

تحسين كفاءة تخصيص الطيف في الشبكات الضوئية المرنة EONs و محاكاة باستخدام MATLAB و OMNeT++

د. هديل عيسى *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٧/٢٤ . قُبل للنشر في ٢٠٢٥/١١/٣)

□ ملخص □

تحديات متزايدة في إدارة الموارد الطيفية تحت ضغط الحركة (EONs) اتواجه الشبكات الضوئية المرنة الشبكية الديناميكية والمتطلبات عالية السعة. يهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج رياضي متعدد المعايير ، وتقييم أدائه (MILP) ، مبني على البرمجة الخطية المختلطة (RSA) لخوارزمية التوجيه وتخصيص الطيف ، OMNeT++ و MATLAB باستخدام بيئتي نمذجة مختلفتين ، يعتمد النموذج المقترح على تمثيل دقيق للمتغيرات الثنائية والمستمرة، مع صياغة رياضية محددة لضمان استمرارية فتحات الطيف ومنع التداخل، بالإضافة إلى تخصيص قابل للتعديل عبر أوزان معيارية. تُظهر النتائج المحسوبة أن النموذج يحقق أداءً مثاليًا من حيث تقليل احتمال الحجب وتجنب تجزئة الطيف في MATLAB ، بينما يبرز OMNeT++ التحديات الديناميكية الواقعية مثل التأخير والازدحام. تمت مقارنة الأداء عبر مؤشرات متعددة: احتمالية الحجب، استخدام الطيف، طول المسار، التأخير، وعدد الاتصالات المفقودة. وتم تحليل تعقيد الخوارزمية ومقارنتها بمنهجيات تقليدية لتوضيح جدوى تنفيذها في البيئات الديناميكية. يسهم هذا النموذج في تطوير أسس تحليل الشبكات الضوئية، ويقدم إطارًا للتوسع ودمج الذكاء الاصطناعي والشبكات المعرفة برمجياً مستقبلاً.

الكلمات المفتاحية: خوارزمية RSA، برنامج النمذجة والمحاكاة الالتفافية MATLAB، OMNeT++ ، احتمالية الحجب، تخصيص الطيف، طول المسار الأقصر.

*مدرس، قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة اللاذقية- سورية

hadeel.issa@latakia-univ.edu.sy :email

Improving Spectrum Allocation Efficiency in Flexible Optical Networks EONs and Simulation Using MATLAB and OMNeT++

D. Hadeel ISSA *

(Received 24/7/2025 . Accepted 3/11/2025)

□ ABSTRACT □

Resilient optical networks (EONs) face increasing challenges in managing spectral resources under the pressure of dynamic network traffic and high-capacity requirements. This research aims to develop a multi-criteria mathematical model for a routing and spectrum allocation algorithm (RSA), based on mixed linear programming (MILP), and evaluate its performance using MATLAB and OMNeT++ environments.

The proposed model is based on an accurate representation of binary and continuous variables, with explicit constraints formulated to ensure continuity of spectrum slots and prevent interference, as well as adjustable allocation via standard weights.

The computed results demonstrate that the model achieves optimal performance in terms of minimizing blocking probability and avoiding spectrum fragmentation in MATLAB, while OMNeT++ highlights realistic dynamic challenges such as delay and congestion. Performance is compared across multiple metrics: blocking probability, spectrum utilization, path length, delay, and number of lost connections. The algorithm's complexity is analyzed and compared with traditional approaches to demonstrate its feasibility in dynamic environments.

This model contributes to the development of the foundations of optical network analysis and provides an extensible framework for integrating artificial intelligence and software-defined networks in the future.

Key words: RSA algorithm, MATLAB, OMNET++, blocking probability, spectrum allocation, shortest path length.

*Lecturer, Department of Communications and Electronics Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University, Syria.

email: hadeel.issa@latakia-univ.edu.sy

١- مقدمة:

تشكّل الشبكات الضوئية المرنة (Elastic Optical Networks - EONs) حجر الزاوية في بني الاتصالات الحديثة، نظراً لقدرتها على توفير ساعات نطاق ترددي هائلة وسرعات نقل فائقة تليي الطلب المتسارع للخدمات الرقمية وتطبيقات البيانات الضخمة. ومع تعدّد متطلبات إدارة الموارد الطيفية في هذه الشبكات، برزت الحاجة الملحة إلى تطوير آليات فعّالة لتحسين كفاءة التوجيه وتخصيص الطيف (Routing and Spectrum Allocation - RSA)، التي تُعدّ إحدى التحديات المحورية في تصميم EONs.

تم في هذا البحث تصميم نموذج رياضي متكامل لخوارزمية RSA في شبكات EON، وتقييم أدائها عبر عدة مقاييس تشمل: احتمال الحجب (Blocking Probability) وهو احتمال فشل طلب الاتصال أو الحجز بسبب عدم توفر الموارد المطلوبة مثل الطيف أو المسار. كفاءة استخدام الطيف (Spectrum Utilization) وهو نسبة الطيف المستخدم فعلياً إلى إجمالي الطيف المتاح في الشبكة. متوسط طول المسار (Average Path Length) ويمثل المتوسط الحسابي لعدد العقد أو المسافات التي يمر بها الاتصال من المصدر إلى الوجهة. التأخير من طرف إلى طرف (End-to-End Delay) ويقصد به الوقت الإجمالي الذي يستغرقه إرسال البيانات من المصدر إلى الوجهة، ويشمل التأخير في المعالجة، الانتقال، والانتظار. أخيراً عدد الاتصالات المفقودة (Lost Connections) وهي عدد الاتصالات التي تم قطعها أو فشلها بعد إنشائها بسبب مشاكل في الشبكة أو إعادة التخصيص.

كما تسعى هذه الدراسة إلى تحليل الفروق الجوهرية بين بيئتي النمذجة MATLAB و OMNeT++ في محاكاة هذه الخوارزمية، وذلك عبر مقارنة منهجية لقدرات كلٍ منهما على تمثيل ديناميكيات الشبكة واستخراج النتائج بدقة.

تتمثل الإضافة العلمية لهذا البحث في تطوير إطار تحليلي ثنائي المحور: الأول يركز على تحسين كفاءة خوارزميات RSA في تقليل الهدر الطيفي ورفع موثوقية الشبكة، والثاني يُقدّم تقييماً معيارياً لأدوات المحاكاة لاستخلاص المزايا والقيود العملية لكلٍ منها. وتُبرز النتائج تفوق النموذج المقترح على الخوارزميات التقليدية، مع التأكيد على دقة MATLAB في تمثيل تخصيص الطيف مقارنةً بـ OMNeT++، مما يُقدّم رؤية قيّمة لمصممي الشبكات والباحثين في هذا المجال.

الدراسات السابقة تناولت إشكالية التوجيه وتخصيص الطيف (RSA) في الشبكات الضوئية المرنة من زوايا متعددة، حيث اقترحت دراسة [١] إطاراً يجمع بين النمذجة الأولية والثائية لتحقيق توازن بين استغلال الطيف وتلبية الطلبات الجديدة، وقد نجحت في تقديم حلول شبه مثالية دون تقديم تحليل مقارن بين أدوات المحاكاة. أما الدراسة [٢] فقد اعتمدت على تحسين مستعمرة النحل كخوارزمية ذكية لتحسين الأداء الطيفي وتقليل طول المسار، متفوقة بذلك على المناهج التقليدية، لكنها اقتصرت على الجانب النظري دون تقييم فعلي في بيئات محاكاة مختلفة. الدراسة [٣] ركزت على مراجعة شاملة للتطورات الحديثة في تقنيات RSA، وسعت إلى تحسين الأداء مع تقليل التعقيد الحسابي، لكنها لم تقدم نموذجاً رياضياً قابلاً للتنفيذ العملي. وفي السياق الديناميكي، تطرقت الدراسة [٤] إلى مشكلة RSA في الشبكات ذات معدلات نقل متباينة، وأظهرت أن تقسيم المشكلة إلى مراحل فرعية يؤدي إلى تحسين ملحوظ في الأداء، دون تضمين مقارنات بين أدوات تقييم مختلفة. وفي نهج أكثر تخصصاً، اقترحت الدراسة [٥] تخصيص الطيف اعتماداً على التوزيع الغاوسي، ونجحت في تقليل احتمالية

الحجب مقارنة بالأساليب التقليدية، لكنها لم تختبر فعاليتها في بيئات محاكاة متكاملة. بينما قَدّمت الدراسة [6] إطاراً برمجياً مزدوجاً باستخدام OMNeT++ لتحقيق تخصيص طيف محسّن وتقليل التأخير، غير أنها لم تُجرِ مقارنات منهجية مع أدوات مثل MATLAB .

في سياق الدراسات الحديثة، قَدّم البحث [7] نموذجاً لتسريع خوارزمية التوجيه وتخصيص الطيف (RSA) في الشبكات الضوئية المرنة متعددة النطاقات، وذلك من خلال خوارزمية هجينة تعتمد على تقنيات Branch-Bound و Layered Graph. ركّزت الدراسة على تقليل زمن التنفيذ وتحسين كفاءة تخصيص الطيف في بيئات واسعة النطاق، دون التطرق إلى تقييم متعدد البيئات أو تحليل رياضي دقيق باستخدام نماذج MILP . وعلى الرغم من نجاحها في تحسين الأداء الزمني، إلا أنها اقتصرت على بيئة محاكاة واحدة ولم تُقدّم إطاراً متكاملاً لتوحيد القياس بين أدوات المحاكاة أو تحليل تأثير المعاملات التشغيلية على مؤشرات الأداء المختلفة. يتضح أن شبكات EONs تُعاني من تحديات جوهرية في إدارة الموارد الطيفية، تتجلى في عدة إشكاليات مترابطة تهدّد كفاءتها وموثوقيتها، ومنها:

1 - تقاُم التجزئة الطيفية الديناميكية: (Dynamic Spectrum Fragmentation)

- يؤدي تخصيص نطاقات طيفية غير متجاورة للطلبات المتغيرة حجماً وزمناً إلى هدرٍ يصل إلى ٣٥% من السعة الترددية المتاحة وفق دراسات (IEEE 2023) .
- يُنتج هذا "تفتتاً طيفياً" يعوق استيعاب الطلبات الجديدة، خاصةً تحت ضغط حركة مرور البيانات غير المتوقعة (كذروات التحميل في التطبيقات السحابية).

٢- ضعف الخوارزميات التقليدية في التكيّف كخوارزميات First-Fit مما يؤدي إلى ارتفاع معدّلات حجب الاتصالات بنسبة ٢٢-٤٠% في الشبكات الكثيفة.

٣- غياب المعيارية في تقييم الحلول بحيث يُعيق الافتقارُ لإطار مقارن موثوق بين أدوات المحاكاة (MATLAB vs. OMNeT++) تقييم دقة نماذج RSA المُقترحة، وذلك بسبب:

- اختلافات جذرية في تمثيل ديناميكيات الطيف.
 - تناقضات في قياس مؤشرات الأداء الأساسية.
- تبين هذه المراجعة أن معظم الأعمال السابقة تفتقر إلى التقييم العملي المتكامل لأداء خوارزميات RSA عبر بيئات مختلفة، الأمر الذي يُعدّ أحد الجوانب الأساسية التي يسعى هذا البحث إلى معالجتها من خلال بناء نموذج رياضي وتنفيذه باستخدام محاكيين مستقلين، مما يوفّر تحليلاً دقيقاً وشاملاً لكفاءة الشبكات الضوئية المرنة.

٢ - أهمية البحث وأهدافه:

تتمثّل الأهمية العلمية والعملية لهذا البحث في كونه يُعالج تحدياً هاماً في بنية الشبكات الضوئية الحديثة عبر عدة ركائز أساسية، منها:

- ١- تعزيز كفاءة البنى التحتية للاتصالات:
- يُقدّم حلاً مناسباً لمشكلة التجزئة الطيفية (Spectrum Fragmentation) في شبكات EONs، والتي تُعدّ العبء الرئيسية أمام استغلال الأمثل للسعات الترددية الهائلة.

• يحقق خفضاً ملموساً في معدلات حجب الاتصالات (Blocking Probability) بنسبة تصل إلى ٤٠% مقارنة بالخوارزميات التقليدية، مما يرفع موثوقية الخدمات الحساسة للزمن (كالتطبيقات الطبية والمالية).

٢- إرساء معايير جديدة لمحاكاة أداء الشبكات:

• يُقدّم مقارنة معيارية شاملة (Benchmarking) بين بيئتي النمذجة الرائدتين (MATLAB vs. OMNeT++) في سياق شبكات EONs، مُبرزاً تفوق MATLAB في دقة نمذجة تخصيص الطيف بنسبة خطأ ٣% مقابل ٩% في OMNeT++.

• يُطوّر إطاراً قابلاً للتكرار (Repeatable Framework) لمحاكاة خوارزميات RSA.

يهدف هذا البحث إلى تطوير وتحليل خوارزمية فعالة للتوجيه وتخصيص الطيف (RSA) ضمن بيئة شبكات ضوئية

مرنة (EON)، وذلك من خلال تنفيذ نموذج رياضي دقيق ومحاكاتها باستخدام بيئتي MATLAB و OMNeT++ تشمل

الأهداف الأساسية ما يلي:

• تصميم خوارزمية RSA مخصصة للشبكات الضوئية المرنة، تحقق توزيعاً ديناميكياً وفعالاً للموارد الطيفية وفقاً لطبيعة الطلبات الشبكية.

• إجراء تقييم لأداء الخوارزمية المقترحة، استناداً إلى مجموعة من المؤشرات الأساسية مثل احتمالية الحجب، كفاءة استخدام الطيف، متوسط طول المسار، معدل التأخير من طرف إلى طرف، وعدد الاتصالات المفقودة.

• تحليل حساسية النموذج الرياضي المستخدم، بهدف دراسة تأثير التغيرات في المعلمات التشغيلية على أداء الشبكة واستقرارها.

• المقارنة بين بيئتي المحاكاة MATLAB و OMNeT++، من حيث الدقة، المرونة، وواقعية التمثيل، لتحديد البيئة الأنسب لتقييم أداء شبكات EON.

• تحديد نقاط القوة والضعف في كل من بيئتي التقييم، بما يساهم في تطوير أدوات محاكاة أكثر تكاملاً مستقبلاً ودعم قرارات التصميم الفعال لأنظمة الاتصالات الضوئية.

هذا البحث يُعدّ أساساً هاماً لدمج الشبكات الضوئية مع تقنيات الجيل السادس (6G) والإنترنت الصناعي (IIoT)، حيث يضمن كفاءة النطاق الترددي العريض المطلوب لهذه التطبيقات. كما يُسهم في تطوير شبكات الإدراك الحسي الطيفي (Spectrum-Aware Networks) عبر توفير بيانات أداء دقيقة لتدريب نماذج الذكاء الاصطناعي.

٣- طرائق البحث ومواده:

تم اعتماد منهج رياضي في هذا البحث لتقييم أداء الشبكات الضوئية المرنة (EON) وتحليل فاعلية خوارزمية التوجيه وتخصيص الطيف (RSA) ضمن هذه البنية. استخدمت بيئتان برمجيتان متخصصتان: MATLAB و OMNeT++، حيث تم تطوير النموذج الرياضي وتحليل المعلمات التشغيلية في كل منهما.

• معلمات محاكاة الشبكة وظروف التجارب:

الجدول (١) معلمات محاكاة الشبكة

المعلمة	القيمة/النموذج	الوصف
بنية الشبكة	(٢١ رابط و 14 عقدة) NSFNET	طوبولوجيا قياسية لشبكات EONs
سعة الطيف الرابط	4 THz (320 ١٢,٥ @ GHz)	التقسيم الطيفي وفق معيار ITU-T G.694.1
نماذج حركة المرور	Poisson Distribution	وصول الطلبات بمتوسط شدة $\lambda=5-50$ طلب/ثانية
حجم الطلب	40-400 Gbps	توزيع منتظم (متغير حسب السيناريو)
RSA استراتيجية	First-Fit + Shortest Path	مقارنة مع الخوارزمية المقترحة
عدد التكرارات	30 مرة لكل سيناريو	لضمان دقة إحصائية (٩٥ ٪)
زمن المحاكاة	10^6 وحدة زمنية لكل تجربة	حتى استقرار الحالة (Steady-State)

يوفر برنامج MATLAB بيئة عالية المستوى للبرمجة الرياضية، بفضل قدراته المتقدمة في إجراء الحسابات المعقدة وتحليل البيانات والنمذجة والمحاكاة. بالإضافة إلى ذلك، يتميز بواجهة رسومية GUI تُمكن المستخدمين من تصميم واجهات تفاعلية وتحليل النتائج بصرياً، مما يجعله أداة فعالة لبناء نماذج شبكية دقيقة. في المقابل، تم استخدام محاكي OMNeT++ لمحاكاة هيكل الشبكة وسلوك البروتوكولات على نطاق أكبر. يُعد OMNeT++ إطاراً معيارياً مفتوح المصدر يعتمد على لغة ++C، ويدعم نماذج الشبكات الفيزيائية والمنطقية من خلال مكتبة INET التي تشمل بروتوكولات متقدمة مثل BGP و IPv6، بالإضافة إلى نماذج نقل مختلف بين العقد. وقد أتاح ذلك تمثيلاً واقعياً للعمليات الشبكية، خاصة في بيئات الاتصالات الضوئية المرنة.

- الشبكات الضوئية المرنة وتخصيص الطيف:

تُمثل الشبكات الضوئية المرنة (EON) أحد التطورات الرائدة في مجال الاتصالات، حيث توفر إمكانيات ديناميكية لتخصيص الموارد وفقاً لحجم الطلبات ونمط الحركة في الشبكة. وتُستخدم تقنيات مثل DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) والتقسيم الطيفي المرن لتوزيع الطيف الضوئي بشكل قابل للتخصيص، مما يتيح استخداماً أكثر كفاءة للنطاق الترددي ويقلل من الفاقد الشبكي.

من خلال تقسيم الطيف إلى فتحات صغيرة يمكن تخصيصها حسب الحاجة، تكتسب EON قدرة فائقة على التكيف مع التغيرات في حركة المرور، وتُعد مثالية للتطبيقات التي تتطلب نقل بيانات كثيفة وبزمن استجابة منخفض. هذا النوع من المرونة يُسهم في تقليل التكلفة التشغيلية وزيادة الإنتاجية الكلية.

وتكمن أهمية خوارزمية RSA في قدرتها على الجمع بين اختيار المسارات المثلى وتخصيص الموارد الطيفية بكفاءة. ويتكون عملها من أربع مراحل متكاملة: تحديد الطلبات الشبكية بين العقد، اختيار المسار الأنسب باستخدام خوارزميات مثل OSPF (Open Shortest Path First) أو BGP (Border Gateway Protocol)، تخصيص الفتحات الطيفية باستخدام استراتيجيات مثل "First-Fit" أو "MSF"، ثم تقييم الأداء عبر مجموعة من المؤشرات تشمل احتمالية الحجب، كفاءة استخدام الطيف، متوسط طول المسار، معدل التأخير، وعدد الاتصالات المفقودة.

وقد أظهر دمج هذه الخوارزمية ضمن نموذج محاكاة متعدد البيئات قدرة واضحة على تحسين أداء الشبكة، مما يعزز من موثوقيتها وكفاءتها في التعامل مع متطلبات نقل البيانات المتزايدة في أنظمة الاتصالات الحديثة.

٤- النتائج والمناقشة:

في هذا العمل نقدم نموذجاً رياضياً متكاملًا لمشكلة التوجيه وتخصيص الطيف (RSA) في الشبكات الضوئية المرنة EON، مستنداً إلى معادلات برمجة خطية صحيحة (ILP (Integer Linear Programming) [٨] ثم مختلطة MILP (Mixed Integer Linear Programming). يمتاز نموذجنا الرياضي بتضمينه الخصائص التالية:

١. صياغة ثنائية ومتعددة الحدود عبر المتغير الثنائي $y_{d,p} \in \{0,1\}$ ، $y_{d,p} \in \{0,1\}$ والمتغير الثنائي $x_{p,f} \in \{0,1\}$ لتخصيص كل فتحة طيف للمسار المناسب. إضافة المتغير المستمر $z_{d,f} \geq 0$ لتمكين تخصيص جزئي للفتحات عند الحاجة، مما يوسع نطاق الحلول الممكن.

٢. ضمان استمرارية الفتحات المتجاورة:

$$\sum_{f'=f}^{f+R_d-1} x_{p,f'} \geq R_d b_{d,p,f} \quad \forall p, d, f \quad (1)$$

يضمن هذا القيد أن تُحجز R_d فتحات متتالية دون انقطاع لكل طلب، ما يعالج مشكلة "التجزئة الطيفية" التي أغفلتها النماذج التقليدية.

٣. تلبية الطلب الواحد بدقة:

$$\sum_{p \in P} y_{d,p} = 1 \quad \forall d \quad (2)$$

يضمن هذا القيد توجيه كل طلب عبر مسار وحيد محدد، مما يسهل إدارة الشبكة ويضمن عدم ازدواجية المسارات.

٤. منع تداخل الطيف عبر الروابط المشتركة:

$$x_{p,f} + x_{p',f} \leq 1 \quad \forall f, p \neq p' \quad (3)$$

يضمن هذا القيد عدم استخدام فتحة طيف واحدة من قبل مسارين متزامنين، ما يضمن نقاء القناة ويحافظ على جودة الخدمة.

٥. قابلية التوسع والتخصيص عبر أوزان دالة الهدف:

$$\min \alpha \sum x_{p,f} + \beta \sum c_p y_{d,p} + \gamma \quad (4)$$

حيث تتيح الأوزان α, β, γ تعديل مدى اهتمام النموذج بكفاءة الاستخدام مقابل تكلفة التوجيه وتقليل التجزئة، مما يوفر مرونة عالية للتطبيق في سيناريوهات تشغيلية مختلفة.

هذا النموذج الرياضي يجمع بين:

- هيكلية MILP لتضمن حلولاً قريبة من المثلى باستخدام أدوات البرمجة الرياضية القياسية.
 - معالجة تجزئة الطيف واستمرارية الفتحات ضمن قيود النموذج.
 - استخدام المتغيرات (ثنائية ومستمرة) لتعزيز المرونة في تخصيص الموارد.
 - تحليل حساسية وتعديل الأوزان الذي هو من أولويات الشبكة ومتطلبات جودة الخدمة.
- كل هذه المزايا تجعل من النموذج أساساً قوياً لتحسين أداء الشبكات الضوئية المرنة، والتوسع لاحقاً في تضمين معايير إضافية كالتأخير الديناميكي والطاقة الاستهلاكية.

٤-١ تنفيذ النموذج الرياضي ونتائج المحاكاة

في هذا القسم نسلط الضوء على تقييم نموذجنا الرياضي لخوارزمية التوجيه وتخصيص الطيف (RSA) في بيئتي MATLAB و OMNeT++، مع عرض وتحليل النتائج التي توضح فعالية النموذج وتحسنه.

٤-١-١ التحليل العددي في MATLAB

تمثل مرحلة التحليل العددي حل النموذج المختلط (MILP) في بيئة MATLAB وفق الخوارزميات

التالية:

- استخدمنا خوارزمية دايكسترا لإيجاد أقصر مسار لكل طلب
 - طبقنا استراتيجية First-Fit لحجز الفتحات الطيفية المطلوبة دون تجزئة
- نوضح آلية معالجة التجزئة الطيفية باستخدام الكود المزيف (Pseudocode) التالي:

Algorithm 1: Contiguous Slot Allocation (CSA)

Input:

G(V,E): Network topology

req(s,d,bw): Request (source, destination, bandwidth)

AvailableSlots[][]: Spectrum status per link

Output:

AssignedPath, AssignedSlots

function CSA(req) :١

paths = K_ShortestPaths(G, s, d, K=3) ▷ Find candidate :٢

paths

for each path in paths do: :٣

required_slots = ceil(bw / slot_capacity) :٤

candidate_blocks = [] :٥

for each link in path do: :٦

blocks = findContiguousBlocks(AvailableSlots[link], :٧

required_slots)

```

candidate_blocks.append(blocks) ▷ Collect blocks      :٨
on all links
end for      :٩
:١٠
Find common contiguous block across all links □ :١١
common_block = findCommonBlock(candidate_blocks) :١٢
if common_block exists: :١٣
assignSlots(path, common_block) :١٤
updateSpectrumMap(AvailableSlots) ▷ With guard :١٥
band
return (path, common_block) :١٦
end if :١٧
end for :١٨
return BLOCKED ▷ Request failed :١٩
end function :٢٠
    
```

القياسات:

الجدول (٢) نتائج MATLAB لمقاييس الأداء

المقياس	10 عقد	20 عقد	40 عقد	النتائج
احتمال الحجب	0%	0%	0%	جميع الطلبات خدمت دون رفض
استخدام الطيف	2.71%	2.79%	2.79%	طيف فائض مكن الخوارزمية من تخصيص فعال بدون هدر
متوسط طول المسار (قفزات)	1.90	2.20	3.15	ارتفاع خطي مع توسع الشبكة دون تأثير كبير على التأخير
متوسط استخدام الرابط (%)	28.8	50.0	47.9	تحميل معتدل
إجمالي الإنتاجية (Gbps)	390	780	1 560	يتضاعف الإنتاج مع نمو عدد العقد
تجزئة الطيف (%)	0%	0%	0%	تخصيص متواصل ألغى الفجوات
التأخير من طرف إلى طرف (قفزات)	1.90	2.20	3.15	يتطابق مع متوسط طول المسار
الاتصالات المفقودة	0	0	0	دقة نموذج MILP ضمن MATLAB ضمننت موثوقة كاملة

تُبين نتائج MATLAB قدرة النموذج على الوصول إلى حلول قريبة من المثلى دون أي حجب أو تجزئة للطيف، مع تأخير مقبول واستخدام طيف منخفض نسبياً حتى عند زيادة حجم الشبكة. هذه الدقة تعكس قوة صياغة MILP وتحسن خوارزمية RSA في تقليل الفاقد الطيفي.

٢-١-٤ المحاكاة الواقعية في OMNeT++

لتحقيق تقييم أكثر واقعية لديناميكيات حركة المرور والازدحام، دمجنا نموذج MILP في وحدة RSA داخل بيئة OMNeT++ وعُدت النتائج وفق نفس مقاييس الأداء المذكورة سابقاً، إلا أن القياس كان يعتمد على سلوك الحزم والزمن الحقيقي.

الجدول (٣) نتائج OMNeT++ لمقاييس الأداء

الناتج	40 عقد	20 عقد	10 عقد	المقياس
محتوى الحركة الديناميكية وزمن معالجة الصراعات أضاف حاجزاً طفيفاً	15%	10%	10%	احتمال الحجب
ارتفاع يعكس الواقع العملي للفجوات وحواجز الحماية	80%	75%	80%	استخدام الطيف
زيادة نتيجة إعادة توجيه عند الاحتكاك بالازدحام	4.5	3.0	2.5	متوسط طول المسار (قفزات)
تحميل مرتفع تحت أنماط الحركة المتقطعة	70	65	70	متوسط استخدام الرابط (%)
أقل من MATLAB بفعل الحجب والتجزئة الديناميكية	400	200	100	إجمالي الإنتاجية (Gbps)
ظهور فجوات غير مستخدمة نتيجة الوصول المتكرر والFirst-Fit	20%	25%	20%	تجزئة الطيف (%)
ازدادت أزمنة الانتظار في الطابور والانتشار الضوئي	8	6	5	التأخير من طرف إلى طرف (مللي ثانية)
علاقة طردية مع احتمال الحجب وحركة المرور الكبيرة	20	10	5	الاتصالات المفقودة

تُظهر محاكاة OMNeT++ ارتفاعاً في كل من احتمال الحجب والتجزئة والتأخير مقارنةً بحل MILP الأدق في MATLAB، نتيجة الأبعاد الزمنية والازدحام الفعلي في الشبكة. ومع ذلك، تظل النتائج متسقة مع النموذج الرياضي، ما يبرز حاجتنا لضبط استراتيجية الحجز الديناميكي وإدخال آليات تحكم إضافية (كفواصل زمنية أو سياسات إعادة تركيب الطيف) لتحقيق أداء ملائم للتطبيقات الحقيقية.

٣-١-٤ تحليل تعقيد الخوارزمية (Time Complexity):

تعقيد الخوارزمية المقترحة لكل طلب اتصال

١. تحديد المسار: (Dijkstra) [٩]:

(5)

حيث أن: $O(|E| + |V| \log |V|)$

$|V|$ عدد العقد (Vertices)

$|E|$ عدد الروابط أو الحواف (Edges)

٢. تخصيص الفتحات الطيفية First-Fit مُحسَّن [١٠]:

(6)

حيث أن: $O(L \cdot S)$

L طول المسار (عدد الروابط)

S عدد الفتحات في كل رابط

٣. إجمالي

(7)

حيث أن: $O(|E| + |V| \log |V| + L \cdot S)$

زمن تنفيذ 5 < ملي ثانية لشبكات ٤٠ عقدة

تظهر المقارنة أن الخوارزميات البسيطة ك First-Fit سريعة لكنها تخفق في البيئات الديناميكية. الخوارزميات المعقدة ك Min-Slot تحسن الكفاءة لكنها غير عملية للتطبيقات الوقت-الحقيقي. لذلك اقترحنا يوفر توازنًا أمثلًا بين السرعة والجودة، مما يجعله أنسب لشبكات الجيل السادس.

٤-١-٤ تحليل النتائج:

دراستنا هذه تعرض التباين بين النموذج الرياضي المثالي وسلوك الشبكة الحقيقي أي الفرق بين بيئتي المحاكاة النظرية MATLAB مقابل ++OMNeT الواقعية و أبرز تلك الفروقات التقنية:
- يحسب MATLAB السعة النظرية دون فواصل حماية أو تداخل، بينما يدمج ++OMNeT فواصل حماية بنسبة ٢٠% وهدر تجزئة به ١٥% .

-يفترض MATLAB معالجة آنية للطلبات، بينما يحسب ++OMNeT تأخير حل النزاعات وزمن إعادة التوجيه

-في MATLAB يُحتسب فقط زمن الانتشار، بينما يشمل ++OMNeT تأخير الطابور والتوجيه الديناميكي

تشير هذه الفروقات إلى أن الفرق بين النتائج لا يمثل تناقضًا، بل تعكس التعقيد الزمني والوظيفي الذي تطرحه البيئات الديناميكية. يبرز ++OMNeT أن حوالي ٦٠% من السعة تُهدر فعليًا بسبب فواصل الحماية، التجزئة غير المرئية، وتأخير التنسيق بين العقد، مما يستدعي اعتماد سياسات ديناميكية مثل إعادة ضبط الطيف والحماية المتكيفة.

عند مقارنة النموذج المقترح بخوارزمية First-Fit التقليدية، تظهر فروقات جوهرية في الأداء وفقًا للجدول

التالي:

المعيار	النموذج المقترح	First-Fit التقليدي	الآلية الفعالة
تجزئة الطيف (%)	0% في (MATLAB)	25%	الاستمرارية المحكمة من خلال القيود الرياضية تمنع توزيع غير متجانس للفتحات
معدل الحجب (%)	10%	40%	تخصيص المسار الأقصر والكتلة الطيفية الأكبر يقللان التعقيد الزمني إلى $O(n)$ بدلًا من $O(n^2)$

الجدول (٤) مقارنة النموذج المقترح بخوارزمية First-Fit التقليدية

بالتالي تحقيق نتائج مثالية ضمن MATLAB يؤكد صحة النظرية، إلا أن التطبيق العملي يتطلب تحديد الأولوية بين الدقة والسرعة. أظهرت اختبارات الحساسية أن خفض وزن المعامل γ في دالة الهدف لصالح α يقلل التأخير بنسبة تصل إلى ٢٠%، مع الإبقاء على تجزئة طيفية أقل من ١٠%، مما يجعل النموذج ملائمًا للتطبيقات الزمنية الحرجة.

ولسد الفجوة بين النظري والتطبيق يفضل بإضافة فواصل الحماية الديناميكية المتكيفة حسب المسافة لتقليل الهدر الطيفي الثابت.

كما يمكن اتباع نهج تخصيص هجين حسب الأولوية كالتالي:

```
def dynamic_RSA(request):
    if request.priority == HIGH:
        use_optimal_MILP() # تخصيص دقيق
    else:
        use_heuristic_CSA() # تخصيص سريع
```

بحيث طبقنا مبدأ التقسيم حسب الأولوية (Priority-based Classification) فإذا كانت الطلبات عالية الأولوية: تستخدم نموذج MILP الأمثل و إلا تستخدم خوارزمية CSA الإرشادية للطلبات منخفضة الأولوية،

إذا تُظهر المقارنة الكمية بين النموذج المقترح والدراسات السابقة [٥] و [٦] تفوقًا واضحًا في الأداء عبر مؤشرات متعددة. ففي دراسة Gaussian-RSA [5] ، بلغ معدل الحجب ١٨% مع تجزئة طيفية بنسبة ٢٢% باستخدام بيئة MATLAB فقط، بينما سجل إطار [6] OMNeT++ معدل حجب أعلى بلغ ٢٤% وتجزئة وصلت إلى ٣٠%، مما يعكس محدودية كل منهما في معالجة التحديات الطيفية ضمن بيئة واحدة. بالمقابل، يحقق النموذج المقترح في هذا البحث معدل حجب منخفض يصل إلى ١٠%، مع تجزئة تتراوح بين ٠% و ٢٠% حسب السيناريو، مستفيدًا من تكامل بيئتي MATLAB و OMNeT++ في تقييم الأداء.

ويُعد هذا التكامل في أدوات المحاكاة أحد أبرز عناصر التميز، حيث يتيح توحيد القياس بين بيئتين مختلفتين، مما يوفر رؤية أكثر واقعية وشمولية لسلوك الشبكة. كما أن مرونة النموذج في ضبط دالة الهدف عبر المعاملات α ، β ، γ تسمح بتكييفه حسب متطلبات التشغيل، مما يمنحه قابلية أعلى للتطبيق العملي في بيئات ديناميكية ومتغيرة.

ركزت دراسة Xi et al[7] على تسريع خوارزمية RSA في شبكات EON متعددة النطاقات باستخدام خوارزمية هجينة معتمدة على تقنيات Branch-and-Bound و Layered Graph، بينما ركز النموذج المقترح في هذا البحث على الصياغة الرياضية معتمدين على البرمجة الخطية المختلطة (MILP) مع تضمين متغيرات ثنائية ومستمرّة لضمان استمرارية الفتحاح الطيفية ومنع التداخل.

بينما تسعى الدراسة السابقة إلى تقليل زمن التنفيذ في بيئات واسعة النطاق، يقدم هذا البحث إطارًا مزدوجًا يجمع بين التحليل العددي في MATLAB والمحاكاة الديناميكية في OMNeT++ ، مما يتيح تقييمًا أكثر شمولية لأداء الشبكة في ظروف تشغيلية واقعية.

٥- الاستنتاجات والتوصيات:

"يقدم هذا البحث إطارًا رياضيًا ثنائي المحاكاة (نظري/واقعي) لتحسين كفاءة RSA في شبكات EON، مع تحقيق خفض بنسبة ٤٠% في الحجب مقارنة بأحدث المنهجيات. تكمن قيمته في كونه معيارًا مرجعيًا جديدًا لتقييم أدوات المحاكاة، وأرضية صلبة لدمج التعلم الآلي في إدارة الطيف الضوئي.

توصيات مستقبلية:

- توسيع النموذج ليشمل الطاقة المستهلكة وتأثيرها على كفاءة الشبكة، خاصةً في تطبيقات الإنترنت الصناعي والمدن الذكية.
- ربط النموذج بمنصات الشبكات المعرفة برمجياً (SDN)، لتحسين التكيف التلقائي مع تغيرات حركة المرور.
- دمج خوارزميات التعلم العميق لتحسين التخصيص الديناميكي للطيف، وتعزيز القدرة على التنبؤ الفوري بالطلب.
- إنشاء قاعدة بيانات معيارية قابلة للتكرار، تُستخدم للمقارنة بين أدوات المحاكاة وتقييم أداء الخوارزميات في بيئات مختلفة.

٦- المراجع:

- ١- Yang Wang, Chaoyang Li, Qian Hu, Jabree Flor, Maryam Jalalitabar , “Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks: A Primal-Dual Framework” ,November 16, 2021.
- 2- Goran Z. Marković , “Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks Using Bee Colony Optimization”, July 22, 2017.
- 3- Selva Kumar Subraman,”The Recent Contributions of Routing and Spectrum Assignment Algorithms”,2020 .
- 4- Kaixuan Kuang; Xiong Wang; Sheng Wang; Shizhong Xu;Dynamic, “Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks”,2014.
- 5- C. L. Triveni, M. R. Tejaswini, Indira Bahaddur, Venkateswara Rao Kolli, & Sreenivasulu Tupakula, "A Novel Approach to Solve RSA Problem in the Spectrum Sliced Elastic Optical Networks", 2024.
- 6- Luae Al-Tarawneh, " An optimal algorithm for energy harvesting in optical networks; Optical Fiber Technology,Volume 78,2023.
- ٧- T. Xi, X. Li, and X. Wang, “Time-Efficient RSA over Large-Scale Multi-Domain EON,” Sensors, vol. 24, no. 21, p. 6802, Oct. 2024.
- ٨- B. C. Chatterjee, N. Sarma, and E. Oki, “Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 3, pp. 1776–1800, 2015.
- ٩- E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” Numerische Mathematik, vol. 1, pp. 269–271, 1959.
- ١٠- Zhang, Z., Wang, H., & Mukherjee, B. Dynamic Routing and Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks with Modulation Format Conversion. Journal of Lightwave Technology, 31(1), 26–36, 2013.