمر خط حالة الذاكرة C على طول المراحل الزمنية ليحمل المعلومات عبره مع إمكانية التحكم بحذف أو إضافة المعلومات وحمايتها من قبل البوابات.

تقوم بوابة النسيان باتخاذ قرار لتحديد المعلومات التي سيتم حذفها من خلية الذاكرة وذلك باستخدام طبقة ذات تابع التفعيل **sigmoid** الذي يهتم بقيمة الدخل x_t، والحالة الخفية للطبقة السابقة h_{t-1} فيعطي قيمة بين 0 و 1 لكل قيمة في خلية الذاكرة c_{t-1}، إذ إنّ القيمة 1 تسمح بالمرور الكامل للمعلومات والقيمة 0 تمنع مرور المعلومات بشكل كامل كما هو موضح بالمعادلة التالية:

$$f_t = \sigma(W_f . [h_{t-1}, x_t] + b_f) \qquad (3-5)$$

تُحدّد المعلومات الجديدة التي ستُخزّن في خلية حالة الذاكرة وفق مرحلتين: المرحلة الأولى تقوم بوابة الدخل باستخدام طبقة ذات تابع تفعيل **Sigmoid** لتحديد القيم التي سيتم تحديثها، والمرحلة الثانية تتم في طبقة المرشح بتابع التفعيل **tanh** لتشكيل شعاع من القيم الجديدة $\widetilde{C_t}$ المرشحة لإضافتها إلى معلومات خلية الحالة كما هو موضح في المعادلات التالية:

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c[h_{t-1}, x_t] + b_c) \qquad (3-6)$$

$$i_t = \sigma(W_i . [h_{t-1}, x_t] + b_i) \qquad (3-7)$$

يشكل جداء حالة الذاكرة القديمة مع قيمة خرج بوابة النسيان لنسيان المعلومات التي حُدِّدت مسبقاً وإضافة القيم المرشحة للمعلومات المراد تحديثها كما هو موضح في المعادلة التالية :

$$C_t = i_t * \tilde{C}_t + f_t * C_{t-1} \qquad (3-8)$$

تُحدَّد قيم الخرج وفق خطوتين: الخطوة الأولى باستخدام بوابة الخرج ذات طبقة بتابع تفعيل **sigmoid** لاتخاذ قرار أي جزء من خلية حالة الذاكرة سيتم إخراجه كما في المعادلة، والخطوة الثانية تتم بجعل قيم حالة الذاكرة بين القيمتين -1 و 1 بتطبيق تابع **tanh**، ثم تعديل القيم الناتجة عن طريق جدائهما بخرج بوابة الخرج من ثم يتم الحصول على الجزء المحدد فقط من خلية حالة الذاكرة كما توضح المعادلات التالية:

$$o_t = \sigma(W_o . [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (3-9)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \quad (3-10)$$

المعادلة الأهم في عمل LSTM هي المعادلة (3-8) التي تضمن أن قيمة $\frac{dc_t}{dc_{t-1}}$ ستساوي القيمة 1 حيث يتم إضافة c_{t-1} إلى c_t وبذلك يمكن التأكد أن قيمة التدرج ستكون مساوية للقيمة 1، من ثم يتم التغلب على مشكلة تناقص المشتق حتى الانعدام في شبكات RNN القياسية.

تتكرر وحدات LSTM بصورة متسلسلة وبعدد الخطوات الزمنية المرتبط بطول تسلسل الدخل وتسلسل الخرج.

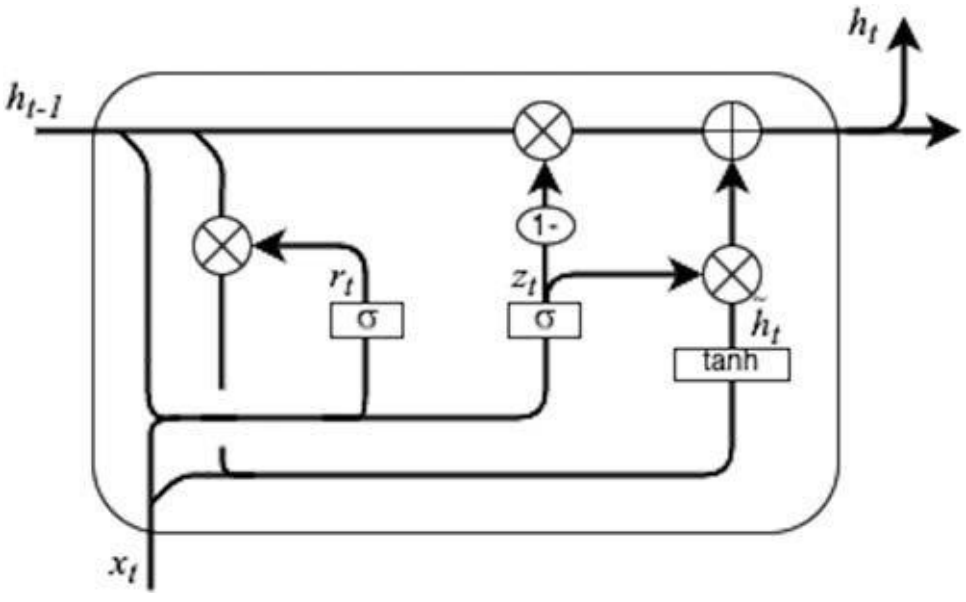
3-4-4 الشبكة العصبونية العودية ذات البوابات(GRU) :

تُعدُّ شبكة GRU نوع خاص من الشبكات العصبونية العودية RNN. اقتُرِحَت شبكة GRU في [34]عام 2014 بوصفها نسخة محسنّة عن شبكات LSTM، إذ صُمِمَت بطريقة مشابهة وأكثر بساطة من شبكة LSTM، وتعتمد على البوابات للتحكم في تدفق المعلومات عبر الحالات الخفية باتجاه اللحظة الزمنية التالية، من ثم فهي تتميز أيضاً بقدرتها على حل مشكلة تخامد المشتق والاعتمادية طويلة المدى في الدخل. الفكرة الأساسية في تصميم شبكة GRU هي عدم وجود خلية حالة ذاكرة مستقلة بل دُمجت مع

الحالة الخفية المسؤولة عن تمرير المعلومات ضمن الشبكة بين اللحظات الزمنية، ويتم دمج بوابتي النسيان والدخل في بوابة واحدة سميت بوابة التحديث **Update gate**، أي أنَّ بنية وحدة GRU تتكون مما يلي:

- بوابة التحديث **update gate(z):** تساعد النموذج في تحديد كمية المعلومات السابقة التي سيتم تمريرها للمستقبل بالحذف والإضافة.
- بوابة إعادة التعيين **Reset Gate(r):** تحدد كمية المعلومات السابقة التي سيتم نسيانها.
- شعاع الحالة الخفية H.

يوضح الشكل(3−15) بنية ومبدأ عمل وحدة GRU المستخدمة في بناء الشبكة العصبونية العودية المستخدمة في شبكات GRU.



الشكل(3- 15) بنية خلية GRU

إنَّ طريقة عمل بوابتي التحديث وإعادة التعيين متشابهة مع اختلاف الأوزان وحسب الاستخدام لخرج كل بوابة [35].

$$z_t = \sigma(W_z.[h_{t-1}, x_t] + b_z) \qquad (3\text{-}11)$$

$$r_t = \sigma(W_r.[h_{t-1}, x_t] + b_r) \qquad (3\text{-}12)$$

وتمثل $\widetilde{h_t}$ الحالة الخفية الجديدة والتي ستستخدم بوابة إعادة التعيين r_t في تخزين المعلومات ذات الصلة من الماضي:

$$\widetilde{h_t} = \tanh(W.[r_t * h_{t-1}, x_t] + b_h \qquad (3\text{-}14)$$

$$h_t = (1 - z_t) * h_{t-1} + z_t * \widetilde{h_t} \qquad (3\text{-}15)$$

المعادلة الأخيرة تبين خصوصية وحدة GRU التي تقوم بإقحام الحالة الخفية الجديدة $\widetilde{h_t}$ مع الحالة الخفية السابقة h_{t-1} تُحدّث القيم من خلال بوابة التحديث z_t بحيث إذا كانت البوابة أقرب لقيمة 1 ستستخدم GRU الحالة الجديدة $\widetilde{h_t}$ وإذا كانت قيمة بوابة التحديث قريبة من القيمة 0 ستستخدم GRU الحالة الخفية السابقة.

تميز شبكة GRU عن شبكات LSTM باختصار عدد المعاملات وتخفيض التعقيد الحسابي من ثم انخفاض زمن التدريب وبالتالي إمكانية استخدام بيانات تدريب أقل وتوفير موارد الذاكرة.

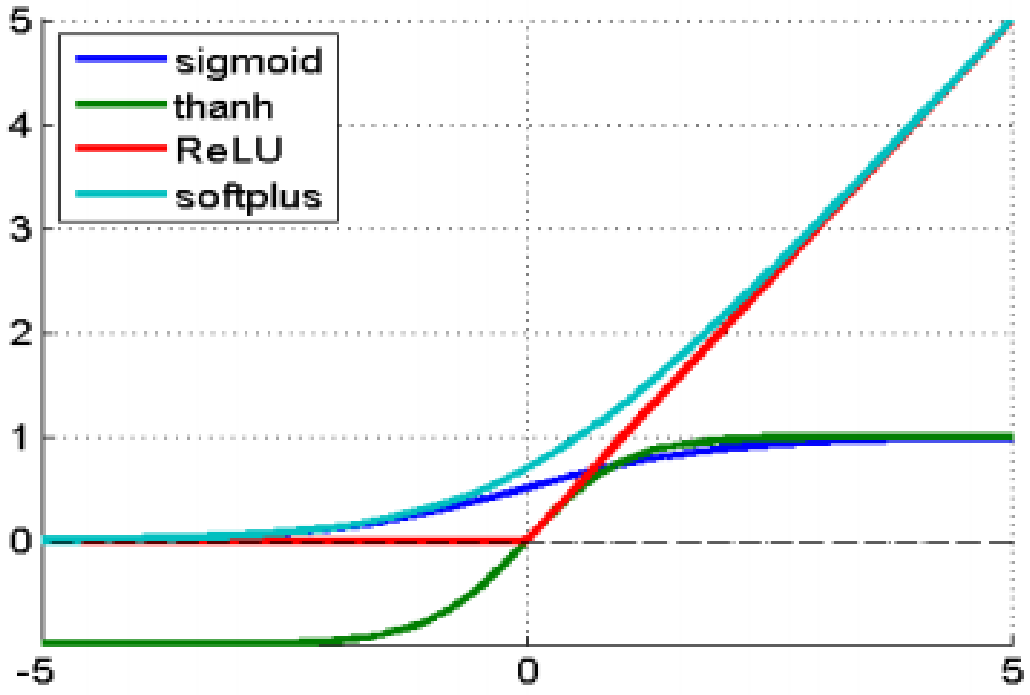
3-5 توابع التفعيل Activation Function:

يجب أن يكون تابع التفعيل قادر على التمييز، وهي ميزة مهمة للغاية، لأنها تسمح باستخدام انتشار الخطأ لتدريب الشبكة. الأنواع التالية من توابع التفعيل شائعة الاستخدام:

Sigmoid: مدخلات دالة التفعيل هذه هي أعداد حقيقية، في حين أن الخرج يقتصر على قيم بين الصفر والواحد. منحنى الدالة على شكل S.

Tanh: وهو مشابه لـ **Sigmoid** ، إذ إنّ مدخلاته هي أعداد حقيقية ولكن الخرج يقتصر على قيم بين 1- و 1.

ReLU: يحول القيم الكاملة للمدخل إلى أرقام موجبة. يوضح الشكل(3-16) الأنواع الشائعة من التوابع اللاخطية.



الشكل(3- 16) الأنواع الشائعة من التوابع اللاخطية

3-6 مقاييس الأداء:

تُحدّد دقة الخرج من خلال معامل **accuracy(AC)**، الحساسية **sensitivity(SE)**، ويتم حسابهم وفق القوانين:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \qquad (3-16)$$

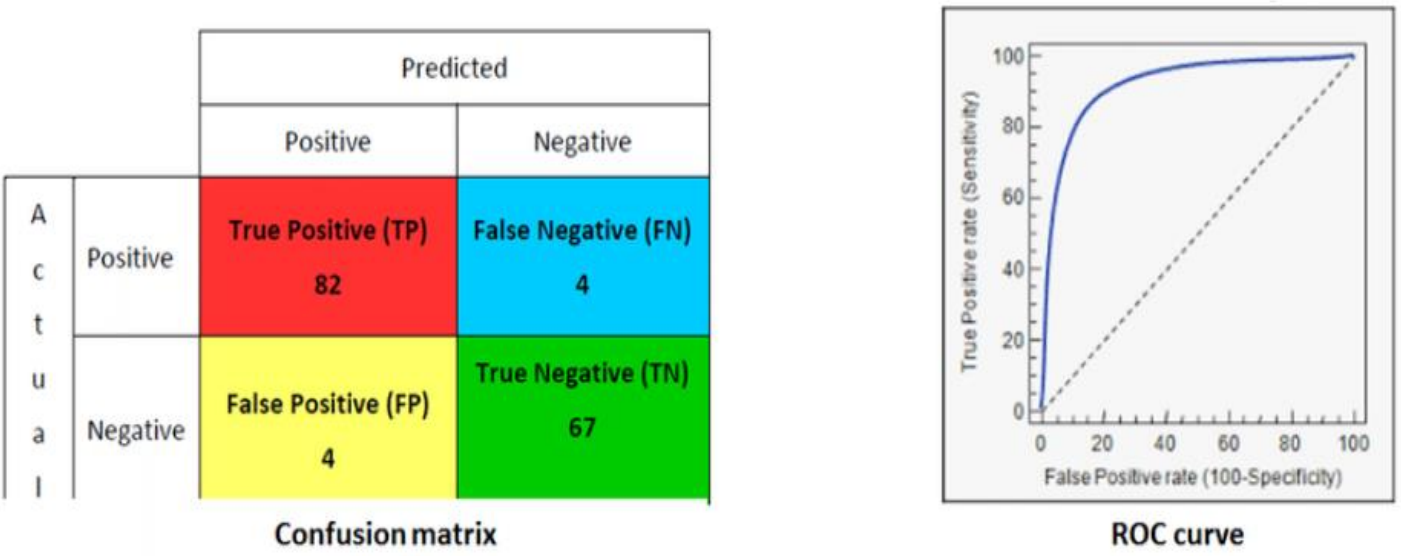
$$Sensitivity = \frac{TP}{TP+FN} \qquad (3-17)$$

حيث:

- **True Positive(TP):** عدد البيانات الإيجابية المصنفة تصنيفاً صحيحاً.
- **False Positive(FP):** عدد البيانات الإيجابية المصنفة تصنيفاً خاطئاً.
- **True Negative(TN):** عدد البيانات السالبة المصنفة تصنيفاً صحيحاً.
- **False Negative(FN):** عدد البيانات السالبة المصنفة تصنيفاً خاطئاً.

منحني خاصية مشغل المستقبل **Receiver Operator Characteristic(ROC)** هو مقياس تقييم التصنيف الثنائي. وهو منحني احتمالي يمثل **True Positive Rate(TPR)** مقابل **False Positive Rate (FPR)**. المنطقة الواقعة تحت المنحني **Area Under the Curve(AUC)** هي مقياس لقدرة المصنف على التمييز بين الفئات ويُستخدم بوصفه ملخصاً لمنحنى **ROC**. كلما ارتفعت **AUC**، كان النموذج أفضل في التمييز بين الفئات الإيجابية والسلبية.

مصفوفة الارتياب **Confusion Matrix** هي مقياس لأداء التصنيف في تعلم الآلة. وهي عبارة عن جدول يحتوي على 4 مجموعات مختلفة من القيم المتوقعة والفعلية بها يمكن قياس منحنيات Recall والدقة والحساسية والأهم من ذلك AUC–ROC كما هو موضح بالشكل (3–17).[36]



الشكل(3- 17) مصفوفة الارتياب (على اليسار)، منحني ROC (على اليمين)

الفصل الرابع

الدراسات المرجعية

تم البحث بصورة كبيرة في الإقفال الميت في أنظمة تشغيل الحاسب إذ إنها حالة غير مرغوبة في نظام تحصيص الموارد وحدوثها يؤدي إلى وقف تشغيل النظام كلياً أو جزئياً. الأمر الذي يؤدي غالباً إلى تكاليف إضافية مثل التوقف الطويل وانخفاض مدى الاستفادة من بعض الموارد، لذلك كان لابد من تطوير آلية تحكم فعالة للتأكد من عدم حدوث الإقفال الميت في هذه الأنظمة. تناولت العديد من الأبحاث السابقة والمقاربات التي تعتمد على شبكة بتري التعامل مع الإقفال الميت إما بمنع حدوث الإقفال بمنع واحدة من الشروط الضرورية له [43–40]، أو بتجنب الإقفال الميت [47–44] أو بكشف الإقفال والتعافي منه [48,49].

كما يُعدّ منع الإقفال الميت واضح المعالم في مقالات DES إذ يُحقق ذلك باستخدام آلية حسابية للتحكم في طلب الموارد لضمان عدم حدوث حالات الإقفال الميت، والهدف من مقاربة منع الإقفال الميت هو فرض قيود على النظام لمنعه من الوصول إلى حالات الإقفال. في هذه الحالة يتم اجراء الحسابات offline، وبوجود سياسة التحكم لم يعد بإمكان النظام الوصول إلى حالات الإقفال غير المرغوبة. أن الميزة الرئيسية لخوارزميات منع الإقفال الميت هو أنها لا تتطلب تكلفة خلال التشغيل إذ يتم حل المشاكل في مرحلة تصميم النظام والتخطيط، والمشكلة الرئيسية أنها سياسات صارمة للغاية ما يقلل من استخدام الموارد وانتاجية النظام.

بالعودة إلى الأبحاث التي تناولت موضوع التحكم في الإقفال الميت باستخدام شبكات بتري، يمكن تصنيف هذه الأبحاث إلى مجموعتين: **الأولى** هي الأبحاث التي تعالج الإقفال الميت بالاعتماد على الخصائص الهيكلية لشبكات بتري، أي تُعالج الإقفال الميت انطلاقاً من هيكل الشبكة والخصائص الهيكلية لها وبتحقيق شروط معينة. **والثانية** هي الأبحاث التي تعالج الإقفال الميت بالاعتماد على الخصائص السلوكية لشبكات بتري، أي يمنع النظام من الوصول إلى أحدى العلامات من خلال فرض قيود عليها.

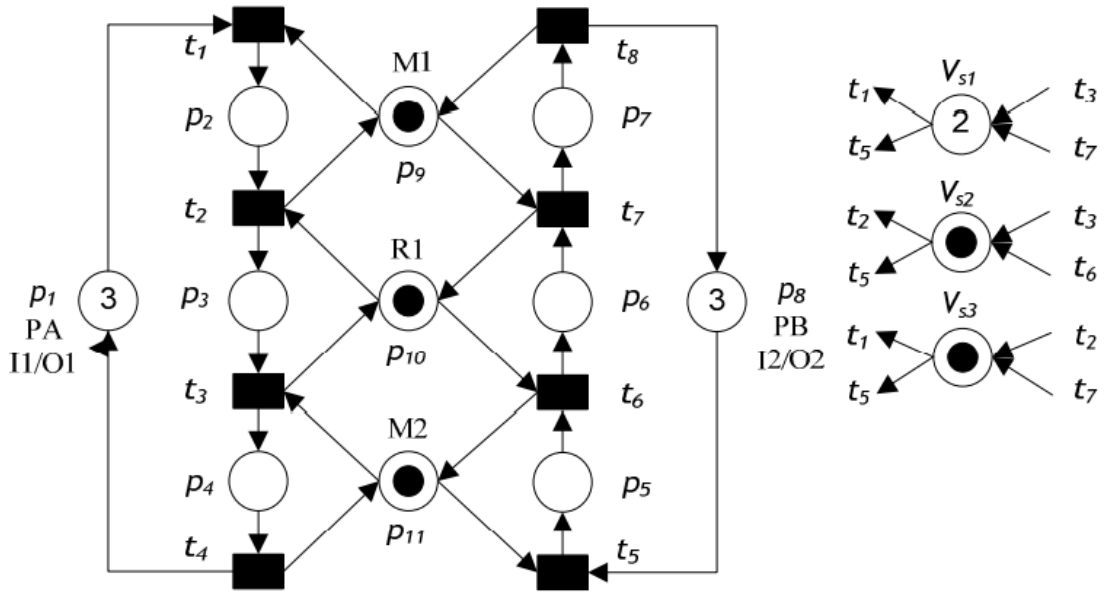
- في الأعمال الأولية لشبكات بتري التي تمثل أنظمة الأحداث المتقطعة، تم تحقيق منع الإقفال الميت في الأبحاث الأولى لشبكات بتري بعلامات أولية مناسبة يتم بها الحفاظ على حيوية شبكة بتري. يمكن ارجاع هذه الفكرة إلى كلا من **Zhou** و **DiCesare** في تسعينيات القرن الماضي. أُنجز جزء كبير من الأعمال ضمن هذا المجال من قبل **Jeng, Xie, Chu, Peng, Chung, Barkaoui** **[50-57].**

- إن حيوية شبكة بتري تتحقق بغياب السايفون الفارغ، لذلك فإن معظم الأبحاث ركزت على تحليل والتحكم في الإقفال الميت بمنع إفراغ السايفونات. تتمثل إحدى السمات التي تميز إطار التحكم الإشرافي التي تقدم به كل من **Ramadge** و **Wonham** بوجود حد فاصل وواضح بين النظام الذي تم الإشراف عليه والمشرف بحيث يكون تنجيز المتحكم مستقلاً عن التكنولوجيا المحددة. لكن هذه الحدود لم تظهر ظهوراً واضحاً في الأعمال الأولية التي تستخدم شبكات بتري لتمثيل أنظمة الأحداث المتقطعة.
- في مجال معالجة الإقفال الميت حقق العمل الذي تقدم به **Ezpeleta وآخرون** [40] و **Lautenbach** [58] وزملاؤه تقدماً، إذ تُفرض الحيوية عن طريق إضافة أماكن مراقبة (أماكن تحكم) لمنع إفراغ السايفون، من ثم فإن كلا من النظام المدروس والمشرف عليه ممثلين وفق لشبكات بتري. إذ حافظ هذا العمل على الفاصل بين النظام والمتحكم ما يساعد على تطوير كل منها بشكل مستقل عن الأخر.

- إن إمكانية فصل النظام والمشرف عليه شكل حافزاً، فقام **Xing[59] وآخرون** بتطوير سياسية لمنع الإقفال الميت لفئة من شبكات بتري، وهي شبكات بتري الإنتاجية **Production Petri Nets** حيت يتكون النظام فيها من أماكن للموارد وتسلسلات الإنتاج، مع تحديد هيكل الإقفال من مجموعة من الانتقالات. يتم ضمان أن مجموعة الموارد المستخدمة في أماكن الإخراج لمجموعة الانتقالات هذه تساوي مجموعة الموارد المستخدمة في أماكن الإدخال. إذ يتم توجيه النظام إلى حالة الإقفال الميت إذا كان عدد الموارد المستخدمة يساوي سعة الموارد. ووفقاً لذلك، يتم تطوير سياسة التحكم عن طريق إضافة مراقبين، الذي يضمن أنه لكل مورد معنى، يتطلب هيكل الإقفال دائماً موارد أقل من الموارد المتوفرة في النظام.

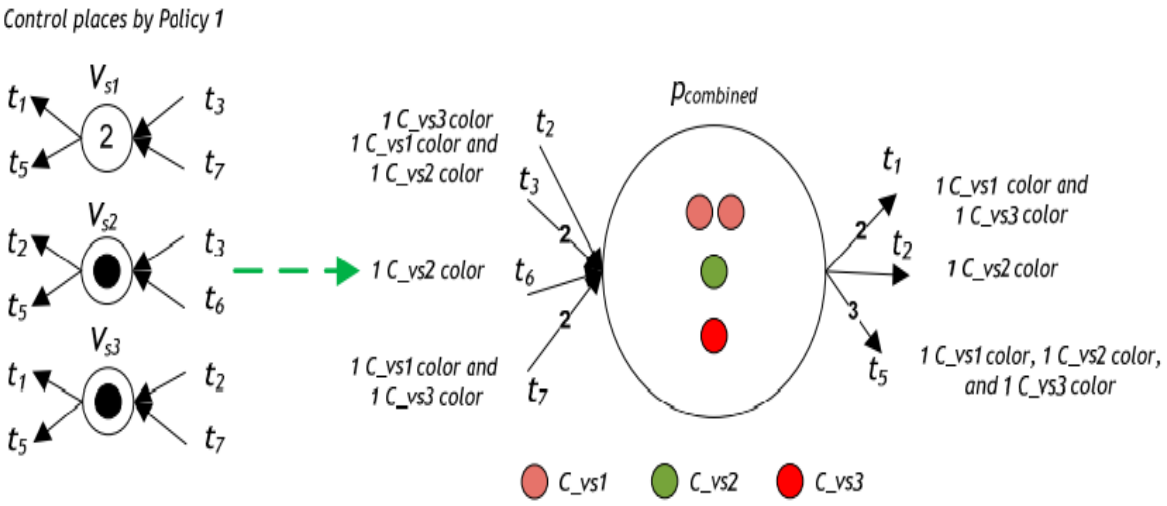
- ظهر العديد من الدراسات التي تتناول تطوير استراتيجيات للسيطرة على الإقفال الميت في أنظمة التصنيع الآلية، افترضت بعضها أن الموارد موثوقة، بينما افترض بعضها الأخر أن الموارد غير موثوقة، ومعظم هذه الدراسات تمنع الإقفال الميت بتصميم عقد(أماكن) تحكم وأقواس وانتقالات تربط بين الشبكة الأساسية والعقد التحكمية.[61][60]

- قام الباحث **Husam Kaid** وغيره من الباحثين باقتراح مقاربة قوية للتحكم في الإقفال الميت [62] تتطلب القيام بخطوتين: **الخطوة الأولى:** تستخدم نهج **Strict Minimal Siphons(SMSs)** لمنع الإقفال الميت بإضافة عقد تحكمية (مراقب)، والتي تمنع إفراغ السايفون الأصغري، إذ تُضاف عقدة تحكمية لكل سايفون أصغري لضمان حيوية النظام وخلوّه من الإقفال الميت. ويكمن ضعف هذه التقنية بزيادة حجم شبكة بتري، الأمر الذي يؤدي إلى تعقيد هيكلي كبير، لذلك قام الباحثين بالانتقال إلى الخطوة الثانية لحل هذه المشكلة. يوضح الشكل(4−1) تمثيل شبكة بتري S^3PR والعقد التحكمية اللازمة لمنع إفراغ السايفونات الأصغرية.



الشكل(4− 1) تمثيل شبكة بتري S^3PR مع العقد التحكمية الناتجة عن SMSs

الخطوة الثانية: هنا يتم دمج العقد التحكمية التي تم الحصول عليها في عقدة تحكم واحده بالاعتماد على شبكات بتري الملونة، ما يؤدي إلى تقليل التعقيد الهيكلي للشبكة والحصول على تعقيد حسابي أقل.
يوضح الشكل(4−2) ذلك.



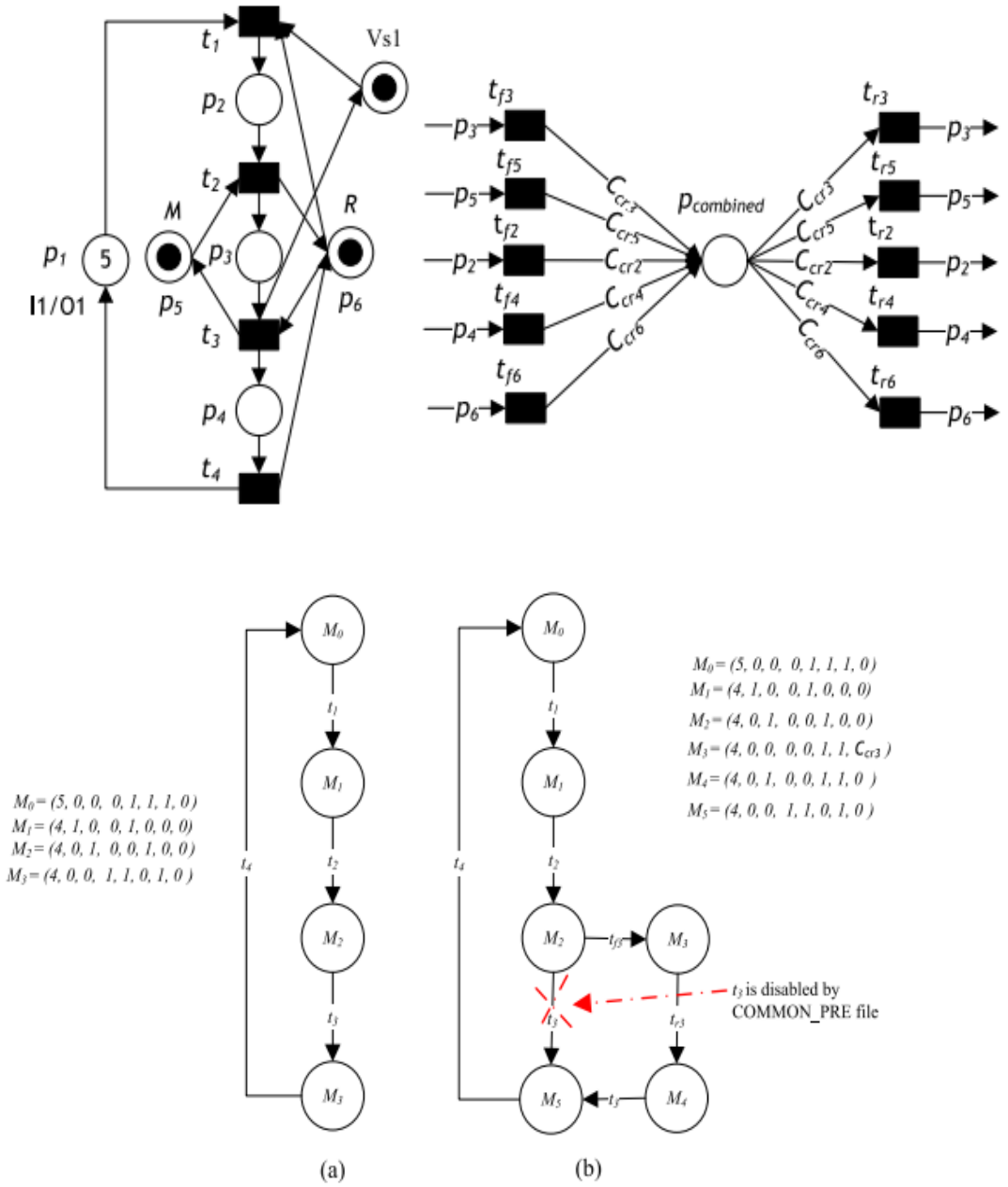
الشكل(4– 2): اختصار العقد التحكمية بعقدة واحدة بالاعتماد على شبكات بتري الملونة.

وبهذا تم اقتراح وحدة تحكم قوية ذات بينة بسيطة تعتمد على تحليل بنية الشبكة، ولا تحتاج إلى تحليل حالات العلامات جميها التي يمكن الوصول اليها من ثم فإن التعقيد الحسابي أقل، لكن **لم تأخذ هذه البنية حالات فشل الموارد وحالات حدوث تغيير في النظام** الذي يمكن أن يخضع إلى إضافة آلة جديدة أو إزالة آلة أو تغيير في معدل الإنتاج، وتغيير في سعة الموارد أو في مسار العمليات أو أن النظام يحوي على انتقالات غير قابلة للتحكم و غير قابلة للرصد، فعندما يخضع النظام إلى المشاكل السابقة يمكن أن يتعرض إلى الإقفال الميت.

- اقترح **ABDULRAHMAN AL-AHMARI** وزملاؤه استراتيجية تحكم قوية للإقفال الميت في الأنظمة ذات الموارد غير الموثوقة، [63] تتكون هذه الاستراتيجية من خطوتين:

الخطوة الأولى: يتم الحصول على نظام خالٍ من الإقفال الميت لا يأخذ فشل الموارد بعين الاعتبار باستخدام SMSs.

الخطوة الثانية: يتم التعامل مع الإقفال الميت الناجم عن حالات فشل الموارد جميعها، إذ اقُترِحت شبكة تعافي فرعية **Recovery Subnet** مشتركة تعتمد على شبكات بتري الملونة، وأُضيفت هذه الشبكة الفرعية على النظام المقترح في الخطوة الأولى لزيادة موثوقية النظام. الشكل(4–3).



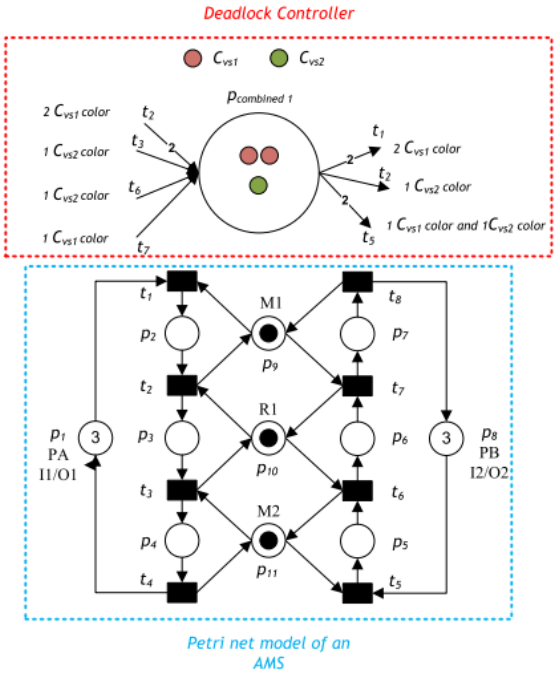
الشكل(4- 3) التعامل مع حالات فشل الموارد

تم اختبار النظام في جامعة الملك سعود، وعرض خطوات التطبيق والأدوات المستخدمة، لكن النتائج تحوي على نقص في الجداول والأشكال ولم يتم مناقشتها مناقشةً جيدةً، كما أنها **عالجت مشكلة فشل الموارد معالجةً مستقلة عن الإقفال الميت**، ولم تعالج حالات أخرى مثل غياب قابلية التحكم وغيرها.

- قدم **HUSAM KAID** وآخرون ورقة بحثية تقترح استراتيجية تحكم بالإقفال الميت [64] بثلاث خطوات لاكتشاف الأخطاء ومعالجتها في الأنظمة ذات الموارد غير الموثوقة، إذ في **البداية** يتم الحصول على نظام مثالي خالٍ من الإقفال الميت يعتمد على عدد من المراقبين باستخدام خوارزمية:

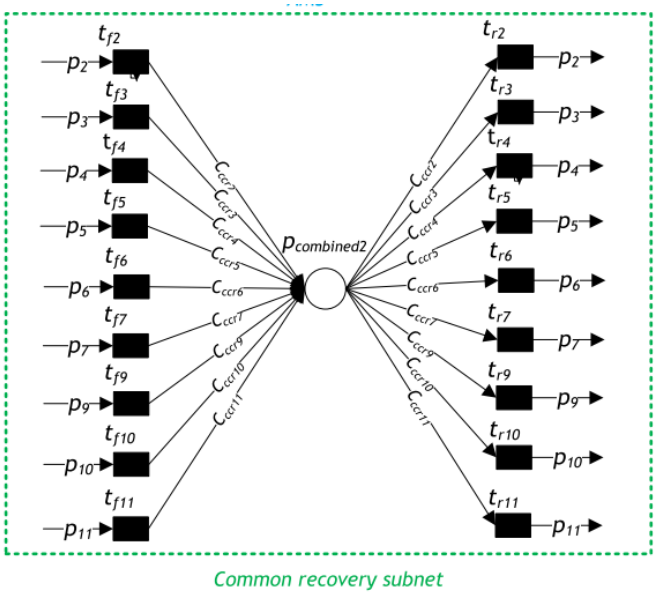
"Maximum Number of Forbidding First met Bad Markings Problem 1" (MFFBMP1)

والتي لا تأخذ بالحسبان فشل الموارد، وبعد ذلك يُدمج المراقبين جميعهم في مراقب واحد بالاعتماد على شبكات بتري الملونة. الشكل(4-4)



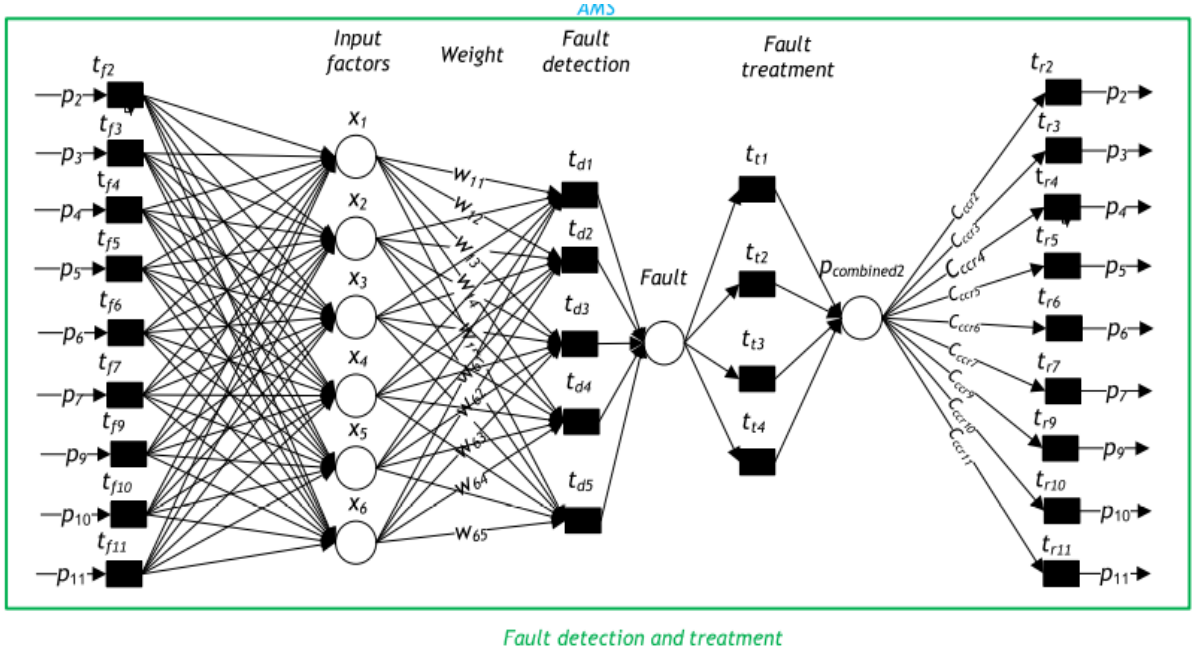
الشكل(4- 4) شبكة بتري خالية من الإقفال الميت بعقدة تحكمية واحدة بالاعتماد على شبكات بتري الملونة

وفي **الخطوة الثانية** تُناقش حالة الإقفال الناجمة عن فشل الموارد باستخدام شبكة تعافي فرعية تعتمد على شبكات بتري الملونة، ويتم تطبيق هذه الشبكة على النظام الذي نتج عن الخطوة الأولى بهدف الحصول على نظام موثوق. يوضح الشكل (4-5) ذلك.



الشكل(4- 5) : شبكة تعافي فرعية لمعالجة فشل الموارد

وفي **الخطوة الثالثة** تم اقتراح مقاربة هجينة تجمع بين الشبكات العصبونية وشبكات بتري الملونة التي تم الحصول عليها من الخطوة الثانية للكشف عن الأعطال ومعالجتها.



الشكل(4- 6) شبكة هجينة تجمع بين الشبكات العصبونية وعقدة بتري التحكمية الملونة لمعالجة فشل الموارد

وبهذا فإن الاستراتيجية السابقة تحل مشكلة الإقفال الميت وتكشف وتعالج الأخطاء في منظومات التصنيع الآلية، إذ إنها تمتاز ببنيتها البسيطة وبقوتها مقارنة مع السياسات السابقة، كما أنها تعدّ نظام هجين يربط بين مزايا شبكات بتري وقدرة الشبكات العصبونية على التعلم، كما أنها قابلة للتطبيق على المنشآت الصناعية المعقدة، وعُرضت النتائج على شكل مخططات وجداول ومناقشتها مناقشةً سليمةً، كما تطرق المقال إلى العديد من الدراسات المرجعية التي توضح طرق مختلفة.

والعيب الرئيسي هنا أنه في حال إضافة آلة جديدة أو تغيير في النظام المدروس يجب إعادة تكوين الاستراتيجية من البداية، **كما أنها عالجت حالة الإقفال معالجةً مستقلةً عن فشل الموارد، ونلحظ أن الشبكة العصبونية مستخدمة للكشف عن الأخطاء.**

الفصل الخامس

الإجراء العملي

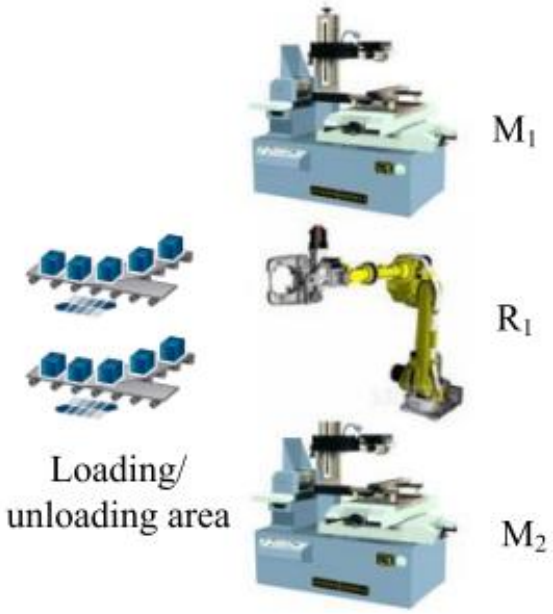
5-1 مقدمة:

يهدف هذا البحث إلى استخدام الذكاء الصنعي للتحكم في الإقفال الميت في أنظمة التصنيع المؤتمتة وذلك من خلال اقتراح آليتين تعتمد **الآلية الأولى** على علامات شبكة بتري لمنع الشبكة من الوصول إلى العلامات التي تؤدي إلى الإقفال الميت، في حين تعتمد **الآلية الثانية** على الانتقالات السابقة وذلك بالتنبؤ فيما اذا كان الانتقال التالي يؤدي إلى حالة الإقفال الميت.

في هذا الفصل سيتم عرض نتائج تطبيق كل من الآليتين في البحث بصورة منفصلة ومناقشة تطبيق كل آلية باستخدام عدد من خوارزميات الذكاء الصنعي.

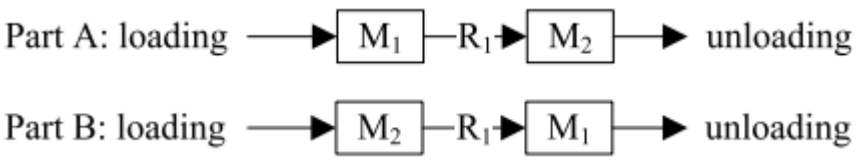
5-2 بنية النظام المدروسة:

تم الاعتماد على البنية S^3PR (system of simple sequential processes with resources)، إذ تحوي على ثلاث موارد هي الآلة الأولى M1 والآلة الثانية M2 وروبوت R1 ، ويكون لكل مورد عينة واحدة فقط، بوجود نوعين من المنتجات A و B تُعالج في النظام. يوضح الشكل (5-1) النظام المدروس.



الشكل(5- 1) بنية النظام المدروس

يوضح الشكل(5–2) السيناريو المعتمد لكل من المنتجين، إذ يُحمل المنتج من النوع A إلى الآلة الأولى ثم وعن طريق الروبوت يُنقل إلى الآلة الثانية، والمنتج من النوع B يحمل إلى الآلة الثانية وبعدها ينقل عن طريق الروبوت إلى الآلة الأولى.



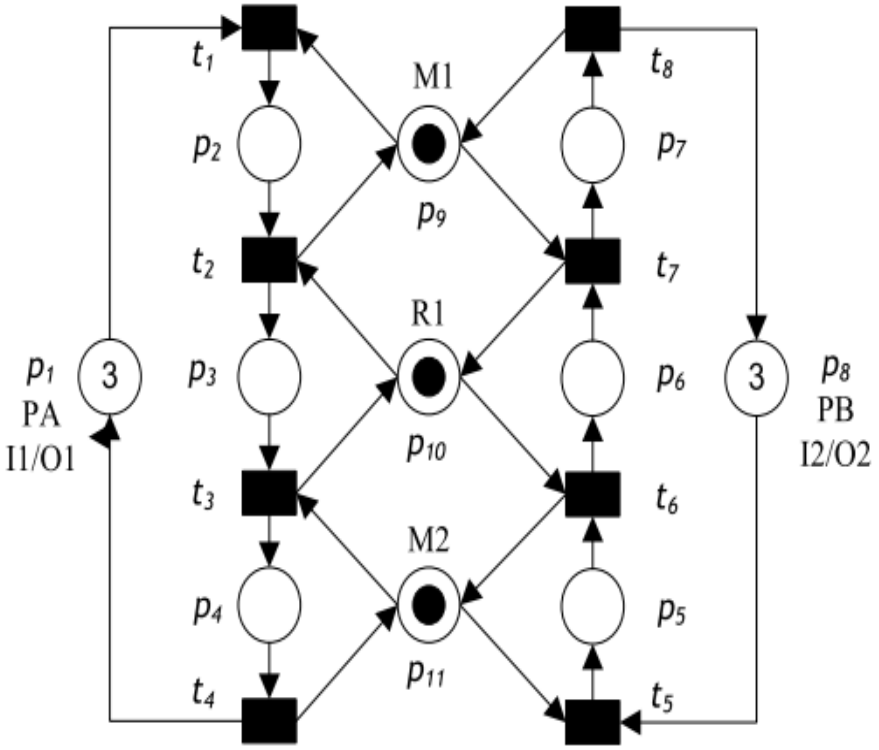
الشكل(5– 2) السيناريو المعتمد

مما سبق يمكن تمثيل النظام المدروس باستخدام شبكات بتري وفق الشكل (5–3) إذ تمثل الأماكن p1,p8 الدخل والخرج لكل من النوعين A وB ، والأماكن p9،p10،p11 تمثل الآلة الأولى والروبوت والآلة الثانية على الترتيب، وتمثل العقد المتبقية ما يلي:

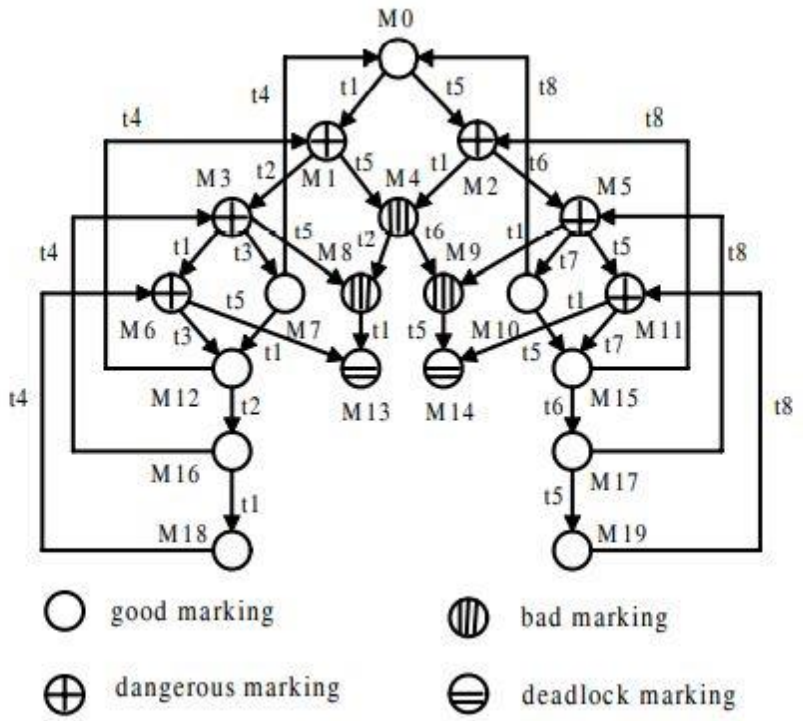
- P2 الآلة الأولى M1 تعالج المنتج A.
- P3 الروبوت R1 يحمل المنتج A من الآلة الأولى إلى الآلة الثانية.
- P4 الآلة الثانية M2 تعالج المنتج A.
- P5 الآلة الثانية M2 تعالج المنتج B.
- P6 الروبوت R1 يحمل المنتج B من الآلة الثانية إلى الآلة الأولى.
- P7 الآلة الأولى M1 تعالج المنتج B.
- T1 تحميل منتج من النوع A إلى الآلة الأولى.
- T2 يلتقط الروبوت المنتج من الآلة الأولى.
- T3 يضع الروبوت المنتج في الآلة الثانية.
- T4 تفريغ منتج من النوع A من الآلة الثانية.

- T5 تحميل منتج من النوع B إلى الآلة الثانية.
- T6 يلتقط الروبوت المنتج من الآلة الثانية.
- T7 يضع الروبوت المنتج في الآلة الأولى.
- T8 تفريغ منتج من النوع B من الآلة الأولى.

انطلاقاً من البنية المدروسة، يمكن رسم مخطط الحالات التي يمكن الوصول اليها في النظام (مخطط الوصولية) وفق الشكل (5-4).



الشكل(5- 3) تمثيل النظام المدروس باستخدام شبكة بتري



الشكل(5- 4) مخطط الوصولية للنظام المدروس

حيث يوجد أربع أنواع من العلامات وهي :

- العلامات الجيدة **good marking** وهي العلامة الطبيعية.
- العلامات خطرة **dangerous** يمكن لإحدى الانتقالات فيها أن يؤدي إلى حالة الإقفال.
- العلامات السيئة **bad** إذ يمكن قدح أحد الانتقالات عندها ولكنها ستؤدي إلى حالة إقفال ميت.
- علامات الإقفال الميت **deadlock** التي يتوقف النظام عندها عن العمل ويحتاج عندها للمعالجة.

يوضح الجدل(5-1) توزيع الرموز المميزة لكل علامة من شبكة بتري التي تمثل الحالات التي يمكن أن يصل إليها النظام المدروس.

الجدول (5- 1) توزيع الرموز المميزة لعلامات شبكة بتري

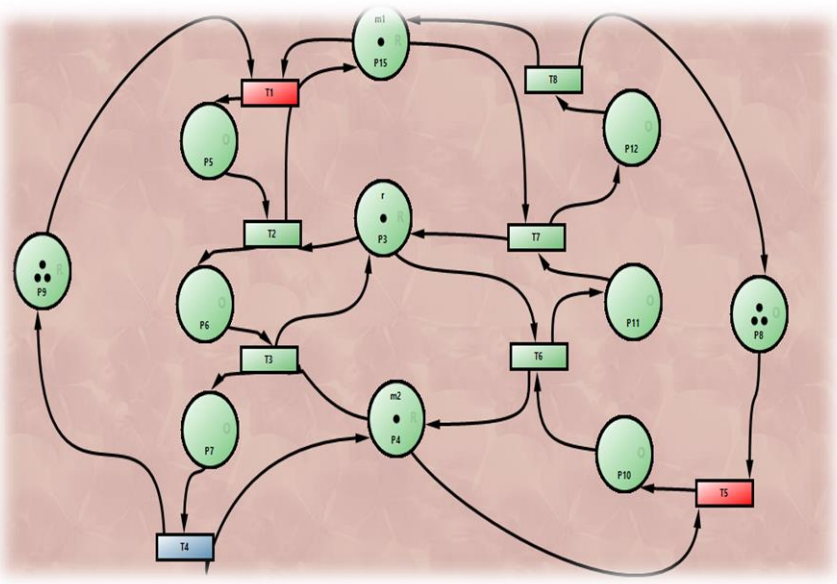
M	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
M_0	3	0	0	0	0	0	0	3	1	1	**1**
M_1	2	1	0	0	0	0	0	3	1	1	**1**
M_2	3	0	0	0	1	0	0	2	1	1	**0**
M_3	2	0	1	0	0	0	0	3	1	0	**1**
M_4	2	1	0	0	1	0	0	2	0	1	**0**
M_5	3	0	0	0	0	1	0	2	1	0	**1**
M_6	1	1	1	0	0	0	0	3	0	0	**1**
M_7	2	0	0	1	0	0	0	3	1	1	**0**
M_8	2	0	1	0	1	0	0	2	1	0	**0**
M_9	2	1	0	0	0	1	0	2	0	0	**1**
M_{10}	3	0	0	0	0	0	1	2	0	1	**1**
M_{11}	3	0	0	0	1	1	0	1	1	0	**0**
M_{12}	1	1	0	1	0	0	0	3	0	1	**0**
M_{13}	1	1	1	0	1	0	0	2	0	0	**0**
M_{14}	2	1	0	0	1	1	0	1	0	0	**0**
M_{15}	3	0	0	0	1	0	1	1	0	1	**0**

M_{16}	1	0	1	1	0	0	0	3	1	0	**0**
M_{17}	3	0	0	0	0	1	1	1	0	0	**1**
M_{18}	0	1	1	1	0	0	0	3	0	0	**0**
M_{19}	3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	**0**

5-3 نمذجة النظام المدروس باستخدام شبكة بتري:

يوجد العديد من البرامج لدراسة وتحليل ونمذجة شبكات بتري بأنواعها المختلفة ومنها:

- النمذجة باستخدام الماتلاب **MATLAB**: إذ يوفر الماتلات العديد من الأدوات التي تساعد في نمذجة شبكات بتري ومنها **GPenSIM**.
- النمذجة باستخدام برامج مخصصة: يوجد العديد من البرامج التي تساعد في نمذجة شبكات بتري منها **Petri.NET Simulator** حيث يسمح ببرمجة آليات التحكم باستخدام اللغات البرمجة عالية المتسوى C# و PYTHON. ويوضح الشكل (5-5) نمذجة شبكة S^3PR باستخدام المحاكي المذكور.



الشكل(5- 5) نمذجة النظام المدروس باستخدام المحاكيPetri.NET

كما يوجد العديد من البرنامج مثل Pnet simulator ...وإلى ما ذلك.

- النمذجة باستخدام اللغات البرمجية عالية المستوى:

إذ يتم بناء النموذج المحاكي لشبكة بتري باستخدام اللغات البرمجية والبرمجة غرضية التوجه بالاعتماد على مفهوم البيان (Graph)،ومن هذه اللغات لغة البايثون التي تمتاز بأنها لغة تفسيرية عالية المستوى مفتوحة المصدر وهذا ما تم اعتماده خلال البحث.

5-4 الآلية الأولى المقترحة لمعالجة الإقفال الميت:

تهدف هذه الآلية إلى اقتراح طريقة جديدة لمعالجة الإقفال الميت في أنظمة التصنيع المؤتمتة، باستخدام خوارزميات الذكاء الصنعي بالاعتماد على علامات شبكة بتري، إذ تُدرس الشبكة والعلامات التي يمكن الوصول أليها انطلاقاً من العلامة الأولية، وتحديد العلامات والانتقالات التي تؤدي إلى الحالات السيئة (حالات تؤدي إلى الإقفال الميت بشكل مؤكد)، وباستخدام خوارزميات الذكاء الصنعي يقوم المراقب بمعالجة الإقفال الميت وذلك من خلال منع النظام من الوصول هذه العلامات.

أُنجزت الآلية المقترحة انطلاقاً من العلامة الحالية للنظام والقدح المطلوب. إذ يقوم النموذج الذكي بتوقع حالة العلامة التالية للنظام، أي يتوقع فيما إذا كان القدح المطلوب يؤدي إلى حالة إقفال ميت أم لا. وإذا كان الانتقال يؤدي إلى حدوث الإقفال الميت يتم منع هذا الانتقال من القدح، يوضح الشكل (5-6) مداخل وخرج المراقب الذكي.

الشكل(5- 6) دخل وخرج المراقب الذكي المقترح

انطلاقاً من مجموعة البيانات الموضحة بالجدول(5-2)، تمت معالجة البيانات واختيار السمات الأكثر تأثيراً على الخرج باستخدام التابع SelectKBest، بعد أن تم اختيار السمات السبعة الأكثر تأثيراً على الخرج، قُسِّمت البيانات وفق لنسبة 70% من البيانات للتدريب و30% للاختبار تتوزع بشكل متكافئ بين حالة الإقفال والحالة الآمنة، وتدريب عدد من النماذج الذكية باستخدام الشبكات العصبونية، الآلة متجه الدعم، وأشجار القرار.

الجدول (5- 2) البيانات المستخدمة لبناء النموذج الذكي وفق الآلية الأولى المقترحة.

حالة النظام	الانتقال المطلوب	P11	P10	P9	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1
أمنة	t1	1	1	1	3	0	0	0	0	0	0	3
أمنة	t2	1	1	1	3	0	0	0	0	0	0	3
. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .
أمنة	t1	1	1	1	0	3	0	0	0	0	1	2
. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .

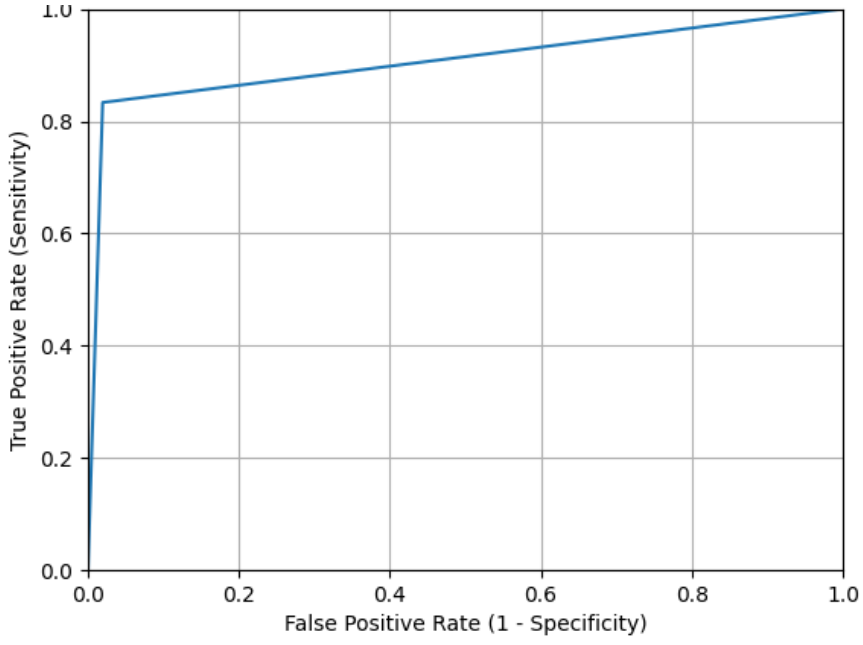
5-4-1 تنجيز الآلية الأولى المقترحة باستخدام الشبكات العصبونية:

باستخدام شبكة عصبونية بثلاث طبقات، طبقتين خفيتين كل منها تحوي على 20 خلية تستخدم تابع التفعيل tanh وطبقة خرج وفق تابع Sigmoid، بعد تدريب الشبكة تم الحصول على نموذج قادر على كشف حالة الإقفال الميت وفق مصفوفة الارتياب الموضحة بالشكل(5-7).

إذ إنّ نتائج التدريب أظهرت دقة تصنيف نهائية 97.5% ونسبة حساسية 83.3%، وفق لمنحني ROC الموضح بالشكل(5-8).

المتوقعة Predicted	حالة أمنة	151 94.375%	1 0.625%	99.34% 0.66%
	حالة إقفال	3 1.875%	5 3.125%	62.5% 37.5%
		98.05% 1.95%	83.3% 16.7%	97.5% 2.5%
		حالة أمنة	حالة إقفال	
		القيم الفعلية Actual		

الشكل(5- 7) مصفوفة الارتياب للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام الشبكات العصبونية



الشكل(5- 8) منحني ROC للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام الشبكات العصبونية

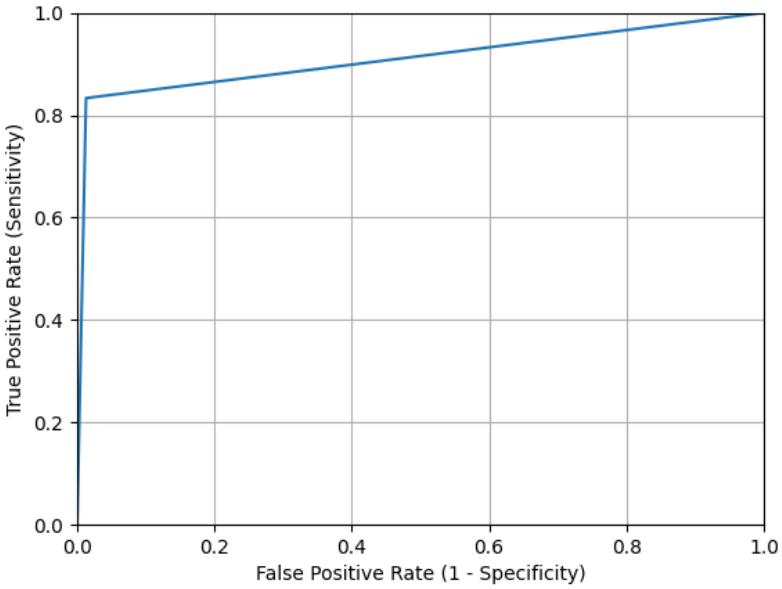
5-4-2 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام الآلة متجهة الدعم:

باستخدام الآلة متجهة الدعم وفق لنواة كثيرة حدود من الدرجة الخامسة، تم بناء نموذج قادر على كشف الإقفال الميت بدقة 93.7% وبحساسية 83.3% وفق لمصفوفة الارتياب الموضحة بالشكل(5-9)، وفق لمنحني ROC الموضح بالشكل(5-10).

المتوقعة Predicted	حالة أمنة	152 95%	1 0.625%	99.34% 0.66%
	حالة إقفال	2 1.25%	5 3.125%	71.42% 28.58%
		98.7% 1.3%	83.3% 16.7%	98.125% 1.875%
		حالة أمنة	حالة إقفال	
		القيم الفعليةActual		

الشكل(5-9) مصفوفة الارتياب للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام الآلة متجهة الدعم

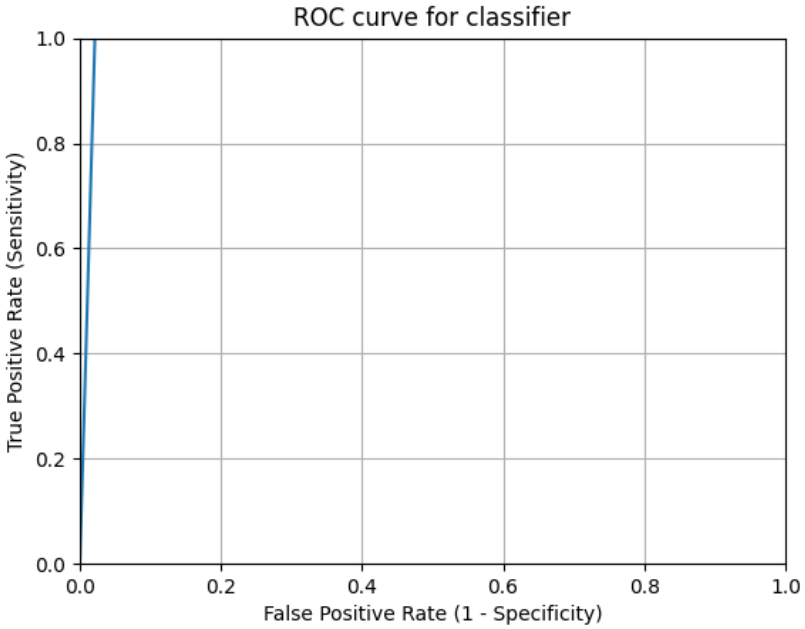
نلحظ أن كلا من النموذجين السابقين لم يكشف حالات الإقفال الميت جميعها، إذ يوجد حالة إقفال ميت يمكن أن تحدث صُنِّفت على أنها حالة طبيعية، من ثم لا يمكن اعتمادها مع نموذج شبكة بتري لأن ذلك لن يمنع حدوث الإقفال الميت.



الشكل(5- 10) منحني ROC للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام الآلة متجهة الدعم

5-4-3 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام أشجار القرار:

باستخدام شجرة قرار تعتمد على الإنتروبي وبعمق أعظمي 5، تم بناء نموذج ذكي بدقة 99.37% وحساسية 100% وفق لمصفوفة الارتياب الموضحة بالشكل(5-12)، وفق لمنحني ROC الموضح بالشكل(5-11).

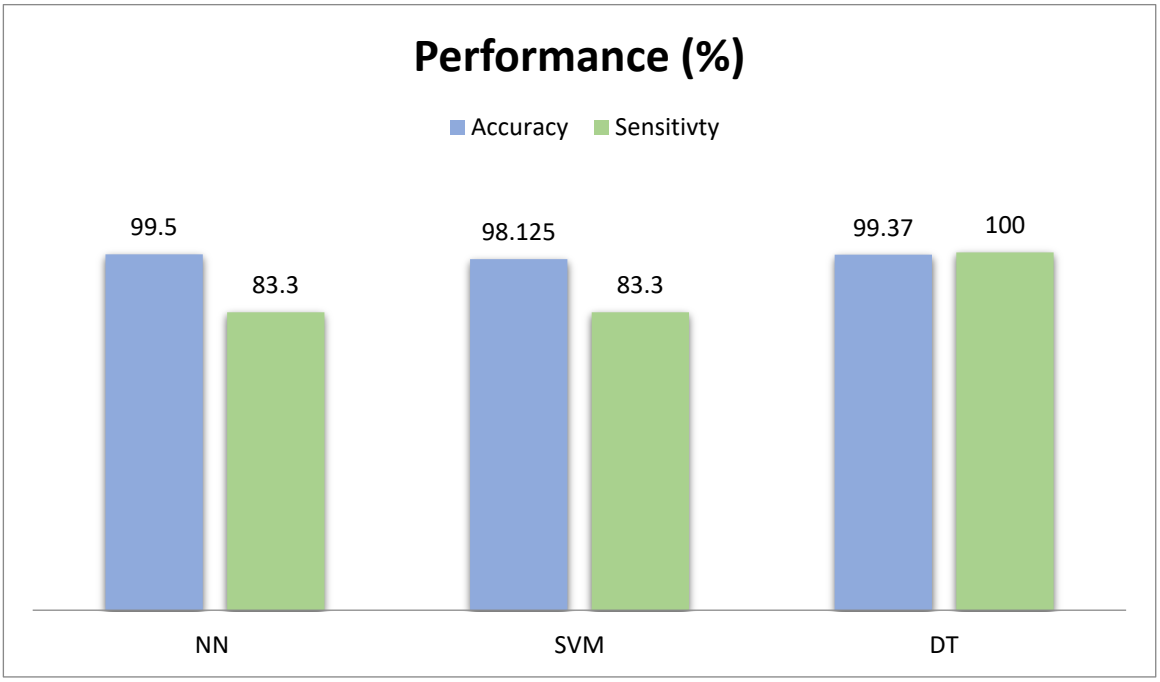


الشكل(5- 11)منحني ROC للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام أشجار القرار

المتوقعة Predicted	حالة أمنة	153 95.625%	0 0%	100% 0%
	حالة إقفال	1 0.625%	6 3.75%	85.71% 14.29%
		99.35% 0.65%	100% 0%	99.37% 0.63%
		حالة أمنة	حالة إقفال	
		القيم الفعليةActual		

الشكل(5 -12) مصفوفة الارتياب للنموذج الذكي المقترح وفق الآلية الأولى باستخدام أشجار القرار

يوضح الشكل(5–13) مقارنة بين النماذج الذكية الثلاثة المقترحة.



الشكل(5- 13) مقارنة النماذج الذكية المقترحة وفق الآلية الأولى

إذ إنّ النموذج الذكي المعتمد على أشجار القرار قادر على كشف حالات الإقفال الميت جميعها في النظام المدروس، لذلك اعتُمدَ هذا النموذج، ودمج المراقب المقترح مع شبكة بتري بتعديل الانتقالات بإضافة شرط السماح بالقدح من قبل المراقب الذكي، ثمّ تجربته بعدد من الانتقالات تتوزع توزعاً عشوائي والتأكد من عدم حدوث الإقفال الميت في النظام المدروس. إذ نلحظ أنه تم تقليل التعقيد الهيكلي لشبكة بتري بمراقب خارجي ذكي، يوضح الجدول(5-3) مقارنة الآلية المقترحة مع الأعمال الأدبية السابقة.

الجدول (5- 3) مقارنة الآلية الأولى المقترحة مع الأدبيات السابقة.

البارامترات	الآلية المقترحة الأولى	Kaid et al [64]	Kaid et al [62]	Chen et al. [61]	Ezpeleta et al. [60]
عدد المراقبين	1	1	1	2	3
المراقب	النموذج الذكي	شبكة بتري الملونة	شبكة بتري الملونة	شبكة بتري	شبكة بتري
الأقواس المضافة لشبكة بتري	0	7	7	8	12
شروط الانتقالات	شبكة بتري + النموذج الذكي	شبكة بتري الملونة	شبكة بتري الملونة	شبكة بتري	شبكة بتري
طريقة التحليل المعتمدة	تحليل مخطط الوصولية	تحليل البنية	تحليل البنية	تحليل البنية	تحليل البنية

عدد العلامات النهائية	15	15	15	15	15
الحيوية	محققة	محققة	محققة	محققة	محققة

أن الآلية المقترحة تتحكم في الإقفال الميت وتضمن حيوية النظام، مع المحافظة على العلامات المرغوبة جميعها، وتقليل التعقيد البنيوي لشبكة بتري باستخدام الذكاء الصنعي، وذلك بالاعتماد على تحليل الحالات جميعها التي يمكن الوصول إليها انطلاقاً من العلامة الأولية.

5-5 الآلية الثانية المقترحة لمعالجة الإقفال الميت:

تقدم هذه الآلية طريقة جديدة لمعالجة الإقفال الميت في أنظمة التصنيع المؤتمتة، باستخدام خوارزميات الذكاء الصنعي، وذلك بالاعتماد على الانتقالات إذ يقوم المراقب الذكي بتخمين حدوث الإقفال الميت أو عدم حدوثه، وذلك بالاستفادة من المعلومات السابقة عن الانتقالات الأخيرة المفعلة _ على سبيل المثال الانتقالات الأربعة الاخيرة التي قُدحت_ وانطلاقاً منها يقوم المراقب الخارجي بالسماح للانتقال المطلوب بالقدح من خلال التوقع بأنه لن يؤدي إلى حدوث الإقفال ميت، ومنعه من القدح فيما إذ كان يؤدي إلى ذلك. باستخدام مجموعة البيانات الموضحة بالجدول(5-4). إذ تخمن حالة النظام بأنها حالة إقفال ميت 1 أم حالة أمنة 0 انطلاقاً من انتقالات الأربعة الأخيرة المفعلة، والانتقال المطلوب قدحه.

الجدول (5- 4) البيانات المستخدمة لبناء النموذج الذكي وفق الآلية الثانية المقترحة.

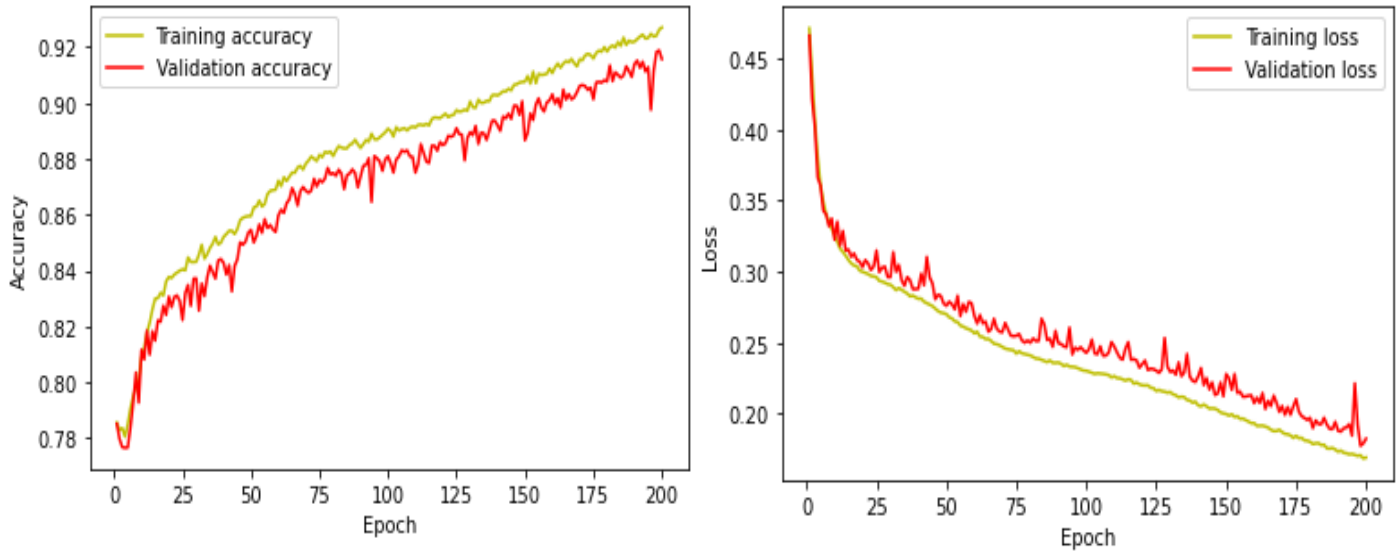
حالة النظام	الانتقال المطلوب	الانتقال 4	الانتقال 3	الانتقال 2	الانتقال 1
0	t1	t1	t1	t1	t1
0	t2	t1	t1	t1	t1
0	t3	t1	t1	t1	t1
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.

حيث تم تدريب عدد من النماذج الذكية وهي :

- الشبكات العصبونية العودية RNN.
- الشبكة العصبونية العودية ذات الذاكرة طويلة وقصيرة المدى LSTM.
- الشبكة العصبونية العودية ذات البوابات GRU.
- أشجار القرار Decision Tree.

5-5-1 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام الشبكات العصبونية العودية RNN:

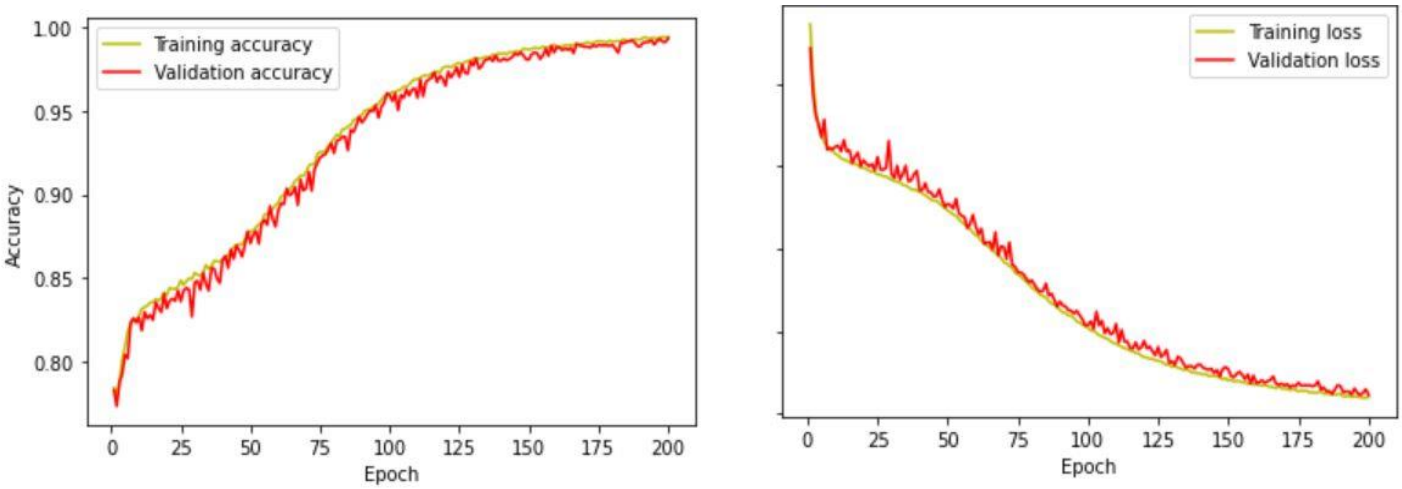
استخدِم 25 وحدة عودية بتابع التفعيل tanh، تليها شبكة عصبونية بطبقتين الأولى خفية تحوي على عشرة خلايا عصبية تستخدم تابع التفعيل tanh، والثانية طبقة الخرج تحوي على خلية عصبية واحدة بتابع تفعيل sigmoid، وباستخدام تابع الأمثلة adam وتابع الخسارة mean_squared_error، تم بناء نموذج ذكي قادر على تخمين حالة الإقفال بدقة 91.57%. يوضح الشكل(5-14) تدريب النموذج الذكي RNN إذ المنحني اليساري يوضح تغير الدقة، والمنحني اليميني يوضح تغير الخسارة مع التدريب.



الشكل(5- 14) منحني الدقة ومنحني الخسارة للنموذج الذكي المعتمد على الشبكات العصبونية العودية

5-5-2 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام الشبكة العصبونية العودية ذات الذاكرة طويلة وقصيرة المدى LSTM:

باستخدام خلايا LSTM وعددها 25 خلية كل منها يستخدم تابع التفعيل tanh، تليها شبكة عصبونية بطبقتين الأولى خفية تحوي على10 خلايا عصبية وفقاً لتابع التفعيل tanh والثانية طبقة الخرج تحوي على خلية عصبية واحدة وفق التابع sigmoid، بتابع الأمثلة adam وتابع الخسارة mean_squared_error. تم بناء نموذج ذكي قادر على تخمين الإقفال الميت بدقة قدرها 99.32%. يوضح الشكل(5-15) تغير دقة النموذج وقيمة الخسارة.

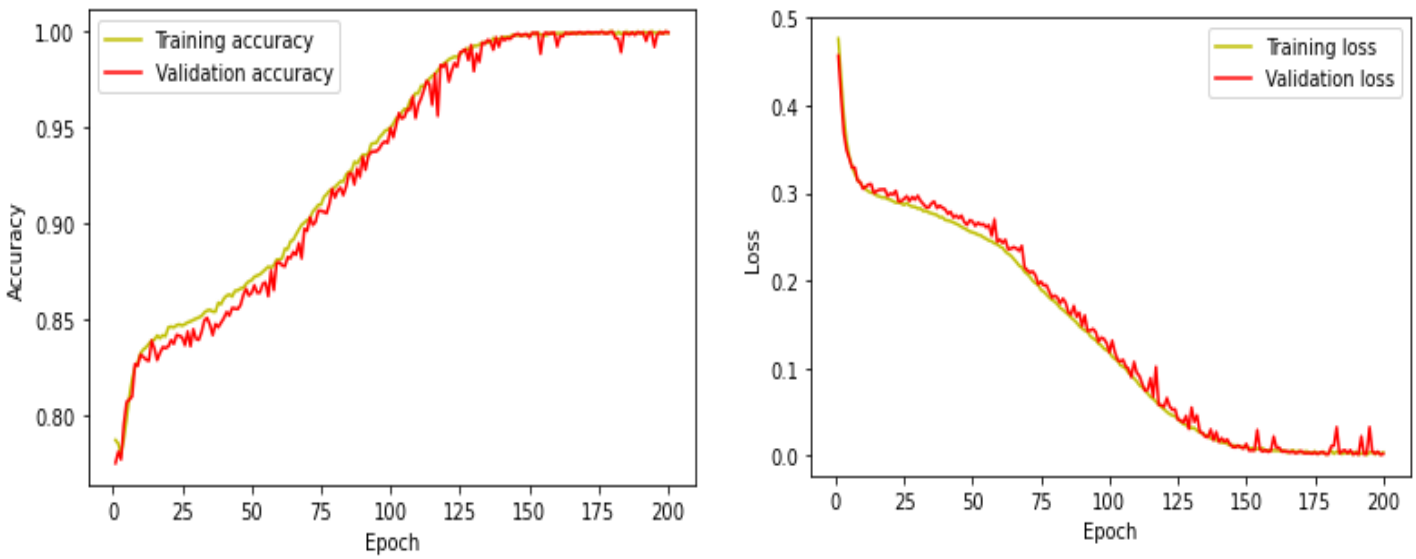


الشكل(5- 15) منحني الدقة ومنحني الخسارة للنموذج الذكي المعتمد على LSTM

5-5-3 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام الشبكة العصبونية العودية ذات البوابات GRU:

عن طريق بناء نموذج ذكي يستخدم 25 خلية ذاكرة GRU تستخدم تابع التفعيل tanh، تليها شبكة بطبقتين الأولى خفية تحوي على 10 خلايا عصبية وفق التابع tanh والثانية طبقة الخرج تحوي على خلية عصبية بتابع تفعيل sigmoid، من خلال تابع الأمثلة adam وتابع الخسارة mean_squared_ error. تم بناء نموذج قادر على تصنيف الإقفال الميت بدقة 99.92% وفق للآلية الثانية المقترحة.

يوضح الشكل(5-16) تغير الدقة والخسارة تبعاً لعدد الدورات التدريبية.



الشكل(5- 16) منحني الدقة ومنحني الخسارة للنموذج الذكي المعتمد على GRU

لوحظ أن النموذج الذكي المعتمد علىLSTM والنموذج الذكي المعتمد على GRU يحققا الغاية الطلوبة، ونظراً لفارق السرعة بين النموذجين حيث أن بنية خلايا GRU أسرع تم الاعتماد عليها. يوضح الجدول (5-5) مقارنة بين بنية كلا من النماذج الذكية المقترحة.

الجدول (5-5) مقارنة النماذج الذكية وفق الآلية الثانية المقترحة

البارامترات	GRU	LSTM	RNN
عدد الخلايا	25 (tanh)	25 (tanh)	25 (tanh)
الشبكة كاملة الاتصال	(10,1) (tanh, sigmoid)	(10,1) (tanh, sigmoid)	(10,1) (tanh, sigmoid)
تابع الخسارة	mean_squared_error	mean_squared_error	mean_squared_error
الأمثلة	Adam	Adam	Adam
عدد دورات التدريب	200	200	200
الدقة	99.92%	99.32%	91.57%

5-5-4 تنجيز الآلية المقترحة باستخدام أشجار القرار DT:

بالاعتماد على أشجار القرار وفقاً لشجرة بعمق أعظمي 13 وباستخدام مفهوم الإنتروبي، وبتقسيم البيانات 70% للتدريب و 30% للاختبار تم بناء مراقب خارجي ذكي بدقة 99.37% وفق لمصفوفة الارتياب الموضحة بالشكل(5-17).

المتوقعة Predicted	حالة أمنة	7851 79.819%	0 0%	100% 0%
	حالة إقفال	5 0.051%	1980 20.13%	99.748% 0.252%
		99.936% 0.064%	100% 0%	99.37% 0.63%
		حالة أمنة	حالة إقفال	
		القيم الفعليةActual		

الشكل(5 -17) مصفوفة الارتياب للنموذج الذكي وفق الآلية الثانية المعتمد على أشجار القرار

إذ لوحظ أن النموذج الذكي المعتمد على أشجار القرار يحقق الغاية المطلوبة، وبعد دمج المراقب الذكي مع شبكة بتري تبين أنه يقلل من حالات الإقفال الميت ولكن غير كافي لمنعها، إذ إنّ بعض الانتقالات من المراتب الأعلى يمكن أن تؤثر في الانتقال الحالي من ثم تؤدي إلى حدوث الإقفال الميت. يوضح الجدول(5-6) مقارنة الآلية الثانية المقترحة مع الأعمال الأدبية السابقة.

الجدول (5- 6) مقارنة الآلية الثانية مع الأعمال الأدبية السابقة.

البارامترات	الآلية الثانية المقترحة	Kaid et al [64]	Kaid et al [62]	Chen et al. [61]	Ezpeleta et al. [60]
عدد المراقبين	1	1	1	2	3
المراقب	النموذج الذكي	شبكة بتري الملونة	شبكة بتري الملونة	شبكة بتري	شبكة بتري

الأقواس المضافة لشبكة بتري	0	7	7	8	12
شرط الانتقالات	شبكة بتري+ النموذج الذكي	شبكة بتري الملونة	شبكة بتري الملونة	شبكة بتري	شبكة بتري
طريقة التحليل المعتمدة	تحليل مخطط الوصولية	تحليل البنية	تحليل البنية	تحليل البنية	تحليل البنية
العلامات التي يمكن الوصول إليها	19	15	15	15	15
الحيوية	تقلل الإقفال الميت	محققة	محققة	محققة	محققة

أن الآلية الثانية المقترحة تقلل من حدوث الإقفال الميت، كما أنها تقلل من التعقيد البنيوي لشبكة بتري وذلك بالاعتماد على تحليل الحالات جميعها التي يمكن الوصول إليها انطلاقاً من العلامة الأولية.

الفصل السادس

الاستنتاجات والأفاق المستقبلية

6-1 الاستنتاجات العامة:

- إن معالجة الإقفال الميت في أنظمة التصنيع المؤتمتة باستخدام الذكاء الصنعي قابل لتحقيق.
- يمكن استخدام الذكاء الصنعي للكشف عن الحالة الحالية لشبكة بتري.
- يمكن استخدام خوارزميات الذكاء الصنعي للكشف عن الحالة التالية للشبكة من ثم يمكن تجنب حدوث الإقفال الميت من خلال تأخير القدح المطلوب الذي يؤدي إلى حالة غير مرغوبة.
- باستخدام المراقب الخارجي الذكي تم تقليل تعقيد البنية الهيكلية لشبكات بتري مع ضمان عدم حدوث الإقفال الميت فيها.
- أثبتت الآلية الأولى نجاحها بالتحكم بالإقفال الميت، وذلك بعد تجارب عدّة، ولكنها تؤثر سلباً على زمن الاستجابة.
- إن أشجار القرار أثبتت فعاليتها، لأنها تأخذ التسلسل بعين الاعتبار.
- أثبتت الآلية الثانية نجاحها في تقليل حدوث الإقفال الميت، ولكن يمكن أن تصل الشبكة إلى حالة الإقفال بتأثير من انتقالات من مراتب أعلى.
- يمكن الاعتماد على كلا من النماذج الذكية LSTM، GRU في بناء النموذج الذكي المعتمد على الآلية الثانية، ومن الأفضل استخدام GRU ما ينعكس إيجاباً على الزمن.

6-2 الآفاق المستقبلية:

- تطبيق الآليات المقترحة على أنظمة مختلفة ودراستها.
- العمل على تحسين الآلية الثانية المقترحة لمعالجة الإقفال الميت بزيادة عدد الانتقالات المدروسة، ودراسة تأثيرها.
- دراسة تأثر استخدام المراقب الذكي في نظام ذو موارد غير موثوقة، مع أخذ فشل الموارد بالحسبان.
- دراسة إمكانية تعلم المراقب حالات الإقفال في حال تم إضافة آلة جديدة أو ازالتها.
- دراسة إمكانية تطوير المراقب الذكي بوجود نظام غير قابل للرصد أو غير قابل للتحكم.

المراجع

1. T. Murata, ‘‘Petri nets: Properties, analysis and applications,’’ Proc. IEEE, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, Apr. 1989
2. Z. W. Li and M. C. Zhou, Deadlock Resolution in Automated Manufacturing Systems: A Novel Petri Net Approach. London, U.K.: Springer, 2009.
3. Wang J., 2007- Petri Nets for Dynamic Event-Driven System Modeling .Handbook of Dynamic System Modeling,1-17.
4. NARAHARI Y.,1999-Petri Nets. Resonance, 4(8),66-77.
5. Zuberek W.M.,1991- Timed Petri nets definitions, properties, and applications.
6. K. Jensen, "An introduction to the theoretical aspects of coloured Petri nets" in A Decade of Concurrency Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, vol. 803, pp. 230-272, 1994.
7. Ramadge, P., Wonham, W.M. (1987) Supervisory control of a class of discrete event processes. SIAM Journal on Control and Optimization, vol.25. no.1, pp.206
8. Ramadge, P., Wonham, W.M. (1989) The control of discrete event systems. Proceedings of the IEEE, vol.77, no.1, pp.81–89.
9. Cao, X.R., Cohen, G., Giua, A., Wonham, W.M., Van Schuppen, J.H. (2002) Unity in diversity, diversity in unity: Retrospective and prospective views on control of discrete event systems. Journal of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, vol.12, no.3, pp.253–264
10. Moody, J.O., Antsaklis, P.J. (1998) Supervisory Control of Discrete Event Systems Using Petri Nets. Boston, MA: Kluwer.
11. Coffman, E.G., Elphick, M.J., Shoshani, A. (1971) System deadlocks. ACM Computing Surveys, vol.3, no.2, pp.67–78.
12. Ezpeleta, J., Couvreur, J.M., Silva, M. (1993) A new technique for finding a generating family of siphons, traps, and st-components: Application to colored Petri nets. In Advances in Petri Nets, Lecture Notes in Computer Science, vol.674, G. Rozenberg (Ed.), pp.126–147.
13. Jeng, M.D., DiCesare, F. (1995) Synthesis using resource control nets for modeling sharedresource systems. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.11, no.3, pp.317–327
14. Chu, F., Xie, X.L. (1997) Deadlock analysis of Petri nets using siphons and mathematical programming. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.13, no.6, pp.793–804.
15. Cheung, K.S. (2004) New characterization for live and reversible augmented Petri nets. Information Processing Letters, vol.92, no.5, pp.239–243.
16. Chu, F., Xie, X.L. (1997) Deadlock analysis of Petri nets using siphons and mathematical programming. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.13, no.6, pp.793–804

17. Esparza, J., Silva, M. (1992) A polynomial-time algorithm to decide liveness of bounded free choice nets. Theoretical Computer Sciences, vol.102, no.1, pp.185–205.
18. Cassandras, C.G., Lafortune, S. (2008) Introduction to Discrete Event Systems. Springer.
19. Abraham Silberschatz, Petet Baer Galvin, Greg Gagne , 2013-Operating System Concepts- Ninth Edition
20. Desrocher, A.A., AI-Jaar, R.Y. (1995) Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems: Modeling, Control, and Performance Analysis. Piscataway, NJ: IEEE Press.
21. Araki, T., Sugiyama, Y., Kasami, T., Okui, J. (1977) Complexity of the deadlock avoidance problems. In Proc. 2nd IBM Symposium on the Mathematical Foundations of Computer Science, pp.229–252.
22. Hassani, H., Silva, E. S., Unger, S., TajMazinani, M., & Mac Feely, S. (2020). Artificial intelligence (AI) or intelligence augmentation (IA): what is the future?. Ai, 1(2), 8.
23. STUART, R.; NORVIG P.,2009-Artifical Intelligence-A Modern Approach.3rd Ed.Prentice Hall,1152.
24. Sarker, I. H. (2022). Ai-based modeling: Techniques, applications and research issues towards automation, intelligent and smart systems. SN Computer Science, 3(2), 1-20.
25. Montesinos López, O. A., Montesinos López, A., & Crossa, J. (2022). Fundamentals of Artificial Neural Networks and Deep Learning. Multivariate Statistical Machine Learning Methods for Genomic Prediction, 379-425.
26. Cervantes, J., Garcia-Lamont, F., Rodríguez-Mazahua, L., & Lopez, A. (2020). A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends. Neurocomputing, 408, 189-215.
27. Poorani S., Balasubramanie P. (2019). Deep neural network classifier in breast cancer prediction. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 9(1), pp.2106-2109.
28. GOODFELLOW I.; BENGIO Y.; COURVILLE A.,2016-Deep Learning. MIT Press,800.
29. Rumelhart D. E.;Hinton G.E. Williams R. J.,1986 – learning Representations By Back-Propagating Errors. Nature,323(2),533-536.
30. HOCHREITER S. 1998 – The Vanishing Gradient Problem During Learning Recurrent Neural Nets And Problem solutions. International Journal of Uncertainty ,Fuzziness and Knowledge-Base Systems, 6(2), 107-116.
31. NEUBIG G., 2017-Neural Machine Translation and Sequence-to-sequence Models: A Tutorial . arXiv: 1703.01619v1,1-65
32. HOCHREITER S.; SCHMIDHUBER J. ,1997-Long short-Term Memory. Neural Computation. 9(8), 1735-1780

33. OLAH C., 2015- Understanding LSTM Networks. [Online], Available: http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs ,[Accessed 8-9-2022]
34. CHO, K.; MERRIENBOER B. V.; GULCEHRE C.; BAHDANAU D.; BOUGARES F.; SCHWENK H.; BENGIO Y., 2014-Learning Phrase Representations Using RNN Encoder-Decoder For Statistical Machine Translation. EMNLP 2014, arXiv:1406.1078 v3,1-15
35. Chung J.; Gulcehre C.; Cho k.; Bengio Y., 2014-Empirical Evaluation Of Gated Recurrent Neural Networks On Sequence Modeling. NIPS 2014 Deep learning and Representation Learning Workshop, arXiv:1412.3555v1,1-15
36. Zonta, G., Anania, G., Togni, A. D., Gaiardo, A., Gherardi, S., Giberti, A., ... & Malagù, C. (2017). Use of gas sensors and FOBT for the early detection of colorectal cancer. Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings, 1(4), 398.
37. Gurumoorthy, S., Muppalaneni, N. B., Chandra Sekhar, G., & Sandhya Kumari, G. (2020). Artificial intelligence systems and expert systems: an overview of recent trends and roles in information science and data analytics. ICDSMLA 2019, 1804-1812
38. Bamorovat, M., Sharifi, I., Rashedi, E., Shafiian, A., Sharifi, F., Khosravi, A., & Tahmouresi, A. (2021). A novel diagnostic and prognostic approach for unresponsive patients with anthroponotic cutaneous leishmaniasis using artificial neural networks. PLoS One, 16(5), e0250904.
39. Thiang, H. K., & Pangaldus, R. (2009). Artificial neural network with steepest descent backpropagation training algorithm for modeling inverse kinematics of manipulator. World Academy of Science, Engineering and Technology, 60, 530-533.
40. Ezpeleta, J., Colom, J.M., Martinez, J. (1995) A Petri net based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.11, no.2, pp.173–184.
41. Fanti, M.P., Zhou, M.C. (2004) Deadlock control methods in automated manufacturing systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A, vol.34, no.1, pp.5–22.
42. Fanti, M.P., Zhou, M.C. (2005) Deadlock control methods in automated manufacturing systems. In Deadlock Resolution in Computer-Integrated Systems, New York: Marcel Dekker, pp.1–22
43. Jeng, M.D., Xie, X.L. (2005) Deadlock detection and prevention of automated manufacturing systems using Petri nets and siphons. In Deadlock Resolu
44. Abdallah, I.B., ElMaraghy, H.A. (1998) Deadlock prevention and avoidance in FMS: A Petri net based approach. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.14, no.10, pp.704–715.
45. Banaszak, Z., Krogh, B.H. (1990) Deadlock avoidance in flexible manufacturing systems with concurrently competing process flows. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.6, no.6, pp.724–734.

46. Ezpeleta, J., Recalde, L. (2004) A deadlock avoidance approach for non-sequential resource allocation systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A, vol.34, no.1, pp.93–101.
47. Hsieh, F.S., Chang, S.C. (1994) Dispatching-driven deadlock avoidance controller synthesis for flexible manufacturing systems. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.10, no.2, pp.196–209.
48. Kumaran, T.K., Chang, W., Cho, H., Wysk, R.A. (1994) A structured approach to deadlock detection, avoidance and resolution in flexible manufacturing systems. International Journal of Production Research, vol.32, no.10, pp.2361–2379.
49. Wysk, R.A., Yang, N.S., Joshi, S. (1994) Resolution of deadlocks in flexible manufacturing systems: avoidance and recovery approaches. Journal of Manufacturing Systems, vol.13, no.2, pp.128–138.
50. Barkaoui, K., Chaoui, A., Zouari, B. (1997) Supervisory control of discrete event systems based on structure theory of Petri nets. In Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp.3750–3755.
51. Chu, F., Xie, X.L. (1997) Deadlock analysis of Petri nets using siphons and mathematical programming. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.13, no.6, pp.793–804.
52. Jeng, M.D., DiCesare, F. (1993) A review of synthesis techniques for Petri nets with applications to automated manufacturing systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A, vol.23, no.1, pp.301–312.
53. Jeng, M.D., DiCesare, F. (1995) Synthesis using resource control nets for modeling sharedresource systems. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.11, no.3, pp.317–327.
54. Jeng, M.D. (1997) A Petri net synthesis theory for modeling flexible manufacturing systems. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, vol.27, no.2, pp.169–183.
55. Jeng, M.D., Xie, X.L. (1999) Analysis of modularly composed nets by siphons. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A, vol.29, no.4, pp.399–406.
56. Jeng, M.D., Xie, X.L., Peng, M.Y. (2002) Process nets with resources for manufacturing modeling and their analysis. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.18, no.6, pp.875–889.
57. Jeng, M.D., Xie, X.L., Chung, S.L. (2004) ERCN* merged nets for modeling degraded behavior and parallel processes in semiconductor manufacturing systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A, vol.34, no.1, pp.102–112.
58. Lautenbach, K., Ridder, H. (1993) Liveness in bounded Petri nets which are covered by Tinvariants. In Proc. 13th Int. Conf. on Applications and Theory of Petri Nets, Lecture Notes in Computer Science, vol.815, R. Valette (Ed.), pp.358–375.

59. Xing, K.Y., Hu, B.S., Chen, H.X. (1996) Deadlock avoidance policy for Petri-net modelling of flexible manufacturing systems with shared resources. IEEE Transactions on Automatic Control, vol.41, no.2, pp.289–295.
60. J. Ezpeleta, J. M. Colom, and J. Martinez, ‘‘A Petri net based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems,’’ IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 11, no. 2, pp. 173–184, Apr. 1995.
61. Y. Chen, Z. Li, and M. Zhou, ‘‘Behaviorally optimal and structurally simple liveness-enforcing supervisors of flexible manufacturing systems,’’ IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, Syst. Humans, vol. 42, no. 3, pp. 615–629, May 2012
62. H. Kaid, A. Al-Ahmari, Z. Li, and R. Davidrajuh, "Single controller based colored Petri nets for deadlock control in automated manufacturing systems" Processes, vol. 8, no. 1, p. 21, Dec. 2019.
63. A. Al-Ahmari, H. Kaid, Z. Li, and R. Davidrajuh, "Strict minimal siphon based colored Petri net supervisor synthesis for automated manufacturing systems with unreliable resources" IEEE Access, vol. 8, pp. 22411–22424, 2020
64. H. Kaid, A. AL-Ahmari ,E. Nasr, A. Al-Shayea , A. Kamrani, M. Noman , AND H. Mahmoud ," Petri Net Model Based on Neural Network for Deadlock Control and Fault Detection and Treatment in Automated Manufacturing Systems" IEEE Access, May 27, 2020.

Abstract

Automated manufacturing systems (AMSs) can process various products according to a predefined sequence of operations. However, the system may stop partially or completely because of deadlock problems, which occur due to limited number of resources and lead to incomplete operations. As a result, handling deadlock problems in industrial systems is very important to ensure correct, efficient, and reliable industrial processes and to avoid performance and product deterioration that can harm human health. Several approaches, concerned with solving deadlock problems, have emerged. Many of which use Petri Nets that provide stable control over manufacturing systems and are considered a suitable tool for scheduling and deadlock analysis. In this paper, two separate deadlock-handling mechanisms are proposed based on Petri Nets and artificial intelligence using an intelligent external observer. The first mechanism depends on identifying deadlock states based on the current state of the Petri Net and the required transition. On the other hand, the second mechanism depends on the last fired transitions by predict if the transition will lead to a deadlock problem. The research validated the possibility of processing deadlock using artificial intelligence techniques, which ultimately reduces the structural complexity of Petri Net compared to previous literature and maintains the required states of the system.

Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Department Computer and Automation Engineering

Developing a Deadlock Control Mechanism in Automated Manufacturing Systems Using Petri Nets and Artificial Intelligence

A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Control Engineering

By:

Eng. Mehdy Aliewe

Supervisor:

Dr. Eng. Hiyam Khaddam

2022_2023