أداة برمجية لتقييم أداء الأنظمة المنتهية الحالة الماركوفية[1]

عائدة صائمة[2] أ. د. حسن أبو النور[3] د. وليد قاسم مزهر[4]

الملخص

الأنظمة المنتهية الحالة هي الأنظمة التي لها فراغ حالة منته. و تشكل هذه الأنظمة نسبة كبيرة من الأنظمة العملية كالأنظمة المعلوماتية وأنظمة الاتصال المعلوماتية وبروتوكولاتها. إن عملية التصميم الأمثل (Optimal Design) لهذه الأنظمة تعدُّ ضرورة أساسية نظراً لانتشارها الواسع واستخداماتها العديدة.

هناك طرائق متعددة لتصميم هذه الأنظمة منها ما يعتمد على طريقة تقييم الأداء المبنية على نموذج شبكة بتري العشوائية ((Stochastic Petri Net (SPN) وذلك للأنظمة المنتهية الحالة الماركوفية (Markovian) .

نقدم في هذه المقالة أداة برمجية قمنا ببنائها، تنفذ مراحل طريقة تقييم الأداء المبنية على نموذج شبكة بتري العشوائية بشكل آلي وتساعد في عملية تصميم أداء أي نظام منتهي الحالة و ماركوفي وتحليله.

كما نقدم تطبيقاً لأداتنا البرمجية على نظام اتصالاتي نشرح من خلاله كيفية استخدام هذه الأداة البرمجية.

[1] أعد هذا البحث في سياق رسالة الدكتوراه للطالبة عائدة صايمة بإشراف الدكتور حسن أبو النور ومشاركة الدكتور وليد قاسم مزهر.

[2] كلية الهندسة المعلوماتية– جامعة دمشق.

[3] قسم الإلكترون– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق.

[4] قسم الإلكترون – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق.

أولاً- مقدمة:

مع تقدم العلوم وتطورها وتزايد تعقيد الأنظمة الحديثة كالأنظمة المعلوماتية وأنظمة الاتصال المعلوماتية يزداد تقييم أداء (Performance Evaluation) هذه الأنظمة أهمية يوماً بعد يوم. ويهدف تقييم أداء الأنظمة إلى الإجابة عن بعض الأسئلة التصميمية المعقدة والمنتشرة في حقل هذه الأنظمة والمتعلقة بالمفاهيم الكمية لها كفعالية وجاهزية النظام للعمل (System Availability and Readiness)، ووثوقية النظام (System Reliability)، وأداء النظام أو التكلفة المالية للنظام (System Cost) [4]، أي إنَّ تقييم الأداء يهدف للتنبؤ بسلوك النظام بطريقة كمية[5].

ويتم تقييم أداء الأنظمة عادة بإحدى الطريقتين الآتيتين: الطريقة المبنية على القياس، والطريقة المبنية على النموذج.

تعتمد الطريقة الأولى على تنفيذ القياس الفعلي على النظام المدروس ومن ثَـمَّ فإن شرطها المسبق لتنفيذ القياس هو أن يكون النظام موجوداً وفي حالة عمل. تعدُّ هذه الطريقة ذات دقة عالية للنتائج لكونها تتم على النظام ذاته. أما الطريقة الثانية المبنية على النموذج فتعدُّ ذات أهمية عالية لأن النظام لا يكون متاحاً في معظم الأحيان وخاصة خلال مرحلة تصميم النظام. كما أن التنبؤ المسبق لأداء النظام في أثناء مرحلة تصميم النظام يعدُّ ضرورياً لإثبات متى يحقق متطلبات(Requirements) التصميم من أجل الوصول للحالة الفضلى للنظام [1،5].

تحتاج الطريقة الأولى لكلفة مادية عالية لتأمين أجهزة وبرمجيات ذات هدف خاص يتعلق بالقياس، كما تتطلب مدداً زمنية طويلة نسبياً لإجراء هذا القياس وتنفيذ الاختبارات وتعديل محدداتها بشكل صحيح. ويكون استخدام هذه الطريقة محدوداً. وتستخدم في الحالات الأكثر شيوعاً الطريقة الثانية المبنية على النموذج والتي تسمح بالتنبؤ بأداء تصاميم الأنظمة بكلفة مادية بسيطة ومدد زمنية أقل[5].

يكون النموذج في سياق تقييم الأداء عبارة عن وصف مجرد مبني على مفاهيم تعرف النظام بشكل رياضي بدلالة مكوناته، وتعرف التفاعل القائم بين هذه المكونات فضلاً عن تفاعلات النظام مع المحيط الذي يعمل فيه [1].

وتصنف النماذج بشكل تقليدي وفقاً لتقانات حلها في صنفين: النماذج التحليلية، ونماذج المحاكاة. وتكون النماذج الأولى مبنية على نظرية الأرتال (Queuing Theory) وهي مفرطة في التبسيط وتكمن قوتها في الحل التحليلي الفعال لطيف واسع من النماذج، ولكنها تعاني من ضعف القوة الوصفية بوجود ظاهرات كظاهرة التزامن (Synchronization) أو ظاهرة انتظار المهمة للتنفيذ ريثما يتحقق حدث ما تنتظره (Blocking)، أما الثانية فتكون معقدة وغالية وتأخذ وقتاً طويلاً جداً من أجل تنفيذها [4،7].

وكما نلاحظ فهناك فجوة بين كلا الصنفين وقد جاءت نماذج شبكات بتري العشوائية ومرونة تقانات التحليل العددي لتسد هذه الفجوة وتصف هذه الظواهر و خصائص أخرى في الأنظمة الموزعة، ولتمثل الإطار اللازم من أجل تقييم الأداء لأنواع عديدة من الأنظمة ومنها الأنظمة المنتهية الحالة الماركوفية [3،4].

تعدُّ شبكة بتري العشوائية نموذجاً رياضياً مبنياً على البيان(Graph) يتمتع بمرونة عالية في النمذجة وببساطة في التوصيف تمكنه من نمذجة الأنظمة المتضمنة ظاهرات كظاهرة التزامن، والتضارب (Conflict)، وظاهرة العرقلة (Deadlock)، وبقدرته على تمثيل فراغ الحالة والأنظمة المنتهية الحالة بشكل سهل وهذا ما يميزه عن غيره من تقانات النمذجة الأخرى [2،8].

مما تقدم تم اختيار طريقة تقييم الأداء المبنية على نموذج شبكة بتري العشوائية في هذا البحث كطريقة من أجل الوصول للتصميم الأمثل للأنظمة المنتهية الحالة الماركوفية.

ونظراً لكون الوصول للتصميم الأمثل لنظام معطى باستخدام الطريقة السابقة يعتمد على تعديل هذا النموذج وأخذ قياساته في كل مرة يتم فيها تعديله حتى يتم الوصول

إلى تطابق بين متطلبات التصميم ونتائج القياسات ، وهي عملية مضنية يدوياً وذهنياً، كما أن عملية توليد سلاسل ماركوف وحلها بالطريقة اليدوية يعدُّ أمراً مستحيلاً حتى من أجل بعض الأنظمة البسيطة جداً[1،5]، فضلاً عن أن التعقيد المتزايد للأنظمة الحديثة يجعل عملية الحصول على قياسات هذه الأنظمة صعبة وغير ممكنة باستخدام الطرائق التقليدية [4]. من أجل ذلك كان لا بد من وجود أدوات برمجية تدعم عملية التوليد الآلي لسلاسل ماركوف والحصول على حلولها المستقرة والعابرة (Steady and Transient) وتسهل جهد الإنسان وتختصر الوقت وتدعم عملية تقييم أداء الأنظمة وذلك بهدف الحصول على قياسات هذه الأنظمة آلياً والوصول للتصميم الأمثل لها.

وجدت محاولات عديدة من أجل إيجاد أداة برمجية تقوم ببرمجة الطريقة السابقة، وتعتمد نموذج شبكة بتري العشوائية كنموذج توصيف لها[1،6] ومن هذه المحاولات:

- الأداة المدعوة (SHARPE) وهي مطورة في جامعة " دك" (Duke University-Carolina-U.S.A.) من قبل (Trivedi) و(Sahner) في عام (1986) ، ومنجزة بلغة البرمجة C [1].
- أداة حزمة شبكة بتري العشوائية البرمجية (The Software Stochastic Petri Net Package(SPNP)) والمطورة في جامعة " دك" أيضاً من قبل (Trivedi)، و(Ciardo)، و (Muppala) عام (1989)، والمنجزة باللغة البرمجية C [5].
- الأداة المدعوة (Time NET) بنسخ متعددة ومنها النسخة (3.0) لعام (2000) والمطورة من قبل أشخاص عديدين في جامعة برلين التقنية، والمنجزة باللغة البرمجية (C++) [4].
- الأداة المدعوة (SPNica) وهي مطورة في جامعة برلين التقنية من قبل (German) لعام (2000)، و منجزة بـ (Mathematica) النسخة (3.0) [4].

وما يزال العمل على إيجاد أدوات جديدة و تعديل الأدوات الموجودة وتطويرها متواصلاً [4،1] .

ضمن هذا السياق، قمنا في هذا البحث بتصميم أداة برمجية جديدة تقوم ببرمجة طريقة التقييم المبنية على نموذج شبكة بتري العشوائية وتحل نموذج شبكة بتري العشوائية الممثل للنظام آلياً. وطبقنا هذه الأداة على نظام اتصالاتي وحصلنا على نتائج هذا التطبيق.

تتميز أداتنا البرمجية عن غيرها من الأدوات البرمجية الأخرى بطريقة إدخال نموذج شبكة بتري العشوائية الممثل للنظام، وبطريقة توليد سلسلة ماركوف المستمرة الزمن (Continuous-Time Markove Chain (CTMC))، وبتنوع الطرائق العددية المستخدمة من أجل إيجاد الحل المستقر لهذه السلسلة، فضلاً عن تطبيق طريقة الانتظام (Uniformization Method) بمختلف حالاتها وذلك من أجل إيجاد الحل العابر والاحتمالات التراكمية لها أيضاً(Cumulative Probabilities)، كما تؤمن أداتنا البرمجية معالجة التدفقات الحسابية الناقصة والزائدة (Underflow and Overflow) التي تحدث عند حساب الحلين العابر والمستقر لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن، ثم أخيراً فهي تتميز بطريقة حساب القياسات المصممة للنظام ومعالجتها لسلاسل ماركوف المستمرة الزمن والضخمة فضلاً عن كونها أداة مبنية وفق نواة قابلة للتطوير.

يهدف بحثنا إلى إلقاء الضوء على هذه الأداة البرمجية وأسلوب بنائها وآلية عملها مع إظهار نتائج التقييم التي حصلنا عليها عند تطبيقها على نظام اتصالاتي وكيفية الاستفادة من هذه النتائج من أجل الوصول للتصميم الأمثل لهذا النظام.

ثانياً–نموذج شبكة بتري العشوائية وطريقة التقييم المبنية على هذا النموذج [1،5]:

يعطى نموذج شبكة بتري العشوائية بـــ: $SPN = (P, T, \Pr, I, O, H, W, m_0)$، حيث:

P مجموعة الأمكنة (Places) و T مجموعة الانتقالات (Transitions) وهي تقسم إلى نوعين: الانتقالات الزمنية (Timed Transition) والانتقالات الفورية (Immediate Transitions).

Pr دالة الأسبقية (Priority Function) المرافقة لكل انتقال في نموذج شبكة بتري العشوائية.

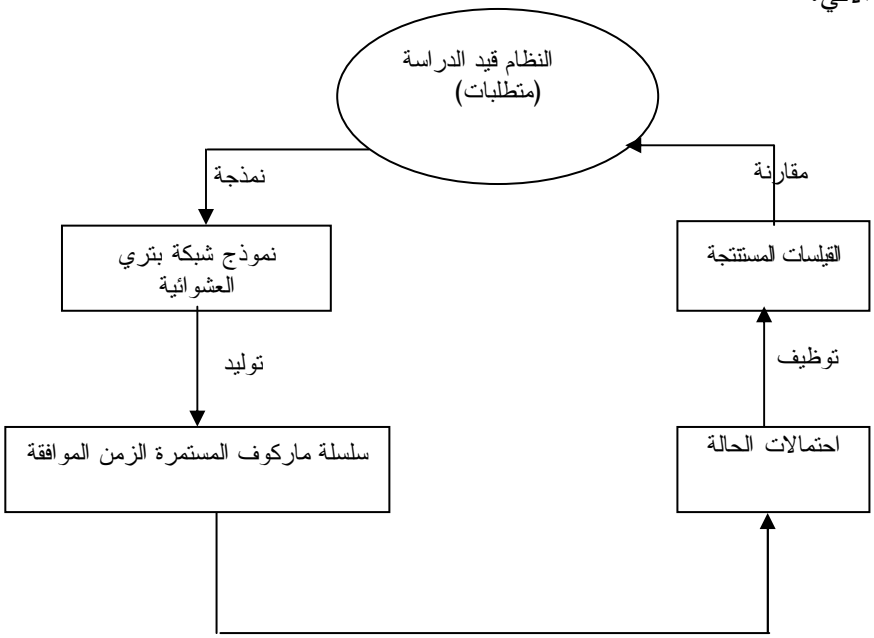
I، O و H دالات التعددية (Multiplicity Functions) المرافقة لكل من أقواس الدخل والخرج والمنع على التوالي.

W الدالة المرافقة لكل انتقال فإذا كان الانتقال فورياً فإنها تدعى وزن الانتقال (Transition Weight) وإذا كان الانتقال زمنياً فإنها تدعى معدل العبور (Firing Rate).

m_0 الترقيم الابتدائي (Initial Marking) وهو يعطي عدد العلامات الموجود في كل مكان من أمكنة شبكة بتري العشوائية قبل التنفيذ.

ويعرف بيان قابلية الوصول (Reachability Graph) لهذا النموذج بأنه: بيان موجه تكون عقده مطابقة لمجموعة تراقيم هذا النموذج وأضلاعه التي تصل بين هذه التراقيم معلمة إما بمعدلات العبور أو باحتمالات العبور وفقاً للانتقالات التي تحدث بين هذه التراقيم. ويقسم بيان قابلية الوصول إلى مجموعتين من التراقيم: مجموعة التراقيم المتلاشية(Vanishing Markings) : وهي التراقيم التي تحوي انتقالات فورية قابلة للعبور فيها، ومجموعة التراقيم المادية (Tangible Markings): وهي التراقيم التي لا تحوي انتقالات فورية قابلة للعبور فيها.

أما طريقة التقييم المبنية على هذا النموذج فتمر بمراحل متعددة تتم وفقاً للمخطط الآتي:



الحل العددي العابر والمستقر

ويمكن أن نشرح باختصار هذه المراحل كما يأتي:

المرحلة الأولى:

مرحلة تحديد متطلبات النظام وتوصيفه بنموذج شبكة بتري العشوائية: ويتم في هذه المرحلة تحديد متطلبات النظام المطلوب تصميمه بشكل قيم كمية، كما يتم تعريف قياسات الأداء المصممة لهذا النظام بناءً على المتطلبات المحددة سابقاً وبحيث تحقق قيمة هذه القياسات متطلبات التصميم و تجيب عن الأسئلة المطروحة عن النظام والموجودة في متطلبات التصميم.

بعد ذلك يتم تمثيل النظام المطلوب وتوصيفه باستخدام نموذج شبكة بتري العشوائية المناسب.

المرحلة الثانية:

مرحلة توليد سلسلة ماركوف المستمرة الزمن: يتم فيها توليد سلسلة ماركوف المستمرة الزمن والموافقة لنموذج شبكة بتري العشوائية الممثل للنظام المدروس، وذلك بتوليد بيان قابلية الوصول لهذا النموذج، ومن ثم تحويله إلى سلسلة ماركوف المستمرة الزمن بحذف التراقيم المتلاشية منه في حال وجودها.

المرحلة الثالثة:

مرحلة إيجاد الحلين العابر والمستقر لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن: يتم في هذه المرحلة إيجاد متجه احتمال الحالة العابرة ومتجه احتمال الحالة المستقرة لهذه السلسلة بالطرائق العددية المعروفة.

المرحلة الرابعة:

مرحلة حساب القياسات ومقارنة نتائج القياسات: يتم فيها حساب بعض القياسات المصممة للنظام المدروس بالاعتماد على الحلين العابر والمستقر لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن والمحسوبة من المرحلة السابقة. ثم بعد ذلك تتم مقارنة نتائج القياسات هذه مع متطلبات التصميم المحددة من المرحلة الأولى، فإذا كانت هذه النتائج محققة لمتطلبات التصميم وتجيب عن الأسئلة المطروحة عن النظام والمتضمنة في متطلبات النظام فهذا يدلنا على أنَّنا وصلنا للتصميم الأمثل للنظام.

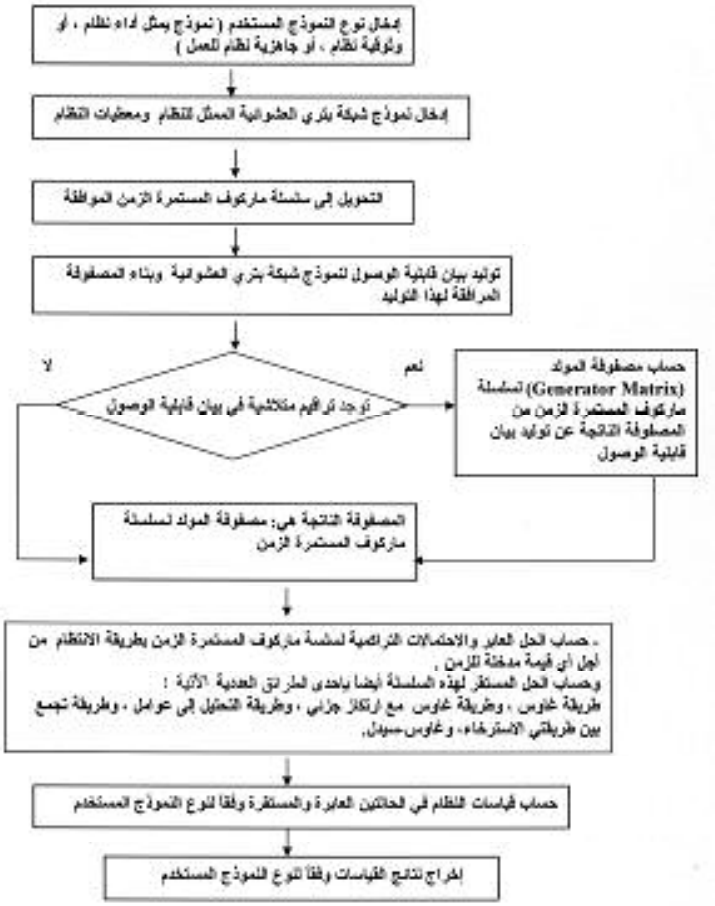
وفي حال كانت نتائج القياسات غير محققة لمتطلبات التصميم، فإننا نعود للمرحلة الأولى ونعدل بشكل ما في نموذج شبكة بتري العشوائية الممثل للنظام المدروس مع تكرار المراحل الأخرى كلها من جديد حتى يتم الوصول للتصميم الأمثل للنظام.

ثالثاً– بناء الأداة البرمجية واستخدامها:

قمنا ببرمجة طريقة تقييم الأداء المبنية على نموذج شبكة بتري العشوائية من خلال بناء أداة برمجية تنفذ مراحل هذه الطريقة بشكل آلي، بحيث يتم تحديد متطلبات النظام وتوصيف مبدئي لهذا النظام بنموذج شبكة بتري العشوائية من قبل المستثمر، وبعد ذلك يتم إدخال هذا النموذج إلى الأداة ، وعندئذ تقوم الأداة بتحويل نموذج شبكة بتري العشوائية إلى سلسلة ماركوف المستمرة الزمن الموافقة له، وإيجاد الحلين العابر والمستقر لهذه السلسلة، ومن ثم حساب القياسات المصممة للنظام بشكل آلي، وعندئذ يقوم المستثمر بمقارنة نتائج القياسات هذه مع متطلبات التصميم، وإذا لم يكن هناك تطابق يقوم المستثمر وعن طريق الأداة بتعديل نموذج شبكة بتري العشوائية، ومن ثم تقوم الأداة بعملية التحويل إلى سلسلة ماركوف المستمرة الزمن جديدة موافقة لنموذج شبكة بتري العشوائية المعدل وهكذا حتى نحصل على تصحيح للتصميم يلبي المتطلبات المحددة من قبل المستثمر. وفيما يأتي نعطي لمحة مختصرة عن أسلوب بناء هذه الأداة وآلية عملها:

3-1- المخطط التدفقي للأداة:

تختار الأداة البرمجية النقطة العملية لها بأن تأخذ نموذج شبكة بتري العشوائية كدخل (Input) لها وتعطي القياسات المصممة للنظام كخرج (Output) وذلك وفقاً للمخطط التدفقي الآتي:



3-2- آلية عمل الأداة: بنيت برامج هذه الأداة بلغة البرمجة (Delphi) لميزاتها المتعددة في البرمجة، كما تم استخدام بعض الطرائق العددية في هذه الأداة. وفيما يأتي سنقوم بذكر هذه الطرائق العددية مع إعطاء شرح مبسط لآلية عمل هذه الأداة من خلال الخطوات الآتية:

الخطوة الأولى:

- إدخال نوع النموذج المستخدم (نموذج يمثل أداء نظام، أو نموذج يمثل وثوقية نظام ، أو نموذج يمثل جاهزية نظام للعمل)
- إدخال نموذج شبكة بتري العشوائية الممثل للنظام المدروس عن طريق رسمه وتحديد الترقيم الابتدائي وأوزان الانتقالات وأسبقية كل انتقال في هذا النموذج.
- إدخال دالات التعددية المرافقة وعلى التوالي لكل من أقواس الدخل والخرج والمنع لكل انتقال في نموذج شبكة بتري العشوائية.
- إدخال معطيات النظام وهي معلومات عن النظام تحتاجها الأداة من أجل حساب القياسات المصممة للنظام.

الخطوة الثانية: توليد سلسلة ماركوف المستمرة الزمن الموافقة بتوليد بيان قابلية الوصول لنموذج شبكة بتري العشوائية وبناء المصفوفة المرافقة لهذا التوليد و يوجد هنا حالتان:

الحالة الأولى: إذا كان نموذج شبكة بتري العشوائية لا يحوي إلا انتقالات زمنية عندئذ فإن المصفوفة الناتجة من توليد بيان قابلية الوصول تمثل مصفوفة المولد لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن.

الحالة الثانية: إذا كان نموذج شبكة بتري العشوائية يحوي انتقالات زمنية وفورية معاً: عندئذ يتم حساب مصفوفة المولد لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن من المصفوفة الناتجة من توليد بيان قابلية الوصول بحذف التراقيم المتلاشية من هذا البيان.

الخطوة الثالثة: إظهار مصفوفة المولد لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن.

الخطوة الرابعة: إظهار مجموعة التراقيم المشكلة لبيان قابلية الوصول لنموذج شبكة بتري العشوائية.

الخطوة الخامسة: إظهار بيان قابلية الوصول لنموذج شبكة بتري العشوائية مرسوماً على شكل شجرة ثنائية.

الخطوة السادسة: حساب الحل المستقر لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن بإحدى الطرائق العددية الآتية:

i. طريقة غاوس.

ii. طريقة غاوس مع ارتكاز جزئي.

iii. طريقة التحليل إلى عوامل.

iv. طريقة تجمع بين طريقة الاسترخاء وطريقة غاوس– سيدل.

وإظهار هذا الحل.

الخطوة السابعة: حساب الحل العابر لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن (العادية والضخمة) من أجل أي قيمة مدخلة للزمن والاحتمالات التراكمية لهذه السلسلة أيضاً من أجل أي قيمة مدخلة للزمن باستخدام طريقة الانتظام وإظهار هذا الحل.

الخطوة الثامنة: حساب القياسات المصممة للنظام المدروس في الحالتين العابرة والمستقرة وفقاً لنوع النموذج المستخدم (نموذج يمثل أداء نظام، أو نموذج يمثل وثوقية نظام، أو نموذج يمثل جاهزية نظام للعمل) وإظهارها.

الخطوة التاسعة: رسم المنحنيات البيانية لكل قياس من قياسات النظام بالنسبة للزمن وإظهاره.

وتكون إحدى الطرائق العددية (i) و(ii) و(iii) في الخطوة السادسة مستخدمة في الأداة إذا كان عدد حالات سلسلة ماركوف المستمرة الزمن أقل أو يساوي لخمسمئة وأما الطريقة (iv) فيتم استخدامها عندما يكون عدد حالات سلسلة ماركوف المستمرة الزمن

يتجاوز الخمسمئة ويتم ذلك وفقاً لاختبار محدد تقوم به الأداة بالنسبة لكل طريقة من الطرائق السابقة وفقاً لعدد الحالات في سلسلة ماركوف المستمرة الزمن.

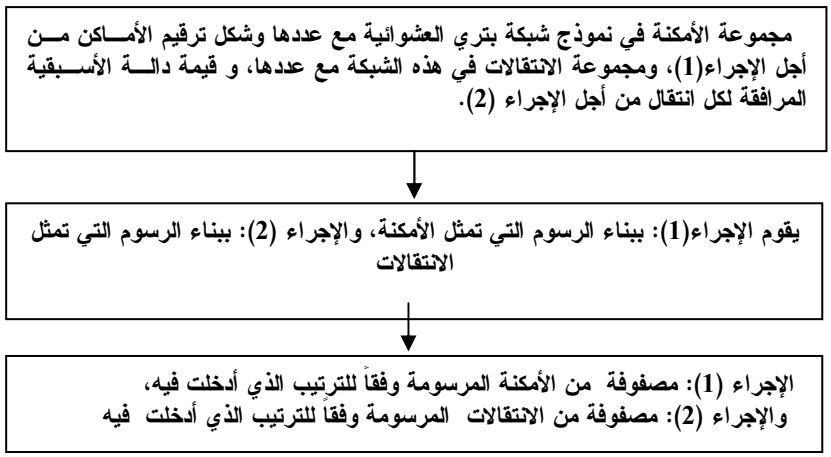
وقد تم اختيار الطرائق العددية (i) و(ii) و (iii) في الأداة لأنها طرائق دقيقة وموثوق بها [10،1]. أما الطريقة (iv) فهي اجتماع للطريقتين: طريقة الاسترخاء وطريقة غاوس –سيدل وقد تم اختيارها في الأداة لأنها طرائق تكرارية سريعة التقارب وباختيار معقول لوسيط الاسترخاء في طريقة الاسترخاء ولمقياس التقارب فإن التقارب في هذه الطرائق يمكن أن يسرع لتعطي هذه الطرائق حلولاً دقيقة إلى حد ما [5،1].

3-3- شرح لبعض الدوال والإجراءات المستخدمة في الأداة:

تم في هذه الأداة استخدام بعض الدوال والإجراءات. وفيما يأتي سنقوم بذكر لبعض منها مع ذكر لوظيفتها وشرح لدخل كل منها وخرجه من خلال وضع مخطط صندوقي يبين ذلك:

- الإجراءان:

```
Procedure CreateImgPlace(Owner: Tcomponent;ImgCount:Integer;    -1
Rect:TRect);
Procedure CreateImgTrans(Owner: Tcomponent;ImgCount:Integer;  -2
Rect:TRect);
```



- الإجراءان:

Procedure SetM0Nmric(ImgCount:Integer); -1
Procedure SetPrWFunc(ImgCount:Integer); -2

مجموعة الأمكنة، وأعداد صحيحة موجبة تمثل عدد العلامات الابتدائي الموجود في كل مكان من الأمكنة من أجل الإجراء (1)، ومجموعة الانتقالات وأعداد صحيحة موجبة تمثل على التوالي كلاً من أوزان و قيم دالة الأسبقية المرافقة لكل انتقال من أجل الإجراء (2).

↓

يقوم الإجراء (1): بتحديد الترقيم الابتدائي لنموذج شبكة بتري العشوائية، والإجراء (2): بتحديد أوزان الانتقالات وقيم دالة الأسبقية المرافقة لكل انتقال.

↓

الإجراء (1): مصفوفة من الأعداد الصحيحة الموجبة مرتبة وفقاً لترتيب عناصر مصفوفة الأمكنة المرسومة تمثل الترقيم الابتدائي والإجراء (2): مصفوفة من الأعداد الصحيحة الموجبة تمثل قيم دالة الأسبقية المرافقة لكل انتقال كما هي مرتبة في مصفوفة الانتقالات المرسومة ومصفوفة من الأعداد الحقيقية الموجبة تمثل أوزان الانتقالات كما هي مرتبة في مصفوفة الانتقالات المرسومة.

- الإجراءات :

Procedure CreateIFuncEdit(n,m:Integer); -1
Procedure CreateOFuncEdit(n,m:Integer); -2
Procedure CreateHFunceEdit(n,m:Integer); -3

مجموعة أقواس الدخل من أجل الإجراء (1)، و مجموعة أقواس الخرج من أجل الإجراء (2)، ومجموعة أقواس المنع من أجل الإجراء (3)، أعداد صحيحة موجبة تمثل التعددية المرافقة لكل من أقواس الدخل والخرج والمنع في الإجراءات (1) و(2) و(3) على التوالي.

↓

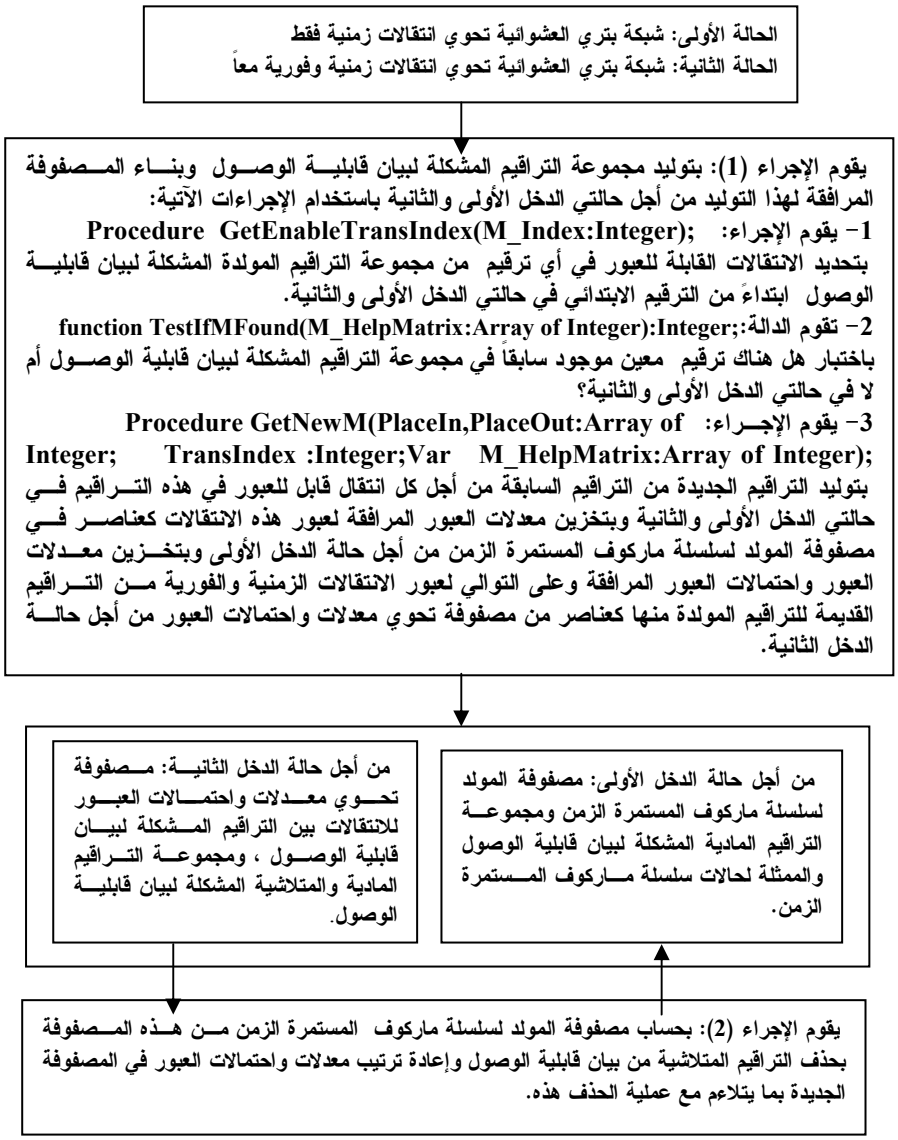
يقوم الإجراء (1): بتحديد التعددية المرافقة لأقواس الدخل والإجراء (2): بتحديد التعددية المرافقة لأقواس الخرج والإجراء (3): بتحديد التعددية المرافقة لأقواس المنع

↓

الإجراء (1): مصفوفة من الأعداد الصحيحة الموجبة تمثل مصفوفة التعدديات المرافقة لأقواس الدخل، والإجراء (2) : مصفوفة من الأعداد الصحيحة الموجبة تمثل مصفوفة التعدديات المرافقة لأقواس الخرج، والإجراء (3): مصفوفة من الأعداد الصحيحة الموجبة تمثل مصفوفة التعدديات المرافقة لأقواس المنع.

- الإجراءان :

Procedure GenerateQMat; -1
Procedure MakeRealQ; -2



- الإجراءات:

```
Function SerchTree(Index:Integer;var Node:PTree):Boolean;      -1
Procedure CountDeptHNode(P:Ptree;var S:Integer);               -2
Procedure DrawTree(P:PTree;Stop,SLeft,Wd:Integer);             -3
Procedure ExecDraw(Owner:TImage);                              -4
Procedure PrintTree(P:PTree);                                  -5
Procedure ClearTree(P:PTree);                                  -6
```

مجموعة التراقيم المشكلة لبيان قابلية الوصول، و الانتقالات القابلة للعبور في هذه التراقيم

↓

تقوم الدالة(1) و مجموعة الإجراءات(2) و(3) و(4) و(5) و(6) ببناء الشجرة الممثلة لبيان قابلية الوصول وإظهارها على الشاشة

↓

بيان قابلية الوصول لنموذج شبكة بتري العشوائية مرسوماً بشكل شجرة ثنائية

- الإجراء: Procedure SolvEquation;

مصفوفة المولد لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن، وقيمة مقياس التقارب وعدد خطوات التكرار المثبتة من أجل حساب وسيط الاسترخاء في طريقة الاسترخاء.

↓

يقوم هذا الإجراء بحساب الحل المستقر لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن باستخدام إحدى الطرائق العددية الآتية:

1- طريقة غاوس: باستخدام الإجراء: Procedure GaussianSolv عندما يكون المتحول المنطقي(Mode) لهذا الإجراء محققاً (True).

2- طريقة غاوس مع ارتكاز جزئي: باستخدام الإجراء المستخدم نفسه من أجل طريقة غاوس، ولكن عندما يكون المتحول المنطقي (Mode) لهذا الإجراء غير محقق (False).

3- طريقة التحليل إلى عوامل باستخدام الإجراء: Procedure DolittleSolv;

4- طريقة الاسترخاء وغاوس-سيدل باستخدام الإجراء : Procedure SOR SolveMat;

↓

الحل المستقر لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن

- الدالات:

```
Function Get_Q_Max_Value:Real;                    -1
Procedure Get_P_Matrix;                           -2
Function  Get_R_Cut(T_Value:Real):Integer;        -3
Function Get_L_Cut(T_Value:Real):Integer;         -4
Function Get_R_Cut_T(T_Value:Real):Integer;       -5
```

مصفوفة المولد لسلسة ماركوف المستمرة الزمن من أجل الدالة(1) والإجراء(2)، و معدل الانتظام من أجل الإجراء(2) والدالات(3) و(4) و(5) ، وقيم عددية حقيقية تمثل قيم الزمن التي نريد حساب الحل العابر والاحتمالات التراكمية عندها من أجل الدالات (3) و(4) و(5) ، قيمة الخطأ المحدد مسبقاً لنقطة القطع اليمنى من أجل الدالة (3) وقيمة الخطأ المحدد مسبقاً لنقطة القطع اليسرى من أجل الدالة (4)، وقيمة الخطأ المحدد مسبقاً من أجل نقطة القطع اليمنى الخاصة بالاحتمالات التراكمية من أجل الدالة(5).

↓

تقوم الدالة(1): بحساب معدل الانتظام وهو أكبر عناصر القطر الرئيس لمصفوفة المولد، والإجراء (2): بحساب مصفوفة احتمال الانتقال ذات الخطوة الواحدة لسلسلة ماركوف المنفصلة الزمن والموافقة لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن، وتقوم الدالتان (3) و (4) وعلى التوالي: بحساب نقطتي القطع اليمنى واليسرى من أجل الحل العابر، والدالة (5) بحساب نقطة القطع اليمنى من أجل الاحتمالات التراكمية.

↓

الدالة (1): معدل الانتظام ، والإجراء(2): مصفوفة احتمال الانتقال ذي الخطوة الواحدة لسلسلة ماركوف المنفصلة الزمن، الدالتان (3) و(4): عددان صحيحان موجبان يمثلان وعلى التوالي نقطتي القطع اليمنى واليسرى من أجل الحل العابر والدالة (5): عدد صحيح موجب يمثل نقطة القطع اليمنى من أجل الاحتمالات التراكمية.

- الإجراء: Procedure Calc_Psai(T_Value:Real);

قيمتا نقطتي القطع اليمنى واليسرى، و معدل الانتظام، وقيم حقيقية تمثل قيم الزمن التي نريد حساب الحل العابر عندها

↓

يقوم هذا الإجراء بحساب الاحتمالات البواسونية

↓

الاحتمالات البواسونية

- الإجراءات :

1- Procedure Calc_V_Value(T_Value:Real);
2- Procedure Calc_VJ_Value(T_Value:Real);
3- Procedure Calc_VT_Value(T_Value:Real);

معدلات الانتظام الخاصة وعلى التوالي بسلسلة ماركوف المستمرة الزمن من أجل الحالة العادية والضخمة والحالة التراكمية من أجل الإجراءات (1) و(2) و(3)، وقيم عددية حقيقية تمثل الزمن ، ونقطتي القطع اليمنى واليسرى من أجل الإجراءين (1) و(2) ، ومتجه الاحتمال الابتدائي، و مصفوفة الاحتمال لسلسلة ماركوف المنفصلة الزمن من أجل الإجراءات (1) و(2) و (3)، و نقطة القطع اليمنى و قيم الزمن الخاصة بالحالة التراكمية من أجل الإجراء (3).

↓

يقوم الإجراء (1): بحساب متجه احتمال الحالة لسلسلة ماركوف المنفصلة الزمن الموافقة لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن من أجل الحالة العادية والإجراء (2): بحساب متجه احتمال الحالة الثابت لسلسلة ماركوف المنفصلة الزمن الموافقة لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن من أجل الحالة الضخمة مع حساب نقطة تقارب هذا المتجه ، والإجراء (3): بحساب متجه احتمال الحالة الثابت لسلسلة ماركوف المنفصلة الموافقة لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن من أجل الحالة التراكمية مع حساب نقطة تقارب هذا المتجه.

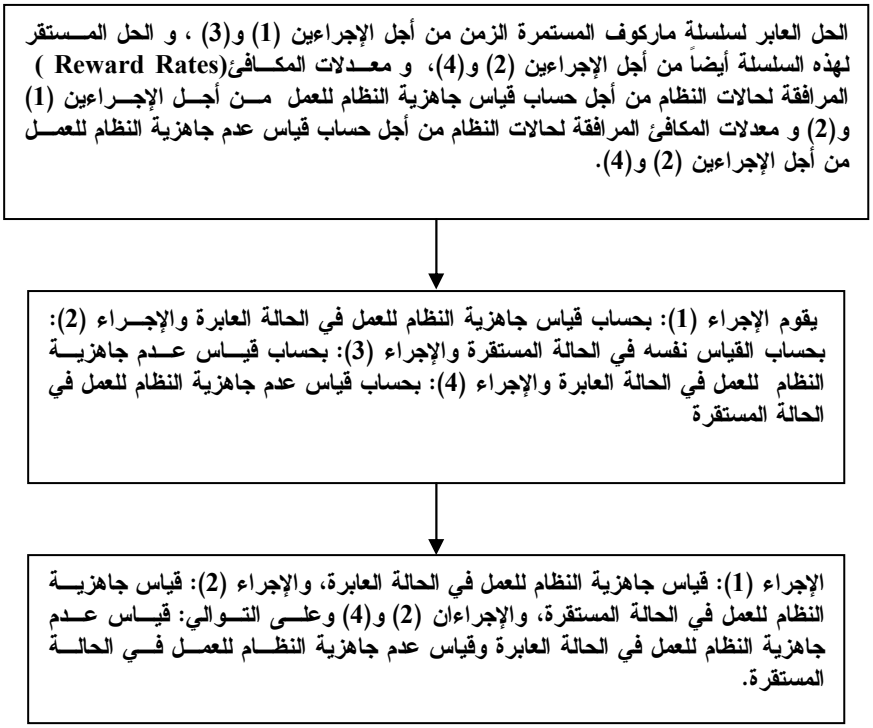
↓

الإجراء(1): متجه احتمال الحالة لسلسلة ماركوف المنفصلة الزمن الموافقة لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن من أجل الحالة العادية، والإجراء(2): متجه احتمال الحالة الثابت لسلسلة ماركوف المنفصلة الزمن الموافقة لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن من أجل الحالة الضخمة وعدد صحيح موجب يمثل نقطة تقارب هذا المتجه، والإجراء (3): متجه احتمال الحالة الثابت لسلسلة ماركوف المنفصلة الزمن الموافقة لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن من أجل الحالة التراكمية.وعدد صحيح موجب يمثل نقطة تقارب هذا المتجه

- الإجراء : Procedure Solve_Markof_String(T_Value: Real);

- الإجراءات :

Procedure Calc_AA_Value(T_Value:Real); -1
Procedure Calc_AM_Value; -2
Procedure Calc_UAA_Value(T_Value:Real); -3
Procedure Calc_UAM_Value; -4



- الإجراءات:

```
Procedure Calc_RT_Value(T_Value:Real);      -1
Procedure Calc_RM_Value;                    -2
Procedure Calc_URT_Value(T_Value:Real);     - 3
Procedure Calc_URM_Value;                   ;  -4
```

الحل العابر لسلسة ماركوف المستمرة الزمن للإجراءين (1) و(3) والحل المستقر لهذه السلسلة أيضاً من أجل الإجراءين (2) و(4) ومعدلات المكافئ المرافقة لحالات النظام عند حساب قياس وثوقية هذا النظام من أجل الإجراءين (1) و(2) ومعدلات المكافئ المرافقة لحالات النظام عند حساب قياس لاوثوقية هذا النظام من أجل الإجراءين (3) و(4).

↓

يقوم الإجراء (1): بحساب قياس وثوقية نظام في الحالة العابرة والإجراء (2): بحساب القياس نفسه في الحالة المستقرة، والإجراء (3) : بحساب قياس لاوثوقية النظام في الحالة العابرة والإجراء(4): بحساب القياس نفسه في الحالة المستقرة

↓

الإجراء(1) : قياس وثوقية النظام في الحالة العابرة ، والإجراء (2): القياس نفسه في الحالة المستقرة والإجراء (3) : قياس لاوثوقية نظام في الحالة العابرة والإجراء (4) القياس نفسه في الحالة المستقرة.

- الإجراءات:

```
Procedure Calc_HA_Value(T_Value:Real);      -1
Procedure Calc_HM_Value;                    -2
Procedure Calc_KA_Value(T_Value:Real);      -3
Procedure Calc_KM_Value;                    -4
Procedure Calc_UA_Value (T_Value:Real);     -5
Procedure Calc_UM_Value;                    -6
```

الحل العابر لسلسلة ماركوف المستمرة الزمن من أجل الإجراءات (1) و(3) و(5) والحل المستقر من أجل الإجراءات (2) و (4) و(6)، ومعدلات المكافئ المرافقة لحالات النظام عند حساب قياس إنتاجية(Throughput) هذا النظام من أجل الإجراءين (1) و(2)، ومعدلات المكافئ المرافقة لحالات النظام عند حساب قياس العدد المتوسط للمستثمرين في النظام من أجل الإجراءين (3) و(4) ومعدلات المكافئ المرافقة لحالات النظام عند حساب قياس استخدام النظام من أجل الإجراءين (5) و(6).

↓

يقوم الإجراء(1) : بحساب قياس إنتاجية النظام في الحالة العابرة والإجراء (2): بحساب القياس نفسه في الحالة المستقرة والإجراءان (3) و(4) وعلى التوالي: بحساب قياسي العدد المتوسط للمستثمرين في النظام في الحالتين العابرة والمستقرة والإجراءان (5) و(6) وعلى التوالي: بحساب قياسي استخدام النظام في الحالتين العابرة و المستقرة.

↓

الإجراء(1) : قياس إنتاجية النظام في الحالة العابرة والإجراء (2): القياس نفسه في الحالة المستقرة والإجراء (3): قياس العدد المتوسط للمستثمرين في النظام في الحالة العابرة والإجراء (4): القياس نفسه في الحالة المستقرة والإجراءان (5) و (6) وعلى التوالي: قياس استخدام النظام في الحالتين العابرة والمستقرة .

- الإجراءان: 1- Procedure Calc_TA_Value(T_Value:Real);
  2- Procedure Calc_TM_Value;

قياس إنتاجية النظام وقياس العدد المتوسط للمستثمرين في النظام في الحالة العابرة من أجل الإجراء (1)، وقياس إنتاجية النظام وقياس العدد المتوسط للمستثمرين في النظام في الحالة المستقرة من أجل الإجراء (2)

↓

يقوم كل من الإجراءين (1) و(2) وعلى التوالي: بحساب قياس زمن الاستجابة المتوسط (Mean Response Time) في النظام في الحالتين العابرة والمستقرة

↓

الإجراء (1): قياس زمن الاستجابة المتوسط في النظام في الحالة العابرة والإجراء (2): القياس نفسه في الحالة المستقرة.

رابعاً– حل مثال باستخدام الأداة:

سندرس أحد أنظمة تقانة الاتصال المعروف باسم " الاتصال عند الطلب مع التحرير المتأخر" [1]
(On Demand Connection with Delayed Release " OCDR ")
والذي ينظم الاتصال بين المصدر والهدف وينشئه قبل إرسال الحزم في الشبكات الموجهة الاتصال (Connection-Oriented Networks) كنمط الاتصال غير المتزامن(Asynchronous Transfer Mode) (ATM) مثلاً وتعمل هذه التقانة وفقاً لما يأتي: يكون الاتصال منشأً عندما تصل الحزمة الأولى إلى النظام وتنتظر من أجل إرسالها وبعد أن ترسل الحزمة السابقة التي كانت موجودة في مكان الانتظار في النظام فإن الاتصال يكون محجوزاً لفترة معينة وفي هذه الفترة إذا لم تصل حزمة جديدة فإن الاتصال يكون محرراً.

فإذا فرضنا أن الحزم تصل إلى النظام وفقاً لأزمنة وصول موزعة بواسونياً(Poisson) مع المعدل λ وأن الحزم ترسل وفقاً لأزمنة موزعة أسياً مع المعدل μ وأن الاتصال يكون منشأً من أجل إرسال الحزم الموجودة في مكان الانتظار في النظام وبعد فترة من الزمن يكون محرراً وفقاً لأزمنة إنشاء وتحرير موزعة أسياً مع المعدلين c و r على التوالي. والمطلوب تصميم نظام الاتصال هذا مع عدد حزم يساوي إلى k=3 و بحيث يجب أن يحقق هذا التصميم الممثل للنظام ما يأتي:

1– إنتاجية النظام في الحالة المستقرة تساوي 46.586840.

2– العدد المتوسط للحزم المنتظرة في النظام من أجل إرسالها في الحالة المستقرة يساوي 0.44638

3– زمن الاستجابة المتوسط في النظام في الحالة المستقرة يساوي 0.00958.

4– استخدام النظام في الحالة المستقرة يساوي 0.19740

5– يجيب هذا التصميم عن الأسئلة الآتية:

i. ما الزمن الذي يستغرقه النظام ليصل لحالته المستقرة.
ii. ما قيمة إنتاجية النظام من أجل بعض القيم الخاصة للزمن قبل أن يصل النظام لحالته المستقرة.
iii. ما قيمة العدد المتوسط للحزم في النظام من أجل بعض القيم الخاصة للزمن قبل أن يصل النظام لحالته المستقرة .
iv. ما قيمة زمن الاستجابة المتوسط في النظام من أجل بعض القيم الخاصة للزمن قبل أن يصل النظام لحالته المستقرة.
v. ما قيمة استخدام النظام من أجل بعض القيم الخاصة للزمن قبل أن يصل النظام لحالته المستقرة.
vi. عين k التي يجب أن تكون من أجلها إنتاجية النظام في الحالة المستقرة تساوي /50/ .

مع العلم بأن القيم العددية لوسطاء النظام تكون معطاة في الجدول الآتي:

وسيط النظام	r	c	μ	λ
القيمة العددية	0.5	5	236	50

آ- النموذج الأولي:

المرحلة الأولى:

أولاً: نقوم بتحديد متطلبات النظام بدقة لمعرفة نوع النموذج المستخدم (نموذج يمثل أداء نظام، نموذج يمثل وثوقية نظام أو نموذج يمثل جاهزية نظام للعمل) والنموذج هنا هو نموذج أداء ومتطلبات النظام هنا هي البنود (1) ،(2)،(3) ،(4) و(5) من المثال بعد ذلك نحدد القياسات المطلوبة بدقة ونعرفها بناء على المتطلبات السابقة وهي:

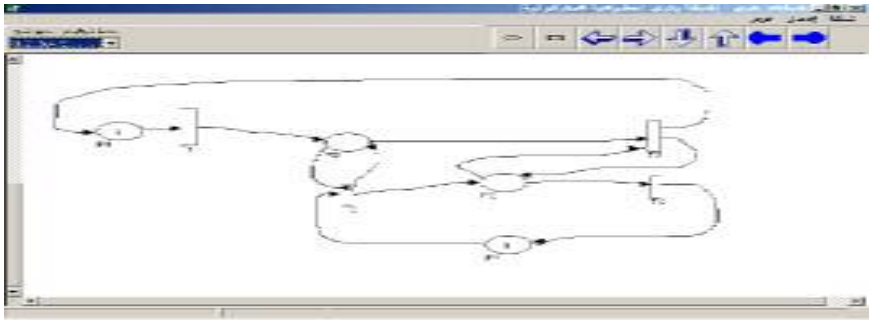
1- إنتاجية النظام: هي العدد المتوسط للحزم في النظام والتي تمّ إرسالها و يرمز لها في الحالة المستقرة بـــ H وفي الحالة العابرة بـــ $H(t)$.

2- العدد المتوسط للحزم في النظام: وهو عدد الحزم الموجودة في النظـــام والتـــي تكون منتظرة من أجل إرسالها.ويرمز له في الحالة المستقرة بـــ K وفي الحالة العابرة بـــ $K(t)$.

3- زمن الاستجابة المتوسط في النظام: وهو الزمن الذي تستغرقه الحزمـــة مـــن لحظة وصولها إلى النظام حتى تكون مرسلة ويرمز له في الحالة المستقرة بـــ T وفي الحالة العابرة بـــ $T(t)$.

4- استخدام النظام: هو مقدار إفادة المستخدم من النظام ويرمز لـــه فـــي الحالـــة المستقرة بـــ U وفي الحالة العابرة بـــ U(t).

ثانياً: نقوم بتوصيف النظام بنموذج شبكة بتري العشوائية المناسب ثم نقوم بإدخال هذا النموذج إلى الأداة فنحصل على نموذج شبكة بتري العشوائية الممثل لنظام الاتصال المدروس كما في الشكل الآتي:



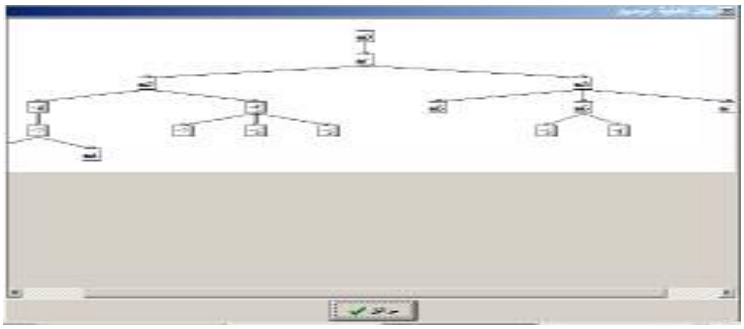
ويكون تفسير كل عنصر في نموذج شبكة بتري العشوائية هذا موضحاً في الجدول الآتي:

عنصر نموذج شبكة بتري العشوائية	التفسير
المكان p_1	يمثل الأمكنة الخالية في مكان التخزين المؤقت في النظام.
المكان p_2	يمثل مكان انتظار الحزم في النظام من أجل إرسالها.
المكان p_3	يمثل كون الاتصال منشأ من أجل إرسال الحزم.
المكان p_4	يمثل كون الاتصال غير منشأ.
الانتقال t_1	يمثل وصول الحزم إلى النظام .
الانتقال t_2	يمثل إرسال الحزم .
الانتقال t_3	يمثل إنشاء الاتصال.
الانتقال t_4	يمثل تحرير الاتصال.

المرحلة الثانيـــة: مرحلة توليد سلسلة ماركوف المستمرة الزمن: تقوم الأداة بإنجـــاز هذه المرحلة والمراحل التي تليها وتكون مصفوفة المولد التي تمثل سلسلة مـــاركوف المستمرة الزمن الموافقة لنموذج شبكة بتري العشوائية مظهرة في الشكل الآتي:

و مجموعة التراقيم المشكلة لبيان قابلية الوصول لهذا النموذج مبينة في الشكل الآتي:

أما بيان قابلية الوصول له فيكون مرسوماً بشكل شجرة ثنائية كما في الشكل:



المرحلة الثالثة: مرحلة إيجاد الحل العابر والحل المستقر لسلسلة ماركوف المـــستمرة الزمن: يكون الحل المستقر محسوباً بطريقة غاوس كما في الشكل الآتي:

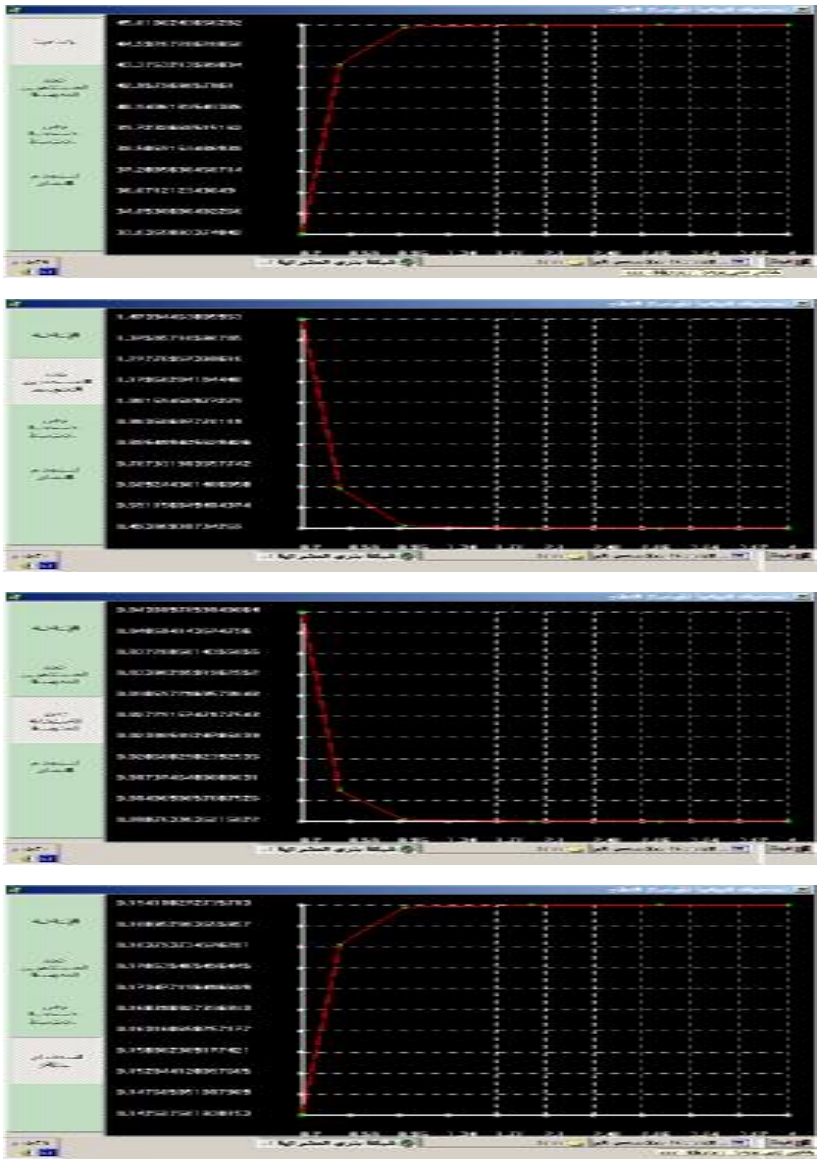
أما بالنسبة للحل العابر فنقوم بإدخال قيم الزمن التي نريد حساب الحل العابر عنـــدها، كما ندخل قيمة Er و El على التوالي وهما قيمتا الخطأ المقدر من نقطتي القطع اليمنى واليسرى r و l (Right and Left Truncation Points) والمستخدمة فـــي طريقـــة الانتظام، وتكون Er=El=0.00005 من أجل جميع قيم الزمن المدخلة عند حـــساب هذا الحل، وتكون قيم الحل العابر الموافقة لقيم الزمن التي قمنا بإدخالها حتـــى قيمـــة الزمن التي تصبح عندها مركبات هذا الحل متطابقة تقريباً مع مركبات الحل المستقر مظهرة في الأشكال المتعاقبة الآتية:

الحل المستقر
الحل العابر
PI 0(t) 0.007047346786191 91
PI 1(t) 0.007774636404724 81
PI 2(t) 0.007360876796139 5
PI 3(t) 0.150969418003735
PI 4(t) 0.079111905183761 9
PI 5(t) 0.033727857122327 1
PI 6(t) 0.706152585740886
PI 7(t) 0.008805009400336 49
طريقة الحل
منتظمة
عادية
تراكمية
أدخل قيمة الزمن
زمن جديد
أدخل قيمة Br
أدخل قيمة El
زمن التنفيذ
00:00
إظهار الحل
إظهار القياسات
موافق

الحل المستقر
الحل العابر
PI 0(t) 0.007084978361238 1
PI 1(t) 0.007819130542424 62
PI 2(t) 0.007415360647668 97
PI 3(t) 0.151660531045818
PI 4(t) 0.079026387010457 3
PI 5(t) 0.033776624670246 6
PI 6(t) 0.708497842469681
PI 7(t) 0.008727117019548 04
طريقة الحل
منتظمة
عادية
تراكمية
أدخل قيمة الزمن
زمن جديد
أدخل قيمة Br
أدخل قيمة El
زمن التنفيذ
00:00
إظهار الحل
إظهار القياسات
موافق

المرحلة الرابعة: حساب القياسات و مقارنة نتائج القياسات مع متطلبات التصميم: تكون نتائج القياسات المصممة للنظام المدروس في الحالتين العابرة والمستقرة وفقاً لنموذج شبكة بتري العشوائية كما هي محسوبة بواسطة الأداة مرتبة في الجدولين الآتيين:

والمنحنيات البيانية الموافقة لكل قياس من القياسات السابقة والمرسومة بالنسبة للزمن لها الأشكال الآتية:



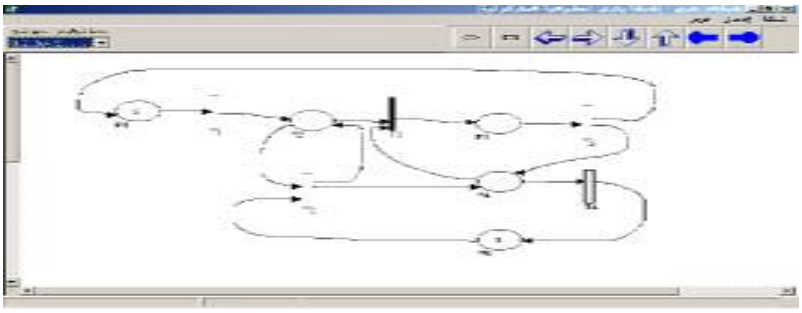
أما قيمة k والتي تكون عندها إنتاجية النظام في الحالة المستقرة تساوي خمسين فتكون محسوبة بواسطة الأداة وهي $k = 280$ حزمة.

بعد ذلك نقوم بمقارنة نتائج القياسات مع متطلبات التصميم فنلاحظ أن هذه النتائج لا تحقق المتطلبات لذلك نعود للمرحلة الأولى.

ب- نموذج شبكة بتري العشوائية بعد التعديل:

المرحلة الأولى:

نقوم بتعديل نموذج شبكة بتري العشوائية بأن نضيف إليه انتقالاً فورياً واحداً هو t_5 ومكاناً جديداً هو p_5 فيصبح نموذج شبكة بتري العشوائية الذي يمثل النظام بعد التعديل له الشكل الآتي:

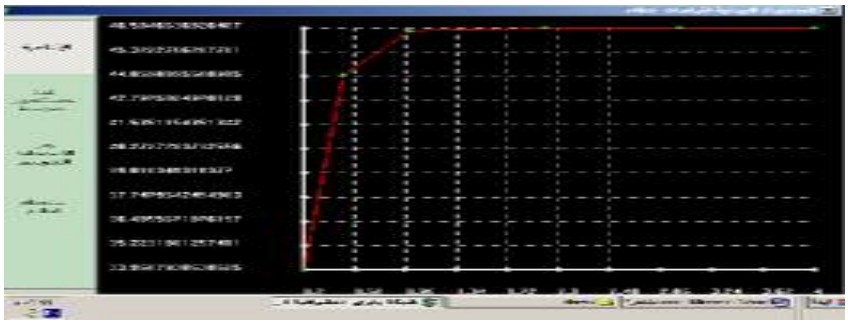


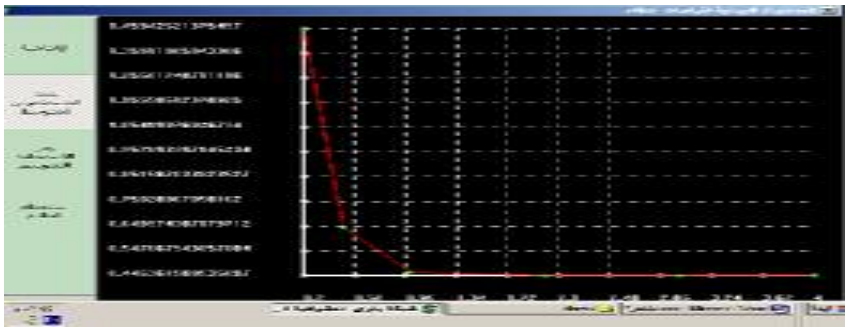
ويضاف إلى الجدول الذي يفسر كل عنصر في نموذج شبكة بتري العشوائية بعد التعديل ما يأتي:

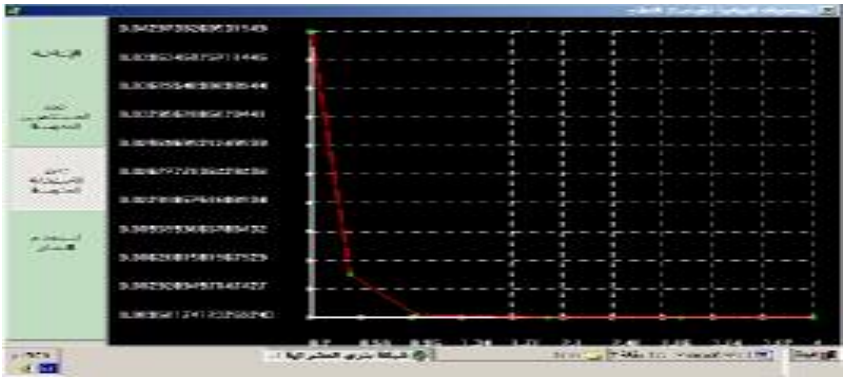
عنصر نموذج شبكة بتري العشوائية	التفسير
المكان p_3	يمثل الحزمة التي تكون مرسلة حالاً.
المكان p_4	يمثل كون الاتصال منشأ.
المكان p_5	يمثل كون الاتصال غير منشأ.
الانتقال t_5	يمثل بدء إرسال الحزم.

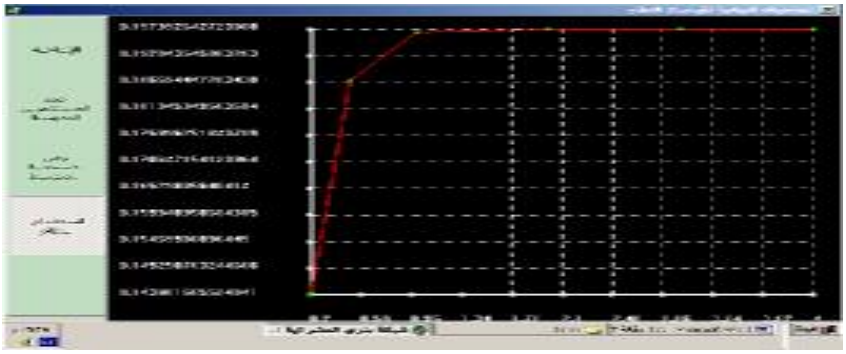
وتكون نتائج القياسات المصممة للنظام المدروس في الحالتين المستقرة والعابرة وفقاً لنموذج شبكة بتري العشوائية المعدل كما هي محسوبة بواسطة الأداة مرتبة في الجدولين الآتيين:

والمنحنيات البيانية الموافقة لهذه القياسات مبينة في الأشكال الآتية:









أما قيمة k التي تكون عندها إنتاجية النظام في الحالة المستقرة تساوي خمسين فهي k=270 حزمة.

بعد ذلك نقارن بين نتائج القياسات ومتطلبات التصميم فنلاحظ أن :

1- نتائج القياسات في الحالة المستقرة تساوي إلى متطلبات التصميم (1) ،(2) ،(3) و(4).

2- نتائج القياسات في الحالة العابرة تجيب عن الأسئلة المطروحة عن النظام والمتضمنة في (5)، كما أن الزمن الذي يستغرقه النظام حتى يصل لحالته المستقرة يكون من أجل ($t \geq 4$)، فضلاً عن ذلك من أجل k=270 فإن إنتاجية النظام تساوي خمسين.

ومن ثَمَّ فإن هذا النموذج يكون التصميم الأمثل لنظام الاتصال هذا لأنه يحقق جميع متطلبات التصميم.

خامساً– الاستنتاجات وآفاق التطوير المستقبلي:

استعرضنا في هذا البحث طريقة تقييم الأداء المبنية على نموذج شبكة بتري العشوائية. وقمنا باختيار هذه الطريقة في بحثنا كطريقة من أجل الوصول للتصميم الأمثل للأنظمة المنتهية الحالة الماركوفية لأننا وجدنا أنّها الأفضل من حيث الكلفة الحسابية والزمنية.

قمنا كذلك ببناء أداة برمجية تنفذ مراحل هذه الطريقة بشكل آلي، بحيث يتم تحديد متطلبات النظام بدقة وتوصيفه بنموذج شبكة بتري العشوائية من قبل المستثمر، ومن ثم إدخال هذا النموذج إلى الأداة بواسطة محرر (Editor) خاص بهذه الأداة تم تصميمه لهذه الغاية، وبعدئذ تقوم الأداة بعملية التحويل الآلي من نموذج شبكة بتري العشوائية إلى سلسلة ماركوف مستمرة الزمن الموافقة له، وإيجاد الحلين العابر والمستقر لهذه السلسلة، ومن ثم إيجاد القياسات المصممة للنظام.

وقد اختصرت هذه الأداة وقتاً وجهداً كبيرين كانا يتطلبهما الحل التقليدي غير الآلي، فضلاً عن ذلك فإنها أكثر دقة من الحل اليدوي وعملية استخدامها سهلة، ويمكن تطبيقها عملياً من أجل تصميم أي نظام منتهي الحالة وماركوفي حتى لو كان كبيراً ومتطلباته معقدة.

إن تطوير أداتنا البرمجية بحيث يمكن تطبيقها على الأنظمة غير الماركوفية سيعطيها تعميماً شاملاً وقابلية عامة للاستخدام لتقييم أداء جميع أشكال الأنظمة خاصة إذا تضمنت مزيداً من طرائق الحل العددية الفعالة التي تأخذ بالحسبان التقليل الممكن لأزمنة الحساب والتخزين.

المراجع

1- Bolch G. ,Greiner S. , Meer H. and Trivedi K. S. ,Queueing Networks and Markov Chains Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications, John Wiley & Sons, INC., New York, (1998).
2- Bobbio A. ,Puliafito A. and Tekel M, A Modeling Framework to Implement Preemption Policies in Non-Markovian SPNs, IEEE Trans. On Software Engineering, Vol. 26, No. 1, pp.36-53, January (2000).
3- Balbo G. ,Bruell S. C. and Sereno M., Product Form Solution for Generalized Stochastic Petri Nets, IEEE Trans. On Software Engineering, Vol. 28, No. 10,pp. 915-933, Octo. (2002).
4- German R., Performance Analysis of Communication Systems Modeling with Non – Markovian Stochastic Petri Nets, John Wiley & Sons LTD, New York, (2000).
5- Haverkort B. R., Performance of Computer Communication Systems A Model- Based Approach, John Wiley & Sons, Ltd, New York, (1998)
6- Heindl A. and German R., A Fourth-Order Algorithm with Automatic Stepsize Control for the Transient Analysis of DSPNs, IEEE Trans. On Software Engineering, Vol. 25, No. 2, pp. 194- 206, March/April (1999).
7- Henderson W. and Taylor P. G., Embedded Processes in Stochastic Petri Nets, IEEE Trans. On Software Engineering, Vol. 17, No. 2,pp. 108-116,February (1991).
8- Horvath A. and Telek M., Time Domain Analysis of Non-Markovian Stochastic Petri Nets with PRI Transitions, IEEE Trans. On Software Engineering, Vol. 26, No. 10, pp. 933-943, Octo. (2002).
9- Reibman A. and Trivedi K., Numerical Transient Analysis of Markov Models, Computers and Operation Research, Vol. 15, No. 1,pp. 19-36, (1988).
10- Stewart W., Introduction to Numerical Solution of Markov Chains, Princeton University Press, Princeton, N.J., (1994)

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق2004/9/21.