

تطوير أداء ترميز الشبكة الخطي العشوائي لتحسين النقل الموثوق في الشبكات اللاسلكية متعددة القفزات

د. محمد حجازية *

احمد ابراهيم **

(تاريخ الإيداع 11 / 12 / 2016. قُبِلَ للنشر في 30 / 1 / 2017)

□ ملخص □

يعد ترميز الشبكة الخطي العشوائي (RLNC) تقنية حديثة تستخدم لتحسين أداء الشبكات اللاسلكية ذات الضياع، ويكون لهذا التحسين أهمية كبيرة في حالات الإرسال المتعدد وفي الشبكات اللاسلكية متعددة القفزات. لكن، لا يزال هذا الترميز يعاني من نقاط ضعف أساسية تقلل من أدائه. أبرزها مشكلة الارتباط الخطي بين الرزم المرمزة، وعملية التحقق من استقلالية هذه الرزم خطياً، إضافة إلى الحمل الإضافي لترويسة الرزم المرمزة. سنقدم في هذا البحث آلية عمل منظمة لعملية ترميز الشبكة الخطي العشوائي تسمى ORLNC، تطبق في العقد المصدر من الشبكات اللاسلكية متعددة القفزات. تعتمد هذه الآلية على توليد رزم مرمزة مستقلة خطياً وفق مبدأ مصفوفة Vandermonde بعد تحديد حجم حقل غوص المناسب لعملية الإرسال المطلوبة، فيتم حل مشكلة الارتباط الخطي لهذه الرزم وكذلك يتم التقليل من حجم ترويستها إلى أدنى حد. فقط عملية إعادة الترميز في العقد المتوسطة من هذه الشبكات تتم وفق آلية الترميز التقليدية (RLNC). الهدف الأساسي هو تحقيق أفضل استفادة من عرض الحزمة مع المحافظة على فعالية النقل الموثوق في هذه الشبكات.

الكلمات المفتاحية: ترميز الشبكة الخطي العشوائي المنظم، الشبكات اللاسلكية متعددة القفزات، مصفوفة Vandermonde، عامل استخدام عرض الحزمة.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية، سورية.

Developing the performance of Random Linear Network Coding for Enhancing the Reliable Transfer in Multi Hop Wireless Networks

Dr. Mohammed Hijazieh*
Ahmad Ibrahim**

(Received 11 / 12 / 2016. Accepted 30 / 1 / 2017)

□ ABSTRACT □

Random Linear Network Coding (RLNC) is considered a new technology that is used to enhance the performance of prone losses wireless networks; this enhancement has a big advantage in multicast scenarios and in multi hop wireless networks. However, this coding still suffer from major weak points that reduce its performance, basically the linear dependency between coded packets, and the confirming operation of the linear independency for these packets, in addition to the header overhead of the coded packets.

In this research, we will present an organized mechanism of the random linear network coding process called ORLNC, implemented in the source node of multi hop wireless networks. This mechanism depends on generating independent coded packets according to Vandermonde matrix, after determining the convenient size of Galois field for required transmission process. Which solves the problem of linear dependency and reduce the header overhead of the coded packet to the minimum size. Only recoding process at intermediate nodes of these networks is done according to the traditional coding mechanism (RLNC). The main purpose is to achieve the best utilization of bandwidth with keeping the efficiency of reliable transfer of these networks.

Key Words: Organized Random linear network coding, Multi hop wireless networks, Vandermonde Matrix, Bandwidth Utilization.

*Assistant Professor, Department of Computer & Automatic Control, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. University, Lattakia, Syria.

**Postgraduate Student, Department of Computer & Automatic Control, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تعد الشبكات اللاسلكية متعددة القفزات أبرز الحلول لتوسيع مجال التغطية وتأمين الاتصال للمستخدمين المتحركين والثابتين [1]، ومن أبرز أنواعها شبكات (Ad Hoc, Sensor, Mesh). لكن، تعاني هذه الشبكات من ضعف جودة الاتصال بسبب الظواهر الفيزيائية مثل الخفوت والتداخل والتصادم وفقد المسارات وغيرها، مما يسبب ضياع متكرر للرمز. لمواجهة هذه التحديات تم استخدام ترميز الشبكة الخطي العشوائي باعتباره تقنية واعدة يمكنها أن تحسن من إنتاجية النقل الموثوق في هذه الشبكات [2,3,4]. يقوم الترميز RLNC على دمج عدة رموز في رزمة مرمزة واحدة لها نفس حجم الرمز الأصلية، وعند الحاجة يقوم بعملية إعادة الترميز للرمز المرمزة في العقد المتوسطة من الشبكة، ويكمن دور عمليتي الترميز وإعادة الترميز في تحسين فعالية الإرسال عن طريق استخدام الرمز المرمزة أو المعاد ترميزها لمعالجة الضياع الحاصل للرمز في الشبكة بطريقة مجملية وليس مفصلة، أي أن الرمز المرسل لاحقاً يمكن أن تستخدم لتصحيح الضياع الحاصل للرمز المرسل سابقاً، فلا تحتاج العقد عند القيام بعملية تصحيح الضياع إلى معرفة أي الرمز التي استقبلت وأي الرمز التي ضاعت بل تحتاج إلى معرفة عددها فقط. على خلاف طريقة الإرسال التقليدية (بدون استخدام ترميز الشبكة) والتي تتطلب إعادة إرسال الرمز نفسها عند حصول عملية ضياع لهذه الرمز، وبالنتيجة تتم عملية استعادة ضياع الرمز بسرعة كبيرة. إضافة لذلك، تعد طريقة ترميز الشبكة أكثر سرعة من بروتوكول التحكم بالنقل TCP في تحقيق وثوقية النقل، لأن آلية التحكم بالازدحام للبروتوكول TCP تفسر عملية الضياع على أنه ازدحام فيتم خفض معدل النقل بدلاً من زيادته لتعويض الضياع الحاصل للرمز مما يقلل من أداء الشبكة [5].

ولكن يعاني هذا النوع من الترميز من نقاط الضعف أساسية تقلل من أدائه، تتمثل في كلفة عمليتي الترميز وإعادة الترميز [6,7]، أسباب هذه الكلفة هي أولاً الحجم الإضافي لترويسة الرزمة المرمزة والمتمثل بشعاع الترميز العشوائي، وثانياً احتمال وجود ارتباط خطي بين الرمز المرمزة، مما يعني هدر للموارد وتأخير زمني بسبب إرسال رموز مرمزة لا يتم الاستفادة منها. وثالثاً عملية التأكد من استقلالية الرمز خطياً في كل من العقد المتوسطة والهدف من الشبكة، والتي تسبب تعقيد حسابي وتتطلب عمليات معالجة إضافية. سيتم في هذا البحث معالجة أبرز نقاط الضعف المتعلقة بتطبيق ترميز الشبكة الخطي العشوائي في الشبكات اللاسلكية متعددة القفزات.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى تطوير أداء ترميز الشبكة الخطي العشوائي المطبق في العقد المصدر من الشبكات اللاسلكية متعددة القفزات، حيث تم اقتراح آلية منظمة لعملية الترميز تسمى (Organized Random Linear Network Coding) ORLNC، تعمل بالتوافق مع عملية إعادة الترميز التي تحصل في العقد المتوسطة من الشبكة وفق آلية ترميز الشبكة الخطي العشوائي التقليدية RLNC. تقوم الآلية المقترحة على أولاً توليد أشعة ترميز مستقلة خطياً من العقد المصدر وفق مبدأ مصفوفة Vandermonde من عناصر توليد يتم اختيارها بشكل منظم من حقل غوص، وثانياً اختيار الحجم المناسب لحقل غوص الذي يؤمن توليد العدد اللازم من أشعة الترميز المستقلة لعملية الإرسال المطلوبة. فيتم بالنتيجة زيادة فعالية وإنتاجية النقل الموثوق لهذه الشبكات بسبب إرسال رموز مفيدة من المصدر واختصار الكثير من عمليات المعالجة والتعقيد الحسابي بسبب عدم التحقق من استقلالية هذه الرمز، وكذلك يتم التقليل

من حجم ترويسة الرزم المرمزة، وتصبح عمليات التحقق وكذلك الحجم الإضافي للترويسة مقتصرة على الرزم المعاد ترميزها فقط.

طرائق البحث ومواده:

1- ترميز الشبكة الخطي العشوائي [6,8,9]:

ترميز الشبكة الخطي العشوائي هو صنف من أصناف ترميز الشبكة الخطي إلا أنه يختار معاملات الترميز بطريقة عشوائية، ويعد الطريقة الأساسية للترميز ضمن الجلسة (Intra-Session Network Coding)، والذي يقوم على ترميز الرزم من نفس المصدر، وتجري كافة العمليات الرياضية لهذا الترميز عبر حقل غوص $GF(2^m)$ بهدف الحصول على نفس حجم الرزم الأصلية في الرزم المرمزة. يتألف ترميز الشبكة الخطي العشوائي من ثلاث عمليات أساسية هي الترميز وإعادة الترميز وفك الترميز.

1-1 عملية الترميز:

تحصل هذه العملية في العقد المصدر، حيث يتم في البداية تجزئة الملف المطلوب إرساله إلى مجموعة كتل (Blocks) بعدد n مثلاً، وتكون كل كتلة مؤلف من عدد $(block_{size} = j)$ من الرزم الأصلية. ومن ثم يتم تشكيل رزم مرمزة P' هي تركيب خطي عشوائي من الرزم التابعة لنفس الكتلة وفق العلاقة:

$$P' = \sum_{i=1}^j c_i P_i \quad (1)$$

حيث P_i الرزم الأصلية في الكتلة، c_i معاملات الترميز التي يتم اختيارها بشكل عشوائي من حقل غوص وتشكل شعاع الترميز $C = [c_1, c_2, \dots, c_j]$ الذي يتم إرفاقه بترويسة الرزمة مرمزة. بفرض أن بيانات الرزمة الأصلية بحجم (L bits) وأن حقل غوص المستخدم $GF(2^m)$ ، يكون إطار الرزمة المرمزة بعد إضافة ترويسة ترميز الشبكة كما في الشكل (1).

Additional Header: Coded Vector	Coded Data
$C (x j \text{ bits})^m$	$P' (L \text{ bits})$

الشكل (1) إطار الرزمة المرمزة لترميز الشبكة الخطي العشوائي

2-1 عملية إعادة الترميز:

تجري هذه العملية في العقد المتوسطة (الموجهة) من الشبكة والموجودة على طول المسار بين العقدتين المصدر والهدف، وهي مشابهة لعملية الترميز إلا أنها أكثر تعقيداً منها لأن الرزم المرمزة الجديدة هي تركيب خطي عشوائي من الرزم المرمزة القديمة، وتفيد عملية إعادة الترميز في الحصول على وفرة من الرزم المرمزة في الشبكة من أجل تعويض الضياع الحاصل لهذه الرزم خلال انتقالها إلى العقد الهدف.

عندما تستقبل أي عقدة متوسطة عدد $j' = [2, j]$ من الرزم المرمزة المستقلة خطياً من كتلة معينة يمكنها القيام بعملية إعادة الترميز، حيث توضع الرزم المرمزة في المصفوفة $P' = [P'_1; P'_2; \dots; P'_j]$ وتوضع أشعة الترميز الموافقة لها في المصفوفة $C = [c_1; c_2; \dots; c_{j'}]$. لإعادة ترميز هذه الرزم:

1- تضرب الرزم المرمزة P' بمعاملات عشوائية جديدة r_i يتم اختيارها من حقل غوص كما في العلاقة (2).

$$P'' = \sum_{i=1}^j r_i P'_i \quad (2)$$

2- يتم ضرب المعاملات العشوائية الجديدة بالمعاملات العشوائية القديمة لنحصل على المعاملات التي ترسل في ترويسة الرزم المعاد ترميزها:

$$.N = RxC \quad (3)$$

3-1 عملية فك الترميز:

تحصل عملية فك الترميز في العقد الهدف من الشبكة فقط باستخدام (Gaussian Elimination) بهدف استرجاع الرزم الأصلية بنجاح. حيث يتم تخزين الرزم المستقبلية في مصفوفتين، الأولى خاصة ببيانات الرزمة المرمزة تسمى مصفوفة البيانات $P' = [P'_1; P'_2; \dots; P'_j]$ والثانية بأشعة الترميز الموافقة وتسمى مصفوفة المعاملات $C = [c_1; c_2; \dots; c_j]$. وعند استقبال العقدة الهدف رزمة مرمزة جديدة يتم أولاً التحقق من كونها مستقلة خطياً فيتم تخزينها وإلا يتم إهمالها (إذا كانت مرتبطة خطياً). وبالنهاية، عندما يتم استقبال العدد المطلوب من الرزم المرمزة المستقلة خطياً اللازمة لعملية فك الترميز، يتم أولاً إرسال إشعار بالاستلام إلى العقدة المصدر من أجل إيقاف الإرسال من الكتلة الحالية والانتقال إلى الكتلة التالية. وثانياً يتم القيام بعملية فك الترميز واسترجاع الرزم الأصلية وفق العلاقة (4).

$$P = C^{-1} x P' \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{j1} & \dots & c_{jj} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} P'_1 \\ \vdots \\ P'_j \end{pmatrix}$$

2- تطوير آلية ترميز الشبكة الخطي العشوائي في الشبكات اللاسلكية المتعددة

القفزات:

لحل نقاط ضعف ترميز الشبكة الخطي العشوائي وتطوير أدائه تم اقتراح آلية منظمة لعملية الترميز تسمى (ORLNC)، تقوم على توليد رزم مستقلة خطياً من العقد المصدر باستخدام مفهوم مصفوفة [10,11]. Vandermonde لتصبح جميعها مفيدة عند الإرسال وليتم التخلص من عمليات التحقق من استقلالية الرزم خطياً في كل من العقد المتوسطة والهدف، ولتحقيق ذلك تم توليد أشعة الترميز وفقاً لمبدأ هذه المصفوفة من عنصر واحد بدلاً من اختيارها كاملاً بشكل عشوائي، ونحصل إضافة لما سبق على فائدة هامة وهي إرسال عنصر التوليد فقط في ترويسة الرزمة المرمزة بدلاً من إرسال كامل شعاع الترميز. بالنتيجة، تكون جميع الرزم المرسل مفيدة وبأقل حجم ممكن لترويسة الرزمة المرمزة ويتم اختصار الكثير من عمليات المعالجة والتعقيد الحسابي. ولكن التحدي الأساسي لتحقيق هذه الآلية في شبكة لاسلكية متعددة القفزات هو عملية إعادة الترميز، لأن توليد شعاع ترميز جديد وضربه بالشعاع القديم كما في العلاقة (3) قد يغير من الاستقلالية الخطية لأشعة الترميز ويسبب فشل عملية فك الترميز، لذلك تم اقتراح تطبيق الآلية ORLNC بالنسبة لعملية الترميز في العقد المصدر فقط، أما بالنسبة لعملية إعادة الترميز في العقد المتوسطة من الشبكة فتم تطبيقها بحسب آلية الترميز التقليدية RLNC. ويتم التمييز بين طريقتي الترميز من

خلال ترويسة الرزمة المرمزة، فإذا كانت هذه الترويسة تحتوي عنصر واحد فهذا يعني أن الرزم مرمزة ومستقلة خطياً عن باقي الرزم، أما إذا كانت ترويسة الرزمة تحتوي شعاع ترميز فيعني ذلك أن الرزمة معاد ترميزها ويجب التحقق من استقلاليتها خطياً عن باقي الرزم قبل تخزينها، وفيما يلي سنبين عمليات الترميز وإعادة الترميز وفك الترميز وفق الآلية المقترحة.

1-2 عملية الترميز في العقد المصدر:

يتم في العقد المصدر الحصول على أشعة ترميز مستقلة خطياً وفق مبدأ مصفوفة Vandermonde بحسب

العلاقة (5).

$$A_i = V_i^{(j-1)} ; j = 1, \dots, N \quad (5)$$

حيث: V_i هو عنصر التوليد الذي يتم اختياره بشكل منظم من حقل غوص $GF(2^m)$ ، A_i شعاع الترميز الذي يتم توليده من العنصر V_i ، i متغير يعبر عن ترتيب شعاع الترميز، j متغير يستخدم في عملية توليد شعاع الترميز ويأخذ قيم متزايدة من الواحد إلى N (عدد الرزم المرمزة معاً). مثلاً، إذا كان $N = 4$ ، وعنصر التوليد العشوائي الأول من حقل هو v_1 يكون شعاع الترميز العشوائي الأول: $A_1 = [v_1^0 \ v_1^1 \ v_1^2 \ v_1^3]$.

وإذا كانت بقية عناصر التوليد العشوائية هي v_2, v_3, v_4 تكون مصفوفة معاملات الترميز المستقلة خطياً:

$$M = \begin{bmatrix} v_1^0 & v_1^1 & v_1^2 & v_1^3 \\ v_2^0 & v_2^1 & v_2^2 & v_2^3 \\ v_3^0 & v_3^1 & v_3^2 & v_3^3 \\ v_4^0 & v_4^1 & v_4^2 & v_4^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & v_1^1 & v_1^2 & v_1^3 \\ 1 & v_2^1 & v_2^2 & v_2^3 \\ 1 & v_3^1 & v_3^2 & v_3^3 \\ 1 & v_4^1 & v_4^2 & v_4^3 \end{bmatrix}$$

تضرب مصفوفة المعاملات الناتجة بمصفوفة الرزم الأصلية، فنحصل على الرزم المرمزة. وبما أن عملية توليد شعاع الترميز في العقد المصدر تتم فقط بالاعتماد على عنصر حقل غوص V_i ، فلا حاجة لإرسال كامل شعاع الترميز إلى العقد الهدف، بل يتم فقط إرفاق عنصر التوليد في ترويسة الرزمة المرمزة بدلاً من كامل شعاع الترميز، فيتم التقليل من حجم الترويسة الإضافي إلى أدنى حد ممكن، وبالنتيجة يصبح إطار الرزمة المرمزة بالطريقة المقترحة كما في الشكل (2).

Additional Header: Generator Element	Coded Data
m bits	L bits

الشكل (2) إطار الرزمة المرمزة لترميز الشبكة الخطي العشوائي المنظم

1-1-2 الاستخدام الصحيح لحقل غوص بالحجم المناسب:

بما أنه يتم توليد أشعة الترميز في العقد المصدر من الشبكة وفقاً لمصفوفة Vandermonde سيكون هناك عدد محدد للعناصر التي يمكن اختيارها من أجل توليد أشعة الترميز المستقلة خطياً، وهذا العدد يساوي عدد العناصر الموجودة في حقل غوص المستخدم، فمثلاً الحقل $GF(2^4)$ يدعم إمكانية توليد $2^4 - 1 = 15$ شعاع ترميز مستقل خطياً، بينما يدعم الحقل $GF(2^8)$ إمكانية توليد $2^8 - 1 = 255$ شعاع ترميز مستقل خطياً. لذلك، من أجل الحصول على أداء الأمثل لعملية ترميز الشبكة الخطي العشوائي المنظم تم تحديد آلية استخدام حقل غوص بالحجم المناسب لعمليات الإرسال المطلوبة وفق معيارين، المعيار الأول والأساسي أن يحتوي هذا الحقل على عدد العناصر الكافي لإنتاج أشعة الترميز اللازمة لتحقيق عملية الإرسال المطلوبة، والثاني ألا يزيد حجم هذا الحقل كثيراً عن الحجم اللازم

إنتاج العدد المطلوب من أشعة الترميز كي نحصل على أفضل أداء لترميز الشبكة من حيث تبسيط العمليات الحسابية والتقليل من حجم عنصر التوليد الذي يتم إرفاقه في ترويسة الرزمة المرمزة.

وفقاً لهذين المعيارين تحدد آلية اختيار حقل غوص بالحجم المناسب بحيث يكون عدد عناصر هذا الحقل أكبر

أو يساوي العدد اللازم لعمليات الإرسال المتوقعة (Expected number of transmissions) بحسب العلاقة:

$$2^m - 1 \geq ETX \quad (6)$$

بالنسبة لتحديد عدد عمليات الإرسال المتوقعة (ETX)، فإنه يتعلق بعدة عوامل هي حجم الكتلة ونسبة الضياع

الموجودة في الوسط، ويعطى أكبر عدد لعمليات الإرسال المتوقع بالعلاقة [3]:

$$ETX = \frac{block_{size}}{1 - \max(\epsilon)} \quad (7)$$

وبما أن قيمة حجم كتلة الترميز $block_{size}$ ثابتة، يكون التحدي الأساسي عند تحديد قيمة الضياع في الوسط.

ونكون أمام حالتين، الأولى هي عند المعرفة الدقيقة لقيمة الضياع في الوسط، يتم إيجاد عدد عمليات الإرسال المتوقع

بحسب العلاقة (7). الحالة الثانية إذا كان معدل الضياع متغير أو لا يوجد هناك تقدير دقيق لقيمة الضياع في الوسط

فيتم اختيار حقل غوص بحجم كبير مثلاً $GF(2^{10})$ والذي يدعم توليد عدد كبير جداً من أشعة الترميز المستقلة خطياً

(تصل إلى 1023 شعاع)، ومن أجل تجنب التعقيد الحسابي يتم تنظيم عناصر هذا الحقل بشكل تصاعدي ومن ثم

تخزينها في مصفوفة باسم pool مثلاً، وعند الإرسال يتم الاختيار التسلسلي لهذه العناصر بدءاً من أصغر عنصر،

وبذلك نكون قد حققنا توليد العدد الكافي من الأشعة المستقلة خطياً وبنفس الوقت ابتعدنا عن التعقيد الحسابي عند القيام

بعمليات الترميز.

2-2 عملية إعادة الترميز:

كما ذكرنا فإن المشكلة الأساسية التي تجعل من الصعب تطبيق آلية الترميز المطورة من أجل عملية إعادة

الترميز تكمن في ضرورة ضرب معاملات الترميز القديمة بمعاملات الترميز الجديدة بحسب العلاقة (3)، والتي قد

تسبب تغير في الاستقلالية الخطية لأشعة الترميز وما ينتج عنه من فشل عملية فك الترميز، لذلك تم اقتراح تحقيق

عملية إعادة الترميز بحسب الطريقة التقليدية للترميز RLNC بشكل متوافق مع الطريقة المطورة لعملية الترميز

(ORLNC)، بهدف الحصول على الجدوى المثلى من الطريقة المقترحة في طور الترميز مع المحافظة على صحة

وفعالية الطريقة التقليدية في طور إعادة الترميز. عملية التوافق والتنسيق بين الطريقتين موضحة في الخوارزمية المبينة

في الشكل (3)، فعندما تستقبل العقدة المتوسطة رزم مرمزة فإنها تفحص ترويسة هذه الرزمة فإذا كانت هذه الترويسة

تحتوي عنصر واحد فقط فهذا يعني أن هذه الرزمة مرمزة بحسب الطريقة ORLNC وتكون مستقلة خطياً ولا داعي

للتحقق من استقلاليتها، فيتم أولاً أخذ نسخة من هذه الرزمة ومن ثم توجيهها لاحقاً إلى العقدة التالية. بالنسبة للنسخة

من هذه الرزمة، يتم إعادة توليد شعاع الترميز العشوائي من العنصر الموجود بترويستها بحسب العلاقة (5) ومن ثم

يتم تخزين هذا الشعاع في مصفوفة معاملات الترميز، وبيانات هذه الرزمة فيتم تخزينها في مصفوفة بيانات الرزم. أما

في حال كانت هذه الرزمة تحتوي على شعاع ترميز كامل في ترويستها فهذا يعني أنها رزمة معاد ترميزها، فيجب أولاً

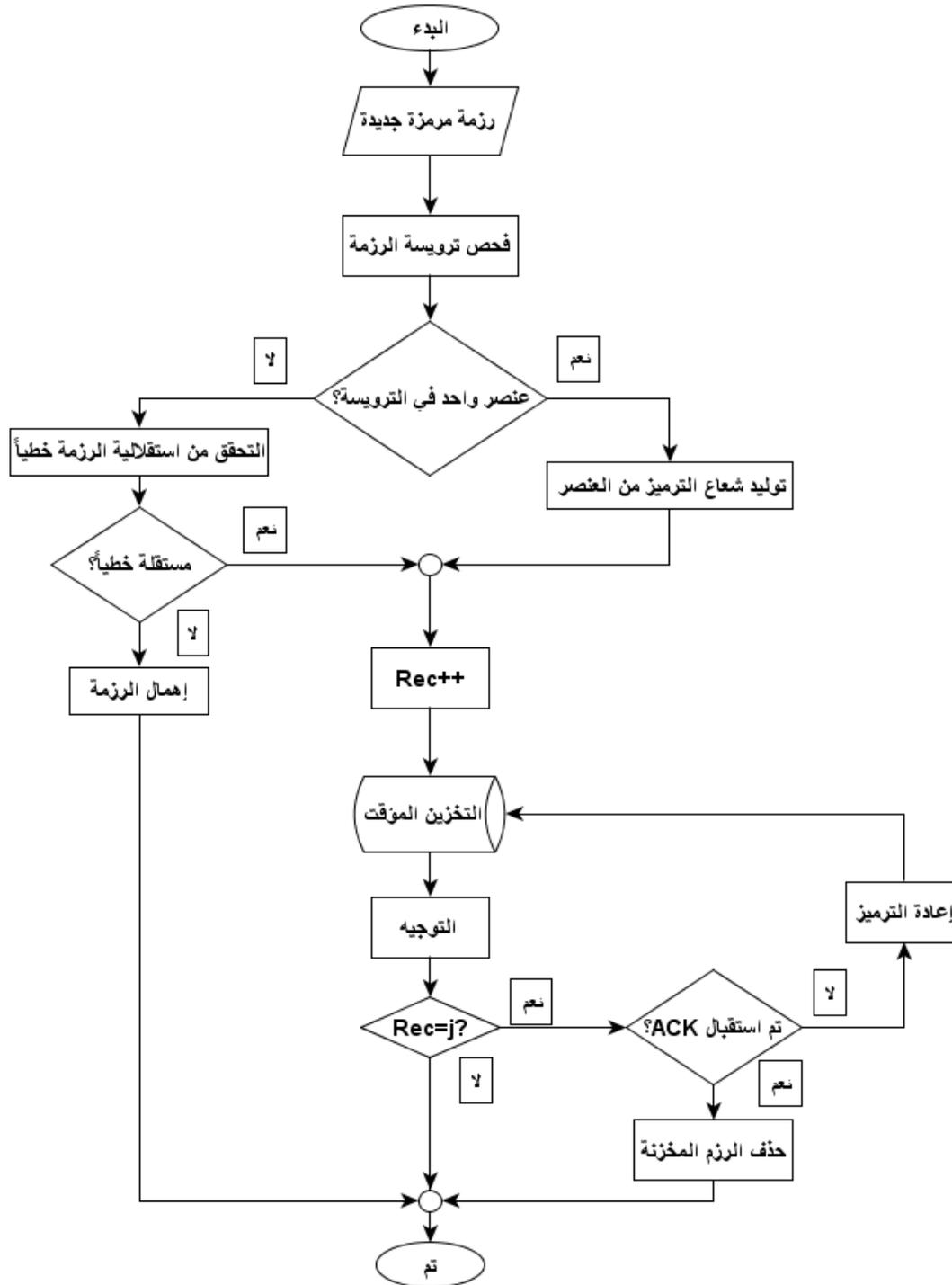
التحقق من استقلاليتها خطياً عن باقي الرزم المستقبلية وذلك بإضافة شعاع الترميز الخاص بها إلى مصفوفة المعاملات

ومن ثم قياس مرتبة (Rank) مصفوفة المعاملات، إذا ازدادت المرتبة فهذا يعني أن الرزمة مستقلة خطياً فيتم تخزين

بياناتها في مصفوفة الرزم وألا فإنه يتم إهمال هذه البيانات مع شعاع الترميز الموافق لها. وعندما يصبح عدد الرزم

المرمزة المستقبلية مساوياً لعدد الرزم في كتلة الترميز ولم يتم استقبال إشعار بالوصول من العقدة التالية في المسار يتم

القيام بعملية إعادة الترميز وفق الطريقة التقليدية للترميز الموضحة في الفقرة (1-2). أما عندما يتم استقبال هذا الإشعار يتم حذف هذه الرزم المخزنة.



الشكل (3) خوارزمية عمل العقد المتوسطة وفقاً لترميز الشبكة الخطي العشوائي المنظم

2-3 عملية فك الترميز:

تحصل عملية فك الترميز واسترجاع الرزم الأصلية في العقد الهدف من الشبكة وفق العلاقة (4)، ولكن هناك تعديل بسيط يتعلق بكيفية استرجاع أشعة الترميز بناءً على الآلية المقترحة. تقوم العقدة الهدف كذلك بالتمييز بين الرزم المرزمة والرزم المعاد ترميزها من خلال ترويسة هذه الرزم. فإذا كانت هذه الترويسة مؤلفة من عنصر واحد فهي رزم مرزمة يتم إعادة توليد شعاع الترميز بحسب العلاقة (5) ومن ثم تخزينه مباشرة في مصفوفة المعاملات (دون القيام بعملية Rank)، أما في حال استقبال رزمة مرزمة بشعاع ترميز كامل (الرزمة معاد ترميزها) فيتم وضع هذا الشعاع مباشرة في مصفوفة المعاملات ومن ثم اختبار مرتبة هذه المصفوفة فإذا زادت قيمتها فهذا يعني أن الرزمة مستقلة خطياً فيتم تخزينها وألا يتم إهمالها مع شعاع الترميز الموافق لها، وعند وصول عدد الرزم المرزمة والمستقلة خطياً إلى عدد الرزم في كتلة الترميز يتم القيام بعملية فك الترميز بنجاح واسترجاع الرزم الأصلية وفقاً للعلاقة الرياضية (4).

النتائج والمناقشة:

لدراسة وتقييم أداء ترميز الشبكة الخطي العشوائي في الحالتين التقليدية (RLNC) والمقترحة (ORLNC) تم اعتماد برنامج الماتلاب (MATLAB R2014a)، أولاً كون هذا البرنامج يحتوي على المكتبات وكافة العمليات الخاصة بحقل غوص الذي تتم عبر فضائه عمليات الترميز وفك الترميز [12]، وثانياً تدعم النسخة (R2014a) المستخدمة من هذا البرنامج القياس الزمني للعمليات التي يجريها المعالج (CPU Time). وقد تم إجراء عملية المحاكاة باستخدام جهاز حاسب بمعالج core i3 وذاكرة بسعة 3 GB من أجل إرسال ملف بحجم 1MB من عقدة مصدر إلى عقدة هدف في شبكة لاسلكية متعددة القفزات، بافتراض أن حجم الرزم الأصلية (1000 byte) فيكون لدينا (1000) رزمة في العقدة المصدر. سيتم خلال عملية المحاكاة قياس عدد عمليات الإرسال وعدد حالات الارتباط الخطي (Linear Dependency)، كذلك من العوامل الأساسية التي تستخدم لتقييم أداء الشبكة هو عامل استخدام عرض الحزمة (Bandwidth Utilization) والذي يعرف بأنه الزمن اللازم لإرسال M رزمة بالحالة المثالية (عندما لا يوجد ضياع وبدون وجود ترويسة إضافية) إلى الزمن اللازم لإرسال نفس العدد من الرزم في حالة وجود ضياع ووجود ترويسة الترميز لهذه الرزم. وعلى فرض أن حجم الرزمة هو (L) يضاف إلى هذا الحجم الترويسة الخاصة بترميز الشبكة ($m * block_{size}$)، لذلك تصبح علاقة عامل الاستخدام السابقة باستخدام ترميز الشبكة الخطي العشوائي كما في العلاقة:

$$Util_{rinc} = \frac{M * L}{ETX(m * block_{size} + L)} \quad (8)$$

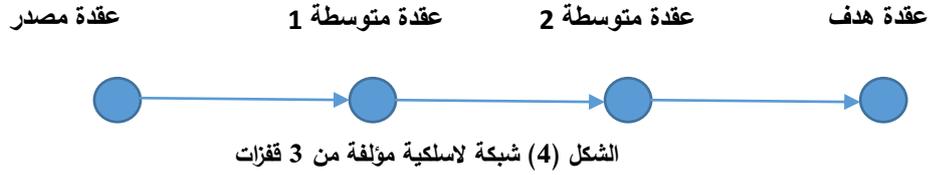
وتصبح علاقة عامل استخدام عرض الحزمة بالطريقة المقترحة كما يلي:

$$Util_{orinc} = \frac{M * L}{ETX_{Codesd}(m + L) + ETX_{Recodesd}(m * block_{size} + L)} \quad (9)$$

3-1 دراسة تأثير اختلاف عدد الرزم المرزمة معاً (حجم كتلة الترميز):

تم دراسة الحالات المختلفة لعدد الرزم المرزمة معاً أو حجم كتلة الترميز ($block_{size}$) على أداء الشبكة بالنسبة لألبيتي الإرسال التقليدية (RLNC) والمقترحة (ORLNC)، من أجل قيمتين مختلفتين للضياع الأولى هي 0% (حالة عدم وجود ضياع) والثانية هي حالة وجود ضياع بنسبة 25%، وذلك من حيث عدد عمليات الإرسال (ETX)

وحجم ترويسة الترميز (Overhead) وكذلك عدد حالات الارتباط الخطي (LD)، عندما يتم إرسال ملف بحجم 1MB من عقدة مصدر عقدة إلى هدف في شبكة لاسلكية مؤلفة من ثلاث قفزات كما يبين الشكل (4).



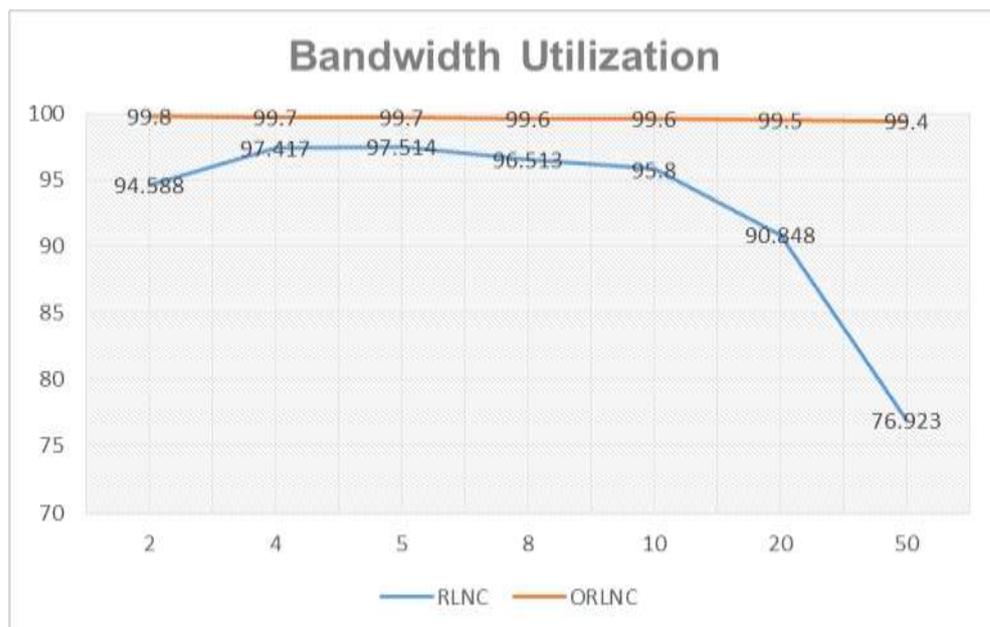
الحالة الأولى: عندما لا يوجد ضياع يتم في الطريقة المقترحة اختيار قيم الحقل المناسب لكل كتلة مستخدمة بالاعتماد على العلاقتين (6) و (7)، ومن ثم يتم تطبيق نفس القيم من أجل الطريقة التقليدية ويتم قياس الأداء فنحصل على النتائج التالية:

جدول (1): أداء طريقتي الترميز التقليدية والمقترحة بالنسبة لعدد الرزم المرمزة معاً في حالة عدم وجود ضياع.

$block_{size}$	GF (2^m)	RLNC				ORLNC			
		ETX Recoded	Overhead (bits)	ETX Coded	LD	ETX Recoded	Overhead (bits)	ETX Coded	LD
2	2	0	4	3159	159	0	2	3000	0
4	3	0	12	3043	43	0	4	3000	0
5	3	0	15	3031	31	0	3	3000	0
8	4	0	32	3012	12	0	4	3000	0
10	4	0	40	3011	11	0	4	3000	0
20	5	0	100	3002	2	0	5	3000	0
50	6	0	300	3000	0	0	6	3000	0

يتبين من النتائج السابقة أنه في حال عدم وجود ضياع في الشبكة تكون جميع الرزم المرمزة في الطريقة المقترحة (ORLNC) مستقلة خطياً ولا يحصل أي حالة ارتباط خطي (LD)، فنحصل بالنتيجة على عدد الرزم الأصلي المرسل من المصدر، كما نجد أن حجم الترويسة للرزم المرمزة هي عبارة عن حجم عنصر حقل غوص المستخدم لتوليد شعاع الترميز.

أما في الطريقة التقليدية لترميز الشبكة (RLNC) ومن أجل نفس بارامترات حجم الحقل وحجم الكتلة المستخدمة في الطريقة المقترحة، نجد العدد الكبير لحالات الارتباط الخطي عندما يكون حجم الحقل صغير (ويقل عدد هذه الحالات مع زيادة حجم الحقل) مما يزيد من عدد عمليات الإرسال (ETX) في الطريقة التقليدية عن الطريقة المقترحة، كما أن حجم ترويسة الرزمة المرمزة والمتمثلة بشعاع الترميز العشوائي تتعلق بحجم كتلة الترميز وحجم الحقل المستخدم، ويصل إلى (300 bits) من أجل حجم (50) للكتلة، وهو ما يعتبر فارق كبير عن الحجم (6 ibts) للترويسة في الطريقة المقترحة من أجل هذا الحجم، مما يشكل حمل إضافي كبير على الرزم المرمزة.



الشكل (5) عامل استخدام عرض الحزمة لشبكة لاسلكية مؤلفة من 3 قفزات بدون ضياع

بحساب عامل استخدام عرض الحزمة بالنسبة لطريقتي الترميز، نجد الأداء شبه المثالي لطريقة الترميز (ORLNC) من أجل جميع الأحجام المختلفة لكتلة الترميز كما يبين الشكل (5)، حيث لا يوجد أي حالة للارتباط الخطي ويكون حجم ترويسة الترميز صغير جداً. بينما تكون قيمة هذا العامل أقل في الطريقة التقليدية خاصة عند أصغر حجم وأكبر حجم لكتلة الترميز، فمن أجل أصغر حجم لهذه الكتلة يتم استخدام حقل غوص بحجم صغير فيكون هناك الكثير من حالات الارتباط الخطي بين الرزم، أما من أجل الحجم الكبير فيكون حجم ترويسة ترميز الشبكة كبير مما يقلل من قيمة استخدام عرض الحزمة.

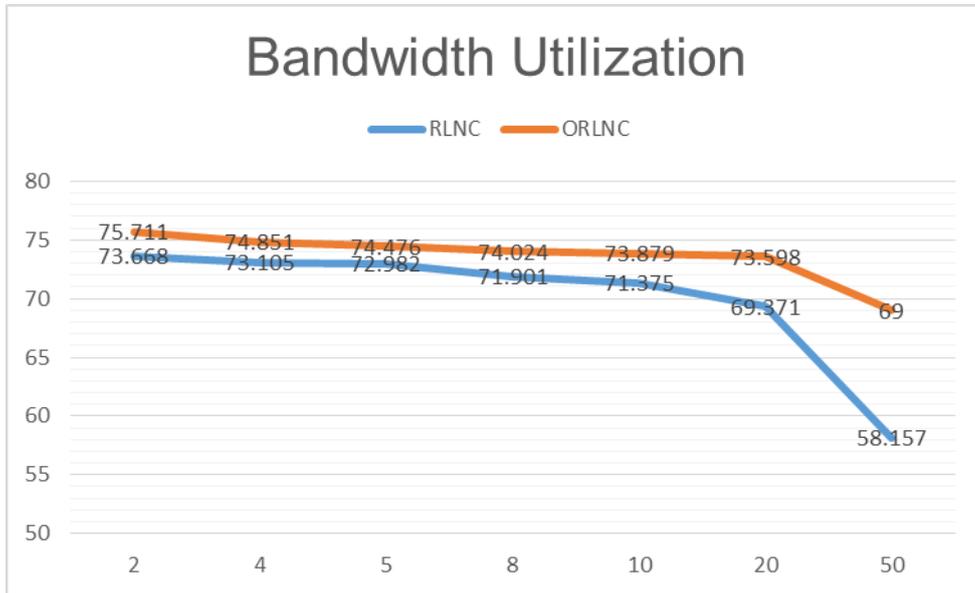
الحالة الثانية: عندما يوجد ضياع بنسبة 25% نحصل على النتائج المبينة في الجدول (2).

جدول (2): أداء طريقتي الترميز التقليدية والمقترحة بالنسبة لعدد الرزم المرزمة معاً في حالة وجود ضياع 25%.

block _{size}	GF(2 ^m)	RLNC			ORLNC				
		ETX (All)	Overhead (bits)	LD	Coded		Recoded		LD
					ETX	Overhead	ETX	Overhead	
2	3	4122	6	114	3087	3	861	6	0
4	3	4055	12	69	3105	3	883	12	1
5	4	4030	20	28	3050	4	947	20	3
8	4	4043	32	21	3094	4	917	32	7
10	5	4003	50	9	3050	5	948	50	6
20	6	4006	120	8	3051	6	899	120	2
50	7	3968	350	1	3084	7	956	350	0

يتبين من النتائج المبينة في الجدول السابق وجود حالات ارتباط خطي بالطريقة المقترحة كون عملية إعادة الترميز تتم وفق طريقة الترميز التقليدية، ويكون عدد هذه الحالات أقل من عدد حالات الارتباط الخطي في الطريقة التقليدية، كما أن حجم الترويسة للرزم المرزمة بالطريقة المقترحة يكون بأقل حجم ممكن كونه يحتوي على عنصر حقل غوص فقط، بينما يكون حجمها بالنسبة للرزم المعاد ترميز يساوي حجم الترويسة للرزم في طريقة الترميز التقليدية.

وبالنتيجة فإن عامل استخدام عرض الحزمة في طريقة الترميز المقترحة أكبر من قيمته في طريقة الترميز التقليدية كما يبين الشكل (6).



الشكل (6) عامل الاستخدام من عرض الحزمة لشبكة لاسلكية ذات ضياع مؤلفة من 3 قفزات

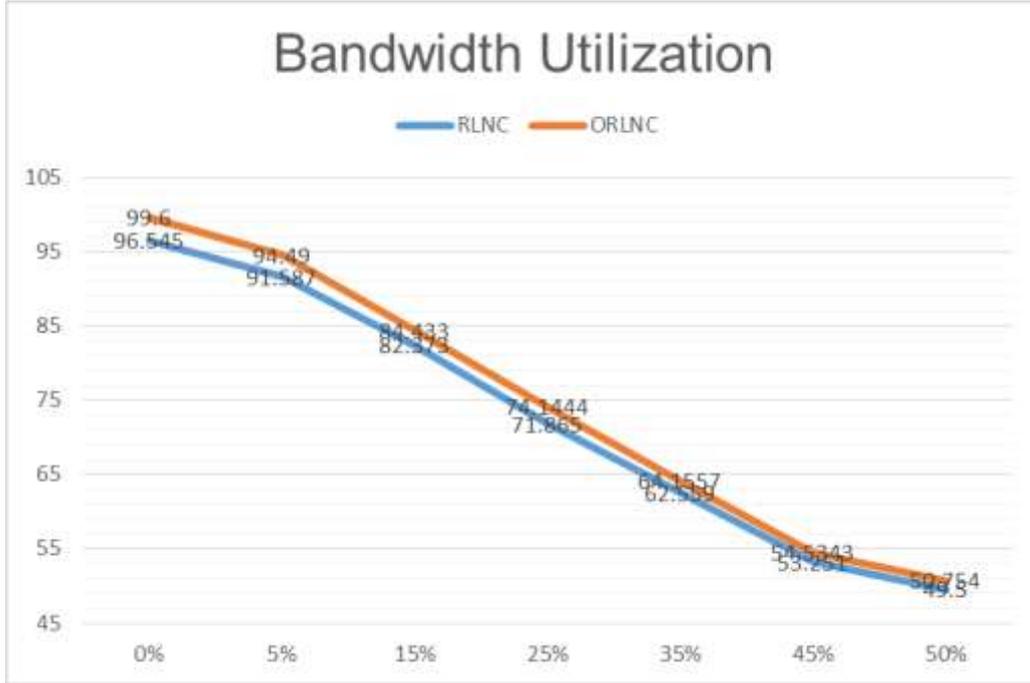
2-3 تأثير الضياع على أداء الشبكة اللاسلكية متعددة القفزات:

تم في هذه الحالة دراسة تأثير القيم المختلفة للضياع على أداء شبكة لاسلكية مؤلفة من 3 قفزات، بفرض أن حجم كتلة الترميز هي 8 فيكون هناك 125 كتلة ترميز. ويبين الجدول (3) نتائج المحاكاة لتقييم أداء الشبكة المبينة في الشكل (4).

جدول (3): أداء طريقتي الترميز التقليدية والمقترحة بالنسبة للقيم المختلفة للضياع

Loss Rate	GF(2 ^m)	RLNC			ORLNC		
		Coded	Recoded	LD	Coded	Recoded	LD
0%	4	3011	0	11	3000	0	0
5%	4	3061	113	17	3005	153	0
15%	4	3185	344	16	3025	500	2
25%	4	3371	674	25	3108	897	7
35%	5	3538	1073	7	3170	1433	2
45%	5	3835	1582	15	3372	2031	4
50%	5	3954	1866	12	3463	2337	4

نجد من النتائج الموضحة في الجدول السابق أن عدد حالات الارتباط الخطي وعدد عمليات الإرسال في الطريقة المقترحة أقل منها في الطريقة التقليدية لترميز الشبكة، وكذلك ترويسة الرزم المرمزة من المصدر بأقل حجم ممكن، فيكون بالنتيجة قيمة عامل استخدام عرض الحزمة في الشبكة أكبر كما يبين الشكل (7). ونلاحظ أن قيمة الزيادة لعامل استخدام عرض الحزمة في الطريقة المقترحة عن الطريقة التقليدية يقل بزيادة نسبة الضياع في الوسط، وتفسير ذلك أنه بزيادة نسبة الضياع تزداد عدد عمليات إعادة الترميز في العقد المتوسطة من الشبكة لتعويض هذا الضياع، وبما أن عملية إعادة الترميز تتم وفق آلية الترميز التقليدية فيقل بالمقابل قيمة هذا العامل.



الشكل (7) عامل استخدام عرض الحزمة لشبكة لاسلكية بالنسبة لقيم الضياع المختلفة

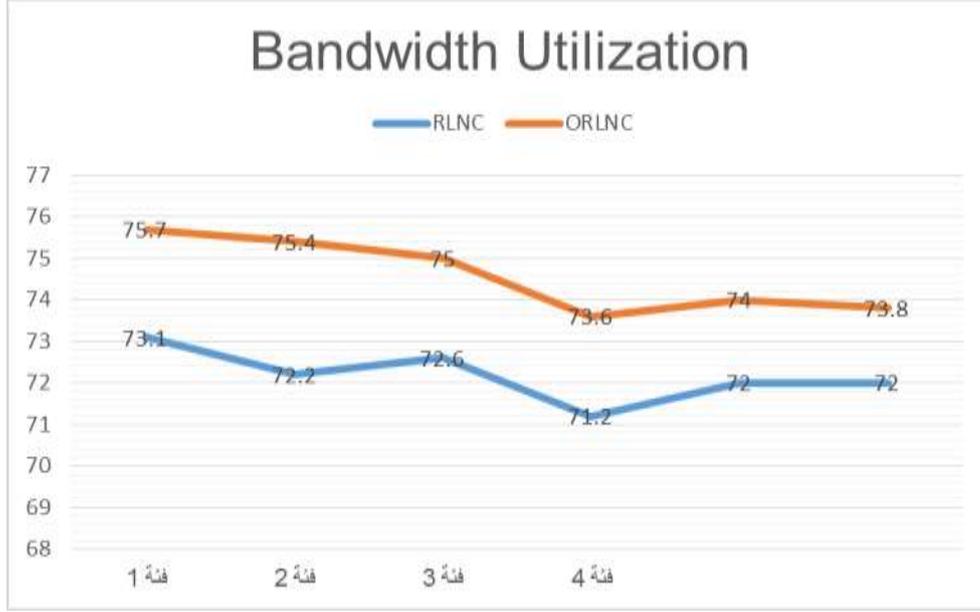
3-3 تأثير تعدد قفزات المسار على أداء الشبكة اللاسلكية ذات الضياع:

تم في هذه الحالة دراسة تأثير القيم المختلفة لعدد قفزات المسار على أداء شبكة لاسلكية ذات نسبة ضياع 25% في الوصلات اللاسلكية بين العقد، بفرض أن حجم كتلة الترميز هي 8 فيكون هناك 125 كتلة ترميز، وأن حقل غوص المستخدم هو $GF(2^4)$. ويبين الجدول (4) نتائج المحاكاة أداء الشبكة بالنسبة لطريقي الترميز التقليدية والمقترحة.

جدول (4): أداء طريقي الترميز التقليدية والمقترحة بالنسبة للقيم المختلفة للقفزات المسار

Hop Count	RLNC			ORLNC		
	Coded	Recoded	LD	Coded	Recoded	LD
1	1324	0	10	1315	0	0
2	2359	323	18	2285	341	1
3	3327	675	25	3037	915	3
4	4375	1045	30	3574	1784	15
5	5337	1364	34	3969	2682	11
6	6319	1704	42	4325	3635	7

نجد من النتائج الموضحة في الجدول السابق زيادة عدد الرزم المعاد ترميزها في الطريقة المقترحة بزيادة عدد قفزات المسار، ويكون بالمجمل عدد عمليات الإرسال الكلية وعدد حالات الارتباط الخطي بالطريقة المقترحة أقل من عددها بالطريقة التقليدية، ويوضح الشكل (8) زيادة قيمة عامل استخدام عرض الحزمة في الطريقة المقترحة عن قيمتها في الطريقة التقليدية. وتقل كذلك قيمة هذه الزيادة بزيادة عدد قفزات المسار بسبب زيادة عمليات إعادة الترميز في الشبكة.



الشكل (8) عامل استخدام عرض الحزمة لشبكة لاسلكية بالنسبة لعدد القفزات

الاستنتاجات والتوصيات:

بعد دراسة فعالية الطريقة المقترحة في الحالات المختلفة لشبكات لاسلكية متعددة القفزات، نستنتج أن الطريقة المقترحة تقدم تحسناً مهماً لأداء هذه الشبكات عن طريق التقليل من كلفة عملية الترميز والاستفادة القصوى من عرض الحزمة المستخدم في الشبكة، ويتم ذلك بشرط أساسي هو استخدام حقل غوص بالحجم المناسب لعمليات الإرسال المطلوبة. أبرز التوصيات للعمل المستقبلي هو التطبيق العملي لهذه الطريقة في شبكات الحساسات اللاسلكية، حيث أن القيم المحدودة لموارد العقد وعرض الحزمة في شبكات الحساسات يجعل من الطريقة المقترحة حلاً فعالاً ومناسباً لزيادة مردود النقل في هذه الشبكات.

المراجع:

- [1] SARKAR, S.K.; BASAVARAJU, T.G.; PUTTAMADAPPA, C. Ad Hoc Mobile Wireless Networks. Principles, Protocols, and Applications. Taylor & Francis Group, 2008, 835.
- [2] LOYD, D.B; SIVAKUMAR, D. A STUDY ON ADVANCEMENTS OF NETWORK CODING IN WIRELESS MESH NETWORK. International Journal of Science, Technology & Management Volume No 04, Special Issue No. 01, March 2015, 1392-1400.
- [3] OSTOVARI, P.; Wu, J.; Khreishah, A. Network Coding Techniques for Wireless and Sensor Networks., Springer, Vol. 1, 2014, 129-162.
- [4] M. Kim, T. Klein, E. Soljanin, J. Barros, and M. Médard. Modeling network coded tcp: Analysis of throughput and energy cost. Mobile Networks and Applications, 19(6):790 - 803, December 2014.
- [5] KARAFILLIS, P.; FOULI, K.; PARANDEHGHEIBI, A.; MÉDARD, M. An Algorithm for Improving Sliding Window Network Coding in TCP. 47th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS) (March 2013).

[6] M. V. Pedersen, J. Heide, and F. H. Fitzek, “Kodo: An open and research oriented network coding library,” in NETWORKING 2011 Workshops. Springer, 2011, pp. 145–152.

[7] Danilo Gligoroski; Katina Kravevska; Harald Øverby. “Minimal header overhead for random linear network coding”, Proceedings of IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), 2015, p. 680 – 685.

[8] T. Ho, M. Medard, R. Koetter, D. R. Karger, M. Eros, J. Shi, and B. Leong. A random linear network coding approach to multicast. Information Theory, IEEE Transactions on, 52(10):4413-4430, 2006.

[9] MEDARD, M.; SPRINTSON, A. Network Coding Fundamentals and Applications, Elsevier, ISBN: 978-0-12-380918-6, 2012, 332.

[10] Shu Lin and Daniel J. Costello, “Error Control Coding Fundamentals and Applications”, Vol. 2, 2nd Edition, Prentice Hall-Pearson Education, 2004.

[11] Nikolaos Thomos and Pascal Frossard, “Toward One Symbol Network Coding Vectors”, in IEEE Communications Letters, pp 1860-1863, November 2012.

[12] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/leexchange/53750-network-coding-simulator>.