تحديث الشبكة الضوئية الرئيسية السودانية وتحديد مواقع مراكز البيانات باستخدام البرمجة الخطية

نعمة عزالدين محمد عثمان، آية أحمد محمد، مودة حسن عبد الوهاب، هاجر يوسف محمد
كلية علوم الحاسوب وتقانة المعلومات، جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا، السودان
niema.osman@gmail.com

Received: 09/09/2019
Accepted: 22/10/2019

المستخلص – مع تطورات تقنيات الإنترنت وتعدد خدماتها، زادت كمية البيانات المنقولة عبر الإنترنت، كما زادت الحاجة لتوفير مراكز لتخزين تلك البيانات ونقلها بسرعة كبيرة للمستخدم. وبالتالي من المهم إنشاء الشبكة وربطها بما يقلل التكلفة، وتأسيس مراكز البيانات في الشبكة في أمثل المواقع لتقليل تكلفة التحميل والتخزين. تهدف هذه الورقة إلى تحديد أفضل طريقة لربط مدن السودان الرئيسية بالألياف الضوئية ومقارنة الشبكة الناتجة مع الشبكة الضوئية الحالية ومن ثم اقتراح أفضل طريقة لتحسين الشبكة. تهدف الورقة كذلك إلى ايجاد أفضل مواقع لإنشاء مراكز البيانات في الشبكة. يكون ذلك اعتماداً على مجموعة من العوامل المؤثرة مثل البعد بين المدن، وسعة الألياف الضوئية المستخدمة وعددها، وكمية الطلب على البيانات من مدينة إلى أخرى. تم استخدام البرمجة الخطية بأسلوب البرمجة الخطية للأعداد الصحيحة المختلطة في صياغة نموذجين: الأول لتحديد أفضل طريقة للربط بين مدن السودان الرئيسية عن طريق الألياف الضوئية، والثاني لإيجاد أفضل المواقع لإنشاء مراكز البيانات. كذلك استخدمت تقنية تقسيم الطول الموجي المضاعف في إنشاء شبكة الألياف الضوئية. تم اختيار كبرى مدن السودان من حيث الكثافة السكانية في اختبار النماذج، واستخدم التعداد السكاني في تحديد طلب البيانات لكل مدينة. بعد تنفيذ النموذج الأول، تم الحصول على أفضل طريقة لربط مدن السودان في الشبكة، وهي مشابهة للشبكة الضوئية الحالية. وتم استخدام النموذج لاقتراح أفضل طريقة لتحسين الشبكة بزيادة الوصلات الضوئية بين المدن. وبعد تنفيذ نموذج تحديد أفضل مواقع لمراكز البيانات، تم تحديد أفضل المدن لإنشاء مراكز البيانات في السودان، وذلك عندما يكون عدد المراكز الكلي في الشبكة من مركز واحد إلى ستة مراكز. تعتمد الطريقة الأمثل لربط العقد في الشبكة على عدد العقد والمسافة بينها وعدد الروابط. بينما يعتمد اختيار المواقع الأمثل لمراكز البيانات على عددها في الشبكة وكمية البيانات المطلوب تحميلها من وإلى مراكز البيانات.

الكلمات المفتاحية: *البرمجة الخطية للأعداد الصحيحة المختلطة، أمثل طريقة لربط الشبكة، طلب البيانات.*

ABSTRACT- With the development of Internet technology and the expansion of its services, the need for storage and fast transfer of data to end users has increased. Therefore, it is necessary to connect the network such that cost is minimized. In addition, data center locations should be optimized to reduce upload and download cost. This paper aims to find the best way to connect major Sudanese cities with optical fibers and to compare the result with the current network and subsequently propose the best way to enhance it. It also aims to identify the ideal cities to locate data centers. This is done based on a number of factors such as distances between cities, optical link capacity, number of links, and the traffic demand between cities. Mixed Integer Linear Programming (MILP) has been used to develop two models: the first model that optimizes the network topology and the second model that optimizes data center locations. The optical network is considered using Wavelength Division Multiplexing (WDM). Major Sudanese cities with the largest population were selected to test the models, where the population was used to determine the city's demand for data. The network topology optimization model produced the best way to connect Sudanese cities, and was found to be similar to the current optical network. The model was then employed to propose the best way to connect the network by increasing the number of links connecting cities. Using the data center location optimization model, the optimum cities to deploy data centers are found, when the number of data centers in the network is one to six data centers. The optimum network topology depends on the number of nodes, the distance between them and the number of links. Whereas the optimum data center locations depend on their number in the network and the amount of upload and download data.

Keywords*: Data demand, Mixed Integer Linear Programming, Network topology optimization.*

1. تمهيد

يعتبر الإنترنت اليوم من الوسائل التي لا غنى عنها في حياتنا. وفي السودان، يقدر عدد مستخدمي الإنترنت ما يقارب إثنا عشر مليون شخص يمثلون 27.8% من جملة سكان السودان [1]. وقد أدى الإنتشار الكبير لخدمات الإنترنت مثل الحكومة الإلكترونية ومواقع التواصل الإجتماعي إلى الزيادة الهائلة في البيانات. ومن المهم توفير هذه الخدمات للمستخدمين بتكاليف مناسبة. من العوامل المؤثرة على تكلفة خدمات الإنترنت تكاليف توصيل وتخزين البيانات. يتم توصيل البيانات بين المدن عبر الشبكة الرئيسية بسرعات فائقة، ويجب أن يتم ربط المدن بطريقة تضمن سرعة وصول البيانات واستمرارية الخدمة. ويتم تخزين بيانات خدمات الإنترنت فيما يعرف بمركز البيانات.

الشبكة الرئيسية هي مجموعة من العقد المربوطة فيما بينها بوصلات عالية السرعة تختلف حسب تقنية الشبكات المستخدمة. تُستخدم الشبكة الرئيسية في توصيل البيانات بين المدن البعيدة، وتمثل العمود الفقري للشبكة في المنطقة. تتكون الشبكة الضوئية الرئيسية من مجموعة من المحولات الضوئية التي تستقبل طلبات البيانات وترسلها باستخدام المنافذ إلى وجهة الطلب عبر الوصلات. تتكون وصلات الشبكة الضوئية من ليف ضوئي أو أكثر يربط بين عقدتين ويتسع الليف الضوئي الواحد لعدد من الموجات الضوئية. يحتاج كل ليف ضوئي إلى زوج من المجمعات/المفرقات وعدد من المكبرات حسب طول الليف الضوئي، كما تحتاج كل موجة إلى زوج من المتلقيات. يتشارك مشغلو خدمات الإنترنت المتعددون موارد الشبكة الرئيسية، حيث يتم استقبال وتجميع طلبات الزبائن في مدينة معينة وارسالها عبر الشبكة الرئيسية إلى وجهاتها المختلفة. وتتم مشاركة نفس الألياف الضوئية لتلبية طلبات جميع الزبائن لمختلف خدمات الإنترنت.

مركز البيانات عبارة عن منشأة ضخمة مكونة من العديد من المُخدمات السريعة ووحدات التخزين ذات السعات الكبيرة. وهي متصلة بالإنترنت بسرعات عالية جداً وتوضع في مبنى مزود بتجهيزات خاصة مثل: منظم لدرجات الحرارة، أجهزة تبريد، أجهزة إطفاء الحرائق، منظم للكهرباء، مولدات طاقة أساسية واحتياطية ونظام أمني بمواصفات أمنية عالية [2]. تكمن أهمية مراكز البيانات في التعامل مع الكم الكبير من البيانات والتي يكون من الصعب إدارتها والتحكم فيها باستخدام وسائل تخزين البيانات الإعتيادية، مما دفع الشركات والمؤسسات إلى استخدام مراكز البيانات في عملها [3].

مما سبق، لتوفير خدمات الحكومة الإلكترونية بأفضل جودة وأقل تكلفة يجب تصميم الشبكة بحيث تقلل تكلفة توصيل وتخزين البيانات، وهو ما تساهم به هذه الدراسة. وتم استخدام البرمجة الخطية للوصول إلى هذه الإسهامات لأن البرمجة الخطية تعد من أشهر الطرق لحل مشكلات تصميم المشاريع وتقليل تكلفة المنتجات.

1.1 أهمية الدراسة

تعتمد الحكومة الإلكترونية على مراكز البيانات في تخزين البيانات. وتعتبر البنية التحتية من أكبر تحديات نجاح الحكومة الإلكترونية في السودان [4]. ولذلك فمن الضروري تقليل تكلفة خدمات الحكومة الإلكترونية عن طريق إنشاء مراكز البيانات في أفضل مواقع في الشبكة والإحتفاظ بالنسخ الإحتياطية للبيانات في مدينة مختلفة عن موقع مركز البيانات الأساسي. إضافة إلى ذلك، من المهم توفير المعلومات الصحيحة لتوسعة الشبكة مستقبلاً وإنشاء مراكز بيانات إضافية لتلبية الزيادة المستمرة في الحاجة التخزينية لخدمات الإنترنت. يعمل الاختيار الجيد لموقع مركز البيانات على تقليل التكلفة التي تتحملها المؤسسات والشركات للتعامل مع هذه المراكز، إضافة إلى توفير حماية للبيانات من العوامل الطبيعية والكوارث.

1.2 مشكلة الدراسة

تتبلور مشكلة هذه الدراسة في الآتي:

أ. اعتماد الحكومة الإلكترونية في السودان على مواقع محددة لمراكز البيانات بمدينة الخرطوم تخدم كل السودان، مما يزيد الضغط على هذه المراكز. توجد جميع هذه المراكز بمدينة الخرطوم على مسافات قريبة من رئاسة المؤسسات التي تتبع لها، مما يوفر لها الحماية وسرعة الوصول.

ب. وجود مواقع محدودة للنَسخ الاحتياطية للبيانات وفي نفس المدينة (الخرطوم) يشكل خطراً على البيانات.

ت. العديد من المدن السودانية مرتبطة بمدينة واحدة أخرى بالشبكة، مما يعرض المدينة للانقطاع في حالة حدوث مشكلة بالليف الضوئي الرابط بين المدينتين.

مما سبق، نستنتج وجود حاجة كبيرة لإيجاد الطريقة الأمثل لربط مدن السودان للإستفادة منها مستقبلاً بما يضمن أقل تكلفة للخدمات وفي نفس الوقت إيجاد أفضل المدن لإنشاء مراكز البيانات في شبكة السودان من حيث حركة البيانات.

1.3 أهداف الدراسة

يمكن تلخيص أهداف الدراسة في الآتي:

أ. بحث وتقييم الدراسات السابقة المتعلقة بربط الشبكات الضوئية وتحديد مواقع مراكز البيانات.

ب. إيجاد أفضل طريقة لربط مدن السودان مع بعضها عن طريق الألياف الضوئية باستخدام البرمجة الخطية بأقل طاقة كهربائية ممكنة مع الألتزام بسعات الألياف الضوئية.

ت. تحديد أفضل المواقع في السودان لإنشاء مراكز البيانات باستخدام البرمجة الخطية.

ث. اقتراح طرق لتحسين الشبكة الضوئية من حيث زيادة درجة ربط المدن وإنشاء مراكز البيانات للإستفادة منها عند توسعة وصيانة الشبكة.

ج. التحقق من صحة نتائج نموذج ربط المدن المقترح عن طريق مقارنتها مع شبكة الألياف الضوئية الحالية.

1.4 منهج الدراسة

في هذه الدراسة، نستخدم البرمجة الخطية للأعداد الصحيحة المختلطة في صياغة نموذجين. الأول لإيجاد أفضل طريقة لربط الشبكة والذي يحدد كيفية ربط المدن مع بعضها آخذاً في الإعتبار عدد وصلات الألياف الضوئية المطلوبة لكل مدينة. يخضع النموذج لقيود سعات الألياف وقيود تدفق البيانات، ويكون هدفه الوصول لأقل استهلاك ممكن للطاقة الكهربية عن طريق تقليل الطاقة المستهلكة في أجهزة الشبكة المستخدمة في توصيل البيانات. يقوم النموذج الثاني بتحديد الأماكن المُثلى لإنشاء مراكز البيانات في الشبكة لتقليل تكاليف التخزين والتحميل، وذلك حسب عدد مراكز البيانات المطلوبة. يخضع النموذج كذلك لقيود سعات الألياف الضوئية وتدفق البيانات. تم اختيار البرمجة الخطية للأعداد الصحيحة المختلطة لتطوير النموذجين لأن المتغيرات المستخدمة في النموذجين بعضها أعداد صحيحة والبعض الآخر أعداد حقيقية. ولم تُستخدم البرمجة الخطية للأعداد الصحيحة لأن ايجاد الحل يستغرق زمن أطول ولا يكون الحل الناتج هو الأمثل في جميع الحالات.

2. الدراسات السابقة

قدمت العديد من الدراسات السابقة مقترحات لتحسين أداء الشبكات باستخدام منهجيات مختلفة، وفيما يلي ملخص لبعض الدراسات ذات الصلة بالدراسة المقترحة.

1. أيجاد أفضل المواقع لإنشاء الذاكرة المؤقتة (الكاش) في الشبكة الرئيسية للإنترنت: تمحور إهتمام هذه الدراسة حول تخفيض استهلاك الطاقة وتكلفة الكهرباء في الشبكة. تم تحديد أفضل المواقع في الشبكة لتخزين نسخ من ملفات الفيديو من خلال أطوالها وعدد مرات تحميلها بواسطة المستخدمين. استخدمت الدراسة برمجة الأعداد الصحيحة المختلطة لتطوير نموذج لتحديد أفضل مواقع للكاش، وتمت برهنة صحة النتائج عن طريق المحاكاة. توصلت الدراسة إلى أنه يمكن تخفيض ما يزيد عن 38% من الطاقة المستهلكة في الشبكة إذا تم وضع ملفات الفيديو في المكان الأمثل في الشبكة [5]. ركزت هذه الدراسة على الذاكرة المؤقتة في وجود سبعة مراكز بيانات، بينما نختبر في الدراسة المقترحة المواقع المثلى لأعداد مختلفة من مراكز البيانات في الشبكة.

2. خوارزميات لحل مشكلة مواقع مراكز البيانات في الشبكات الضوئية المطاطية: اقترحت هذه الدراسة دمج مفهوم الحوسبة السحابية مع الشبكات الضوئية المطاطية بهدف تقليل الطيف الكلي اللازم لخدمة طلبات البيانات. استخدمت الدراسة البرمجة الخطية إلى جانب المحاكاة للحصول على المواقع المثلى لمراكز البيانات في الشبكة الأوربية. كما قدرت الدراسة الطيف المطلوب توفيره مستقبلاً للإيفاء بطلبات المستخدمين حسب تنبؤات شركة سيسكو لطلبات البيانات في المستقبل [6]. لم تأخذ هذه الدراسة استهلاك الطاقة الكهربية في الاعتبار خصوصاً الطاقة المستهلكة في مراكز البيانات، حيث أنها تقترح زيادة مراكز البيانات في الشبكة لتقليل الطيف الكلي المطلوب.

3. إختيار أفضل مواقع لمراكز البيانات المهتم بالطاقة المتجددة في الشبكات الضوئية السحابية: الغرض من هذه الدراسة الحصول على أفضل مواقع لمراكز البيانات في الشبكة. تحتوي المشكلة على هدفين هما تقليل الطاقة غير المتجددة المستهلكة، حيث يعتبر استغلال الطاقة المتجددة في توفير خدمات الإنترنت

من الإتجاهات الهامة في أبحاث مجال تقانة المعلومات اليوم. والهدف الثاني هو العدد المحدود لمراكز البيانات في الشبكة. وللموازنة بين هذين الهدفين تم استخدام التحسين المعجمي [7]. تفترض الدراسة وجود مصدر للطاقة المتجددة مثل خلايا الطاقة الشمسية أو الهوائية بالقرب من كل مركز بيانات لتزويدها بالطاقة. وهذا غير ملائم لتقويم الشبكة السودانية نسبة لوجود مصادر توليد الطاقة الكهربية في مواقع محددة مثل السدود وغيرها.

4. أفضل طريقة لربط شبكة رئيسية وشبكة تجميعية وطنية: هدفت هذه الدراسة إلى تحديد أفضل عدد للموجهات الرئيسية والموجهات التجميعية في الشبكة. تم تطوير نموذج يأخذ في الاعتبار الألياف الضوئية الحالية الموجودة في الشبكة ويختبر الطرق المختلفة لتقسيم الشبكة إلى رئيسية وتجميعية ووصول، وذلك لتقليل تكلفة الشبكة. افترضت الدراسة كمية بيانات تتناسب مع طلبات تصفح الإنترنت والحوسبة السحابية وتطبيقات تحميل الفيديو والتلفاز. خلصت نتائج الدراسة إلى أنه على الرغم من الاتجاه السائد للتقليل المستمر لعدد عقد الشبكة الريئسية فإنه لتقليل تكلفة الشبكة يجب أن يتراوح عدد عقد الشبكة الرئيسية بين عشر وعشرين عقدة، وألا يقل عددها عن خمس عشرة عقدة، وذلك لاستيفاء بعض الاعتبارات العملية مثل بقاء الشبكة ومتطلبات توجيه البيانات [8]. تمت الاستفادة من نتائج هذه الدراسة باختيار سبع عشرة عقدة رئيسية في الشبكة في الدراسة المقترحة.

5. تحسين الشبكة متعددة الطبقات: مزايا الشبكات الضوئية المطاطاية: في هذه الدراسة تم تحسين الطبقتين الفيزيائية والافتراضية لشبكة ألمانيا ذات الخمسين عقدة مع الأخذ في الاعتبار تكلفة الشبكة واستهلاك الطاقة. تمت المقارنة بين الشبكة العادية مقابل الشبكة المطاطية باستخدام قيم مختلفة لكمية البيانات. توصلت الدراسة إلى أن ربط عقد الشبكة الرئيسية ربط كامل مباشر يحقق أقل تكلفة وأقل استهلاك للطاقة لنقل البيانات، بينما لا تتأثر نتائج الطبقة الافتراضية بطريقة ربط الطبقة الفيزيائية [9]. تفترض هذه الدراسة عدم وجود قيمة عظمى لدرجة ربط العقد، بينما يعتبر بناء شبكة كاملة الربط غير عملي لإستغلالها لأعداد كبيرة من الأجهزة والمعدات. تمت الإشارة إلى آثار هذه المشكلة في نتائج الدراسة، حيث ذكرت النتائج أن تكلفة الشبكة المطاطية تكون عالية لأنها تستخدم أعداد كبيرة من الألياف الضوئية والمتلقيات عالية التكلفة.

6. تصميم وإيجاد أفضل طريقة لربط للشبكات الضوئية باستخدام خوارزمية البائع المتجول: تقوم فرضية هذه الدراسة على أن عقد الشبكات الضوئية مرتبطة ببعضها على شكل حلقة. تم استخدام خوارزمية البائع المتجول للحصول على أفضل طريقة لتصميم الحلقة بحيث تقلل المجموع الكلي لأوزان الروابط (الألياف). أثبتت النتائج تفوق الخوارزمية المقترحة على مثيلاتها من الخوارزميات من حيث تقليل أوزان الروابط [10]. تستخدم هذه الخوارزمية لربط الشبكة على شكل حلقة فقط، ولا تستخدم لدرجات الربط الأخرى.

7. تحديد متوسط درجة الربط الأمثل للشبكات الضوئية: قامت عدة دراسات بتحليل الشبكات الضوئية الرئيسية ومن ثم تحديد متوسط درجة الربط الأمثل (متوسط عدد الوصلات الضوئية لكل عقدة) [11][12][13]. ففي الدراسة المنشورة في المرجع [11] أثبتت التجارب أن متوسط درجة الربط 3 و4 ينتج عنه أداء قريب من الأداء المثالي للشبكة. وبالنسبة للشبكة التي يكون فيها عدد العقد 14 ومتوسط المسافة بينها 200 كلم، فإن متوسط درجة الربط التي تؤدي إلى أقل تكلفة تشغيل هي 7.5 [12]. تمت الإستفادة من هذه النتائج في تحديد درجة ربط العقد في الدراسة المقترحة.

3. شبكة الألياف الضوئية السودانية الرئيسية

اكتمل انشاء شبكة الألياف الضوئية السودانية عام 2001 وتمتلكها الشركة السودانية للاتصالات (سوداتل). تربط الشبكة 15 مدينة سودانية وهي: الخرطوم، الدامر، دنقلا، بورتسودان، كسلا، القضارف، ودمدني، سنار، الدمازين، الدويم، ربك، الابيض، نيالا، الفاشر، الجنينة [14]. يوضح الشكل (1) كيفية ربط مدن السودان عن طريق الألياف الضوئية.

شكل (1): شبكة الألياف الضوئية السودانية الرئيسية [15].

من الشكل (1) نجد أن متوسط درجة ربط عقد الشبكة هو 2.12، وهي قيمة صغيرة بالنسبة لشبكة رئيسية لدولة مترامية الأطراف تشقها أنهار وصحارى ومرتفعات. زيادة متوسط درجة الربط مهمة لزيادة إعتمادية الشبكة وخلق خيارات بديلة لتوصيل البيانات. كذلك يضمن عدم انقطاع المدن عن الشبكة في حالة حدوث أعطال في الألياف الضوئية خصوصاً عندما تعبر هذه الألياف مناطق يصعب الوصول إليها لصيانتها [16]. ومع الزيادة المطردة في البيانات المنقولة عبر الإنترنت تصبح توسعة وتحديث الشبكة الرئيسية أمراً وارداً. لذلك لابد من تقديم مقترح صحيح يُعتمد عليه يضمن عمل الشبكة بأعلى كفاءة وبأقل تكلفة ممكنة.

4. استخدام البرمجة الخطية لتحسين الشبكة الضوئية الرئيسية

تستخدم البرمجة الخطية في حل المسائل كثيرة المتغيرات، وتعمل على مبدأ إيجاد أفضل قيمة لدالة الهدف مع الإلتزام بالقيود. دالة الهدف هي المعادلة التي تعبر عن العلاقة بين المتغيرات التي تتحكم في حساب القيمة قيد الدراسة (في هذه الدراسة تكلفة تشغيل الشبكة)، والقيود هي معادلات تضمن صحة حساب المتغيرات. وللبرمجة الخطية أنواع عديدة يتم اختيار النوع الملائم للمشكلة. في هذه الدراسة تستخدم البرمجة الخطية بالأعداد الصحيحة المختلطة، وفيها يكون بعض المتغيرات أعداد صحيحة والبعض الآخر كسور.

4.1 نموذج إيجاد أفضل طريقة لربط مدن الشبكة

فيما يلي توضيح لمكونات النموذج وطريقة عمله.

4.1.1 مدخلات النموذج

أ. مجموعة العقد المطلوب ربطها والمسافة بين كل عقدتين

ب. تكلفة تشغيل المحول الضوئي والموّجه والمتلقي والمكبر والمجمع/المفرق

ت. طلب البيانات بين كل عقدتين

ث. سعة الموجة الضوئية وعدد الموجات الضوئية في الليف الضوئي

ج. العدد الأدنى للوصلات في كل مدينة (درجة الربط)

4.1.2 المتغيرات

أ. عدد المنافذ المجمعة في كل عقدة

ب. عدد الألياف الضوئية والموجات الضوئية بين كل عقدتين

ت. كمية البيانات التي تمر بين كل مدينتين

4.1.3 دالة الهدف

تحسب دالة الهدف التكلفة الكلية لتشغيل أجهزة الشبكة. والهدف من النموذج ايجاد القيمة الدنيا لدالة الهدف عن طريق تقليل الطول الكلي للألياف الضوئية في الشبكة.

4.1.4 القيود

أ. أن ترتبط كل مدينة بالعدد الأدنى للوصلات الضوئية كحد أدنى

ب. توصيل كل البيانات إلى الوجهة المطلوبة

ت. ألا تتجاوز كمية البيانات في مسار ضوئي السعة الكلية للمسار

ث. عدم استخدام وصلات ضوئية بين عقدتين غير متصلتين

4.1.5 طريقة عمل نموذج ربط مدن الشبكة

تبدأ خطوات عمل نموذج إيجاد أفضل طريقة لربط الشبكة الضوئية والموضح في الشكل (2) بتحديد قيم المدخلات وإعطاء قيم ابتدائية للمتغيرات. يقوم النموذج بافتراض قيم للمتغيرات مع الإلتزام بجميع القيود ومن ثم حساب تكلفة تشغيل الشبكة. أي أن النموذج يفرض طريقة ربط معينة للعقد ويفرض عدد الألياف الضوئية بين كل عقدتين، ويقوم بتوصيل طلبات البيانات عبر الشبكة ويحسب تكلفة التشغيل.

يكرر النموذج خطوات تعديل قيم المتغيرات وحساب تكلفة التشغيل بهدف الوصول إلى تكلفة أقل في كل تكرار. يتوقف التكرار إذا لم يكن هناك تحسن في قيمة الدالة الهدف لعدد كبير من التكرارات. وعندها ومن آخر قيم للمتغيرات نحصل على طريقة ربط مدن الشبكة وعدد الألياف والموجات الضوئية بين كل مدينتين متصلتين. وهذه القيم هي التي تؤدي إلى أقل تكلفة تشغيل.

4.2 نموذج إيجاد أفضل مواقع لمراكز البيانات

وفيما يلي العناصر المكونة للنموذج وطريقة عمله.

4.2.1 مدخلات النموذج

أ. مجموعة عقد الشبكة وكيفية ربطها والمسافة بين كل عقدتين

ب. تكلفة تشغيل أجهزة الشبكة إضافة إلى تكلفة تشغيل مراكز البيانات

ت. طلب البيانات بين المدن وبيانات التحميل من وإلى مراكز البيانات

ث. سعة الموجة الضوئية وعدد الموجات الضوئية في الليف الضوئي

ج. عدد مراكز البيانات في الشبكة

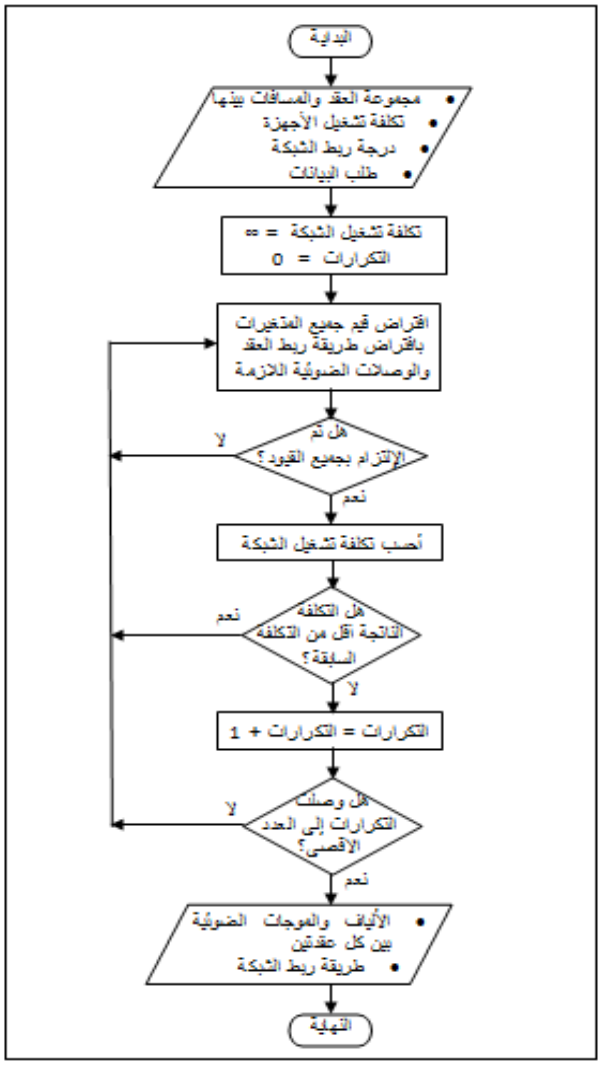
4.2.2 المتغيرات

أ. عدد المنافذ المجمعة في كل عقدة

ب. عدد الألياف الضوئية والموجات الضوئية بين كل عقدتين

ت. كمية البيانات التي تمر بين كل مدينتين لطلب البيانات العادية والبيانات من وإلى مراكز البيانات

ث. مواقع مراكز البيانات في الشبكة



شكل (2) مخطط خطوات نموذج ربط مدن الشبكة

4.2.3 دالة الهدف

تحسب دالة الهدف التكلفة الكلية لتشغيل أجهزة الشبكة. والهدف هنا هو ايجاد القيمة الدنيا لدالة الهدف عن طريق وضع مراكز البيانات في المدن بحيث يؤدي ذلك إلى أقل تكلفة تشغيل ممكنة.

4.2.4 القيود

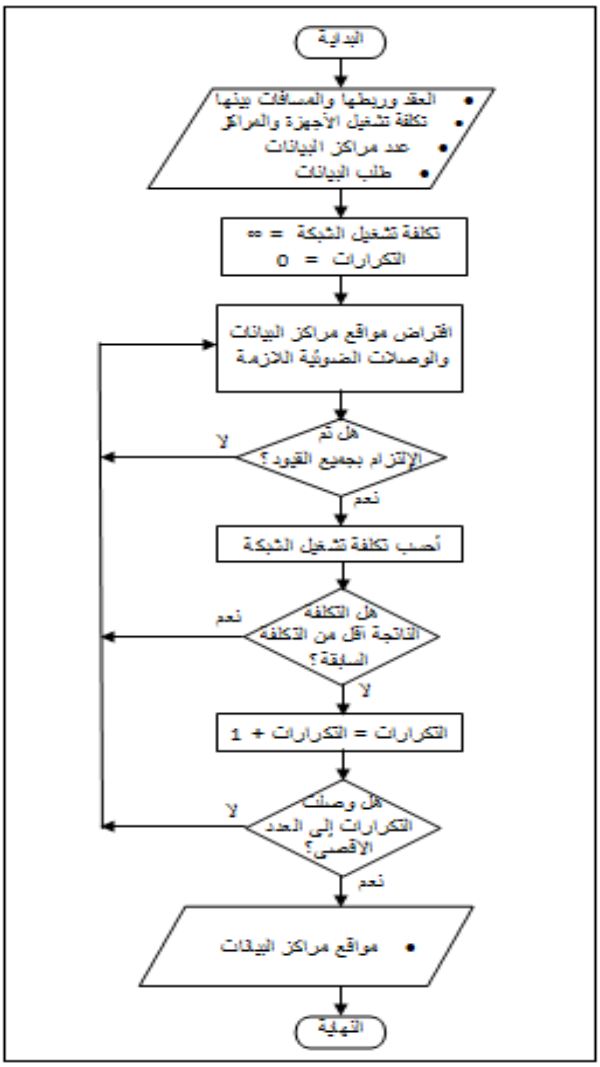
أ. توصيل كل البيانات إلى الوجهة المطلوبة بين المدن ومراكز البيانات

ب. ألا تتجاوز كمية البيانات في مسار ضوئي السعة الكلية للمسار

ت. استغلال جميع مراكز البيانات المطلوبة في الشبكة

4.2.5 طريقة عمل نموذج تحديد مواقع مراكز البيانات

يوضح الشكل (3) خطوات تنفيذ النموذج، وهي شبيهة بنموذج ربط مدن الشبكة. تكمن الاختلافات بين النموذجين في أن هذا النموذج يستخدم شبكة ضوئية رئيسية مكتملة الربط كمدخلات بالإضافة إلى عدد مراكز البيانات المطلوب تحديد مواقعها بالشبكة. يقوم هذا النموذج في كل تكرار بافتراض مواقع مراكز البيانات ومن ثم حركة سير البيانات بين المدن ومن وإلى مراكز البيانات. وفي كل تكرار يتم حساب تكلفة تشغيل الشبكة. مخرجات النموذج هي مواقع مراكز البيانات في الشبكة التي تؤدي إلى أقل تكلفة للتشغيل.



شكل (3) مخطط خطوات نموذج تحديد مواقع مراكز البيانات

5. النتائج

فيما يلي شرح لمدخلات نموذج ربط مدن الشبكة ونموذج تحديد مواقع مراكز البيانات وكيفية تنفيذهما وعرض النتائج.

5.1 المدخلات

فيما يلي شرح لأهم مصفوفات الإدخال ومدن السودان التي تم اعتبارها وقيم المعاملات الرئيسية.

5.1.1 مدن السودان

تم اختيار أكبر عشرين مدينة سودانية من حيث الكثافة السكانية من قائمة مدن السودان [17]. بعدها تم دمج بعض المدن المتجاورة بغرض تضمين أكبر عدد من المدن في الدراسة، حيث يزداد تعقيد وزمن تنفيذ النموذج بزيادة عدد العقد. تم دمج كل من (عطبرة مع الدامر) و(الضعين مع نيالا) و(المناقل مع ود مدني) و(الدويم مع كوستي). كذلك تمت إضافة مدينتين من شمال السودان (دنقلا ومروي) لتغطي الدراسة مساحة أكبر من السودان، ليصبح العدد الكلي للمدن سبعة عشر مدينة. تستعين الدراسة بالمسافات بين المدن بالكيلومترات وتم أخذها من toponavi [18]. يوضح جدول (1) المدن التي تم اختيارها لإجراء الدراسة، والمسافة بينها وبين مدينة الخرطوم. يمكن العودة للمرجع [18] لاستخلاص المسافات بين بقية المدن. يوضح الجدول كذلك الكثافة السكانية لكل مدينة، حسب التعداد السكاني لعام 2006 [17]، وهو آخر تعداد سكاني تتوفر بياناته على شبكة الإنترنت.

جدول (1) البعد بين مدينة الخرطوم وبقية المدن

المدينة	عدد السكان [17]	المسافة إلى الخرطوم بالكيلومتر [19]
الخرطوم	6,686,738	0 كلم
بورتسودان	474,363	673 كلم
وادي حلفا	33,631	712 كلم
كسلا	419,031	412 كلم
القضارف	336,522	298 كلم
الدمازين	199,667	456 كلم
كادوقلي	90,186	587 كلم
ودمدني	345,291	162 كلم
نيالا	532,183	914 كلم
الجنينة	170,618	1111 كلم

دنقلا	150,161	462 كلم
الابيض	410,941	373 كلم
سنار	136,564	241 كلم
كوستي	364,331	265 كلم
مروي	157,729	339 كلم
الفاشر	264,734	803 كلم
الدامر	109,740	276 كلم

5.1.2 المسافات بين المدن وطلب البيانات

تم استخدام مصفوفتين لتخزين المسافات بين المدن وكمية طلب البيانات بين هذه المدن، وهما:

1. مصفوفة المسافات: وهي ذات سبعة عشر صفاً وسبعة عشر عموداً يمثل كل عنصر فيها البعد بين مدينتين.
2. مصفوفة طلب البيانات: تشبه في هيكلها مصفوفة الأبعاد. يتم فيها تحديد كمية البيانات المطلوبة بين كل مدينتين. نسبة لعدم توفر بيانات حقيقية لمقدار طلب البيانات بين مدن السودان المختلفة فقد تم الحصول على هذه الكميات بطريقتين:

أ. عن طريق توليد أرقام عشوائية لها مدى ومتوسط، وذلك للحصول على النتائج بواسطة قيم متماثلة لكمية طلب البيانات بين المدن. يتراوح طلب البيانات بين أي مدينتين بين 20Gb/s و 240Gb/s، آخذين في الإعتبارأن متوسط طلب البيانات بين المدن هو 130Gb/s.

ب. باستخدام الكثافة السكانية كمؤشر لكمية طلب البيانات للحصول على تقريب منطقي، بافتراض أن كمية البيانات للمدينة تتناسب مع عدد سكانها.

5.1.3 استهلاك الطاقة الكهربية

لحساب تكلفة العمليات في الشبكة، تم اختيار استهلاك الطاقة الكهربية، لكونها من العوامل الرئيسية المؤثرة على التكلفة الكلية لتشغيل الشبكة. يوضح جدول (2) استهلاك الطاقة الكهربية لأجهزة الشبكة ومواصفات الموجات الضوئية إضافة إلى كمية حركة تحميل وتخزين البيانات [4].

جدول (2) قيم استهلاك الطاقة الكهربية

80(km)	البعد بين أي مكبرين
16	عدد الموجات الضوئية في الليف الضوئي
40(Gb/s)	سعة الموجة الضوئية في الليف الضوئي
400(W)	تكلفة مَنْفذ المُوَجِّه
73(W)	تكلفة المتلقيات
8(W)	تكلفة المكبر
85(W)	تكلفة المحول الضوئي
16(W)	تكلفة المجمع/المفرق
100000(w)	تكلفة مركز البيانات
1.0	نسبة طلب تخزين البيانات في مركز البيانات إلى الطلب العادي
7.5	نسبة طلب تحميل البيانات من مركز البيانات إلى الطلب العادي

5.2 تشغيل النموذجين

تم الحصول على النتائج باستخدام نموذجين، الأول لإيجاد طريقة ربط عقد الشبكة، والآخر لتحديد مواقع مراكز البيانات. يحتوي النموذج الأول على معادلات لتقليل الطول الكلي للألياف الضوئية المستخدمة لربط الشبكة في ظل قيود الربط والسعات وتدفق البيانات التي تم شرحها، وقمنا تنفيذ النموذج بعد مده بالمدخلات التي تم تعريفها مسبقاً. أما النموذج الثاني فيحتوي على معادلات لتقليل التكلفة الكلية للعمليات في الشبكة متمثلة في الطاقة الكهربية المستهلكة في توصيل البيانات. يتم استخدام طريقة الربط المثلى والتي حصلنا عليها من النموذج الأول كمدخلات للنموذج الثاني لتحديد أفضل مواقع لمراكز البيانات.

لتنفيذ النموذجين، تمت صياغة المعادلات باستخدام البرمجة الخطية بالأعداد الصحيحة المختلطة. تم تطبيق وحل النماذج باستخدام محلل البرمجة الخطية AMPL/CPLEX والذي يستخدم الدالة Dual Simplex في حل المعادلات لإيجاد الحل الأمثل. في هذه الدراسة تم استخدام جهاز TOSHIBA بنظام التشغيل WINDOWS 7 Ultimate ومعالج Intel® Core™ i3-3120M CPU@ 2.50GHz 2.50GHz وذاكرة وصول عشوائي (RAM) حجمها 6GB ونوع نظام التشغيل 64-bit. يستغرق زمن التنفيذ للنموذج الأول 6 ساعات والنموذج الثاني 7 ثوانٍ، حيث يتطلب النموذج الأول زمناً طويلاً في التنفيذ نظراً لكثرة الخيارات لربط العقد.

يعرض نموذج ربط الشبكة نتيجة ربط المدن وهي عبارة عن مصفوفة تحتوي على سبعة عشر صف وسبعة عشر عمود. تحتوي كل خانة على القيمة 1 أو 0. الرقم 1 يعني ارتباط المدينتين بالألياف الضوئية والرقم 0 يعني عدم ارتباطهما. يعرض نموذج تحديد مواقع مراكز البيانات نتيجة اختيار أفضل موقع لإنشاء مراكز البيانات وهي عبارة عن مصفوفة من سبعة عشر

عنصر. تحتوي كل خانة على القيمة 1 أو 0، حيث تعني القيمة 1 وجود مركز بيانات والقيمة 0 تعني عدم وجود مركز بيانات في المدينة المعينة.

5.3 نتائج نموذج إيجاد أفضل طريقة لربط مدن السودان

فيما يلي عرض لنتائج تنفيذ النموذج باستخدام طريقتين لحساب طلب البيانات بين المدن: طريقة طلب البيانات العشوائي وبالإعتماد على الكثافة السكانية للمدن.

شكل (4) أفضل طريقة لربط المدينة بمدينة واحدة أو أكثر

شكل (5) أفضل طريقة لربط المدينة بمدينتين أو أكثر

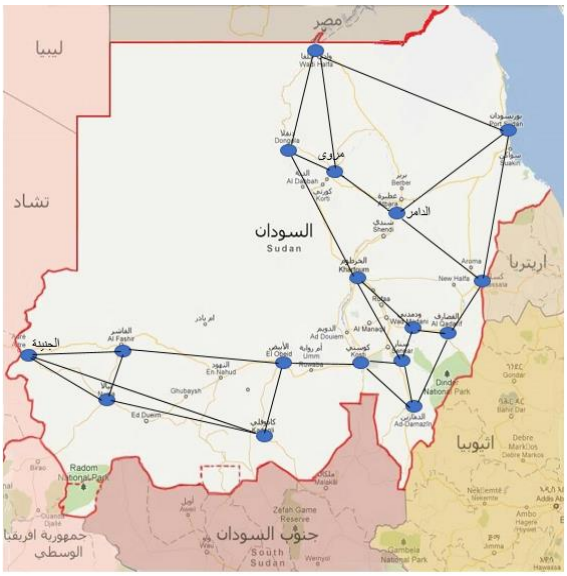
5.3.1 طلب البيانات العشوائي

تم تشغيل النموذج بناءً على المسافات بين المدن بالإضافة إلى العوامل والمتغيرات المكونة لمجموعة القيود كطول الرابط، وسعة الرابط، وكمية البيانات، وتحديد أن تكون كل مدينة مربوطة بمدينة واحدة على الأقل. وكانت النتيجة التي تم التوصل اليها أنه تم ربط المدن مع بعضها كما هو موضح بالخريطة في شكل (4). تم اقتباس خريطة السودان من الموقع [19]. عند مقارنة الشكل (1) مع الشكل (4) نلاحظ التشابه في طريقة ربط الشبكتين مما يؤكد على صحة نتائج النموذج. تعزى الاختلافات الطفيفة بين الشبكتين إلى وجود مدن إضافية بالنموذج (حلفا، مروي، كوستي، كادوقلي). كما أسلفنا سابقاً أنه لا يُفضل ربط المدينة بالشبكة عن طريق مسار واحد فقط، لأن ذلك لا يوفر إعتمادية جيدة للشبكة في حالة إنقطاع هذا المسار الوحيد. عليه نقدم عدد من المقترحات لتحسين الشبكة وذلك بزيادة درجة ربط الشبكة عن طريق ربط المدينة الواحدة: أ/ بمدينتين أو أكثر ب/ بثلاث مدن أو أكثر ج/ بأربع مدن أو أكثر.

تم تنفيذ النموذج مرة ثانية بعد تغيير الشرط ليقوم بربط كل مدينة بمدينتين على الأقل لمعرفة التغييرالذي سيحدث على طريقة الربط. والنتيجة موضحة في الخريطة في شكل (5). نلاحظ أن كل مدينة ارتبطت بأقرب مدينتين جغرافياً. أي أنها ارتبطت بأقصر طول ممكن للألياف الضوئية. مثلاً ارتبطت مدينة سنار بود مدني وكوستي بينما ارتبطت مدينة الجنينة بالفاشر ونيالا.

تم إعادة التنفيذ مرة ثالثة مع تغيير شرط الربط ليستوجب ربط كل مدينة بثلاث مدن للحصول على طريقة ربط مختلفة يتم من خلالها الوصول إلى المدينة المراد إرسال البيانات إليها أو جلبها. توضح الخريطة في شكل (6) أفضل طريقة للربط.

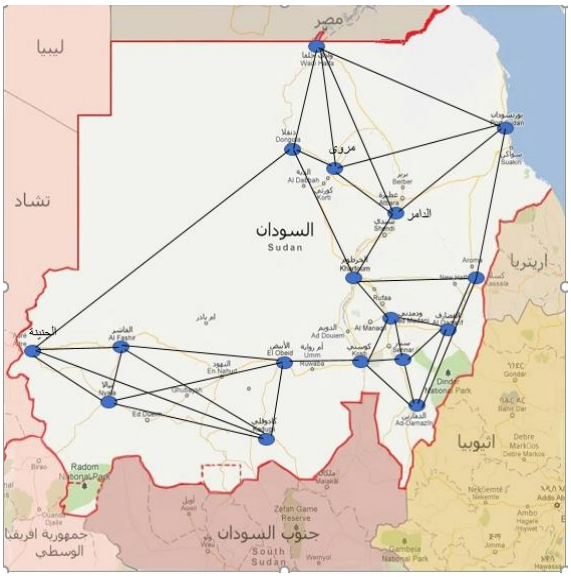
وفي تنفيذ رابع للنموذج تم وضع الشرط على أنه يجب توصيل كل مدينة بأربع مدن، وذلك لمعرفة تأثير زيادة عدد المدن المربوطة على التكلفة وعلى الطريقة المستخدمة في الربط بين المدن. توضح الخريطة في شكل (7) طريقة الربط المثلى.



شكل (6) أفضل طريقة لربط المدينة بثلاث مدن أو أكثر

5.3.2 طلب البيانات المعتمد على الكثافة السكانية

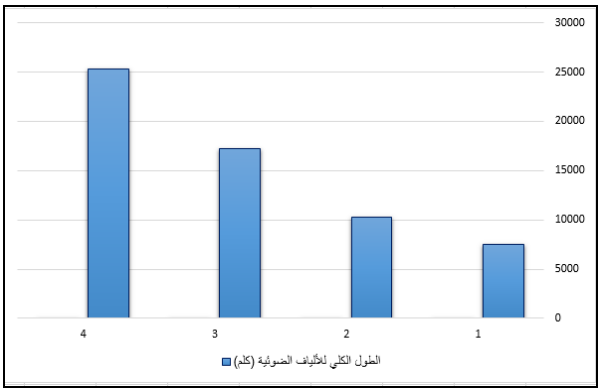
تم تغيير كمية طلب البيانات بين المدن ليتناسب طلب البيانات للمدينة مع كثافة سكانها وقمنا بإعادة تنفيذ النموذج. وبعد التنفيذ لم تتغير طريقة ربط الشبكة المثلى لجميع حالات الربط (ربط المدينة بمدينة واحدة أو مدينتين أو ثلاث أو أربع مدن) والموضحة على الخرائط في الشكل (4) إلى الشكل (7).



شكل (7) أفضل طريقة لربط المدينة بأربع مدن أو أكثر

5.3.3 أطوال الألياف الضوئية

يوضح الشكل (8) الطول الكلي للألياف الضوئية بالكيلومتر في الشبكة لكل حالة من حالات طرق الربط بين المدن. نلاحظ زيادة هذا الطول الكلي مع زيادة عدد الروابط. يمكن ترجمة هذا الطول الكلي إلى تكلفة إنشاء الوصلات في الشبكة أو حساب متوسط التأخير في الشبكة. وبالتالي يمكن استخدام هذا الشكل في تقدير حساب تكلفة إنشاء الشبكة وتقييم كفاءتها ومن ثم اختيار كثافة الربط الأنسب.



شكل (8): الطول الكلي للألياف الضوئية بالكيلومتر مقابل عدد الوصلات بين المدن

5.4 نموذج تحديد مواقع مراكز البيانات

تم تنفيذ هذا النموذج للحصول على أفضل مواقع لإنشاء مراكز البيانات، وذلك بافتراض طريقتين لكمية طلب البيانات بين المدن ولكمية طلب تحميل وتخزين البيانات من وإلى مراكز البيانات: طلب البيانات العشوائي والإعتماد على الكثافة السكانية للمدن.

5.4.1 طلب البيانات العشوائي

تم تنفيذ النموذج باستخدام عدة قيم لعدد مراكز البيانات الأقصى في الشبكة CMax (من 1 إلى 6)، ويوضح جدول (3) النتائج. توضح الأعمدة المواقع الأفضل لمراكز البيانات لكل قيمة من قيم CMax. إذا احتوت الخانة على العدد 1، يدل ذلك على اختيار النموذج لتلك المدينة لوضع مركز بيانات فيها.

تم تنفيذ النموذج عندما تم ربط المدينة بمدينة واحدة واثنتين وثلاث وأربع مدن، تم الحصول على نفس النتائج الموضحة في جدول (3). وهذا يعني أن اختيار النموذج للمواقع المثلى لمراكز البيانات لا يتغير بتغير عدد الوصلات بين المدن أو طريقة ربط الشبكة.

جدول (3): مواقع مراكزالبيانات في حالة طلب البيانات العشوائي

الرقم	المدينة	قيمة CMax					
		1	2	3	4	5	6
1	الخرطوم	0	0	0	0	0	1
2	بورتسودان	0	0	0	0	0	0
3	وادي حلفا	0	1	1	1	1	1
4	كسلا	1	1	1	1	1	1
5	القضارف	0	0	1	0	1	1
6	الدمازين	0	0	1	1	1	1
7	كادوقلي	0	0	0	0	0	0
8	ودمدني	0	0	0	0	1	1
9	نيالا	0	0	0	0	0	0
10	الجنينة	0	0	0	0	0	0
11	دنقلا	0	0	0	0	0	0
12	الأبيض	0	0	0	0	0	0
13	سنار	0	0	0	0	0	0
14	كوستي	0	0	0	0	0	0
15	مروي	0	0	0	0	0	0
16	الفاشر	0	0	0	0	0	0
17	الدامر	0	0	0	0	0	0

5.4.2 طلب البيانات المعتمد على الكثافة السكانية

يوضح جدول (4) المواقع الأمثل لمراكز البيانات عند استخدام طلب البيانات الذي يتناسب مع الكثافة السكانية للمدن. وتتطابق النتائج في حالة ربط المدينة بمدينة واحدة أو اثنين أو ثلاث أو أربع مدن أخرى. نلاحظ أن النتائج المتحصل عليها في جدول (4) تختلف عن تلك الموضحة في جدول (3)، أي أن المواقع المثلى لمراكز البيانات تختلف بل وتعتمد أساساً على كمية طلب بيانات التحميل والتخزين من وإلى مراكز البيانات.

يوضح شكل (9) مواقع مراكز البيانات المثلى في حالة طلب البيانات المعتمد على الكثافة السكانية عندما يكون عدد مراكز البيانات في الشبكة هو 3. نلاحظ أن أفضل مواقع لمراكز البيانات في الشبكة هو كل من الخرطوم و كوستي ونيالا.

6. مناقشة النتائج

فيما يلي نناقش النتائج التي توصلنا إليها بعد تجربة نموذجي ربط مدن الشبكة وتحديد مواقع مراكز البيانات بعدد كبير من قيم المدخلات.

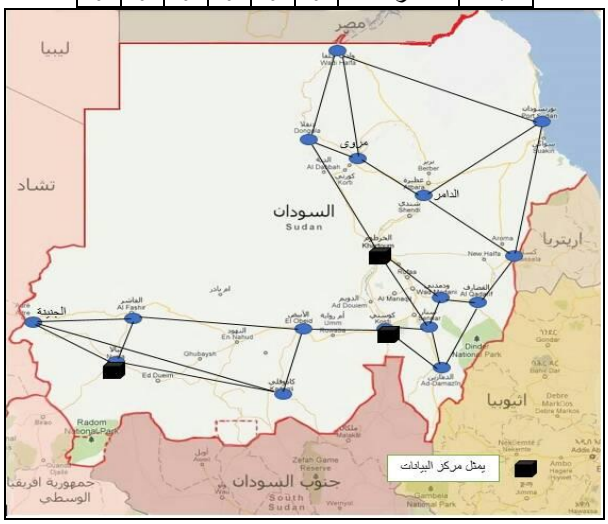
6.1 نموذج ربط مدن الشبكة

نلاحظ أنه كلما زاد عدد الوصلات التي تربط بين المدن، زادت المسارات المحتملة للبيانات، مما يزيد الإعتمادية ويقلل الإزدحام. ولكن يجب مراعاة إحتياجات الشبكة وتكلفة إنشاء وتشغيل هذه الألياف الضوئية ثم اختيار العدد الأنسب حسب كمية البيانات التي تمرعبر الشبكة والسعة الكلية للألياف.

تعتبر النتائج التي توصلنا إليها من هذا النموذج غاية في الأهمية عند توسعة أو صيانة الشبكة. فعندما يتم توصيل عقد الشبكة مع بعضها البعض باستخدام هذا النموذج، فإنه يضمن أن تكون طريقة التوصيل هي الأفضل من حيث التكلفة. وعند توسعة الشبكة يتم تحديد طريقة الربط الجديدة المثلى، وهذا من شأنه تقليل تكلفة توسعة الشبكة مع الحصول على أفضل مسارات للبيانات.

جدول (4) مواقع مراكز البيانات في حالة طلب البيانات المعتمد على الكثافة السكانية

الرقم	المدينة	قيمة CMax					
		1	2	3	4	5	6
1	الخرطوم	1	1	1	1	1	1
2	بورتسودان	0	0	0	1	1	1
3	وادي حلفا	0	0	0	0	0	0
4	كسلا	0	0	0	0	0	1
5	القضارف	0	0	0	0	0	0
6	الدمازين	0	0	0	0	0	0
7	كادوقلي	0	0	0	0	0	0
8	ودمدني	0	0	0	0	0	0
9	نيالا	0	1	1	1	1	1
10	الجنينة	0	0	0	0	0	0
11	دنقلا	0	0	0	0	0	0
12	الأبيض	0	0	0	0	1	1
13	سنار	0	0	0	0	0	0
14	كوستي	0	0	1	1	1	1
15	مروي	0	0	0	0	0	0
16	الفاشر	0	0	0	0	0	0
17	الدامر	0	0	0	0	0	0



شكل (9) المواقع الأمثل لثلاثة مراكز بيانات في حالة طلب البيانات المعتمد على الكثافة السكانية

يتضح أيضاً من النتائج التي حصلنا عليها أن أفضل طريقة لربط الشبكة لا تعتمد على كمية البيانات الداخلة إلى العقدة والخارجة منها، وإنما تتأثر بطول الرابط بين العقد، مما يضمن عدم الحاجة إلى تغيير طريقة ربط المدن الحالية في الشبكة الضوئية الرئيسية عند زيادة طلب البيانات في المستقبل.

6.2 نموذج تحديد مواقع مراكز البيانات

لا يعتمد اختيار النموذج للمواقع الأمثل لمراكز البيانات على طريقة ربط الشبكة، بل على كمية طلب تحميل البيانات من وإلى مراكز البيانات، وذلك لأن كمية البيانات التي تسير في الشبكة تؤثر على تكلفة التشغيل لأنها تحدد عدد أجهزة الشبكة اللازم تشغيلها. من هنا نستنتج أنه إذا تغيرت كمية واتجاه ومصدر طلبات البيانات في الشبكة، قد يتغيرالموقع الأمثل لمراكز البيانات في الشبكة.

بتحليل النتائج التي حصلنا عليها نلاحظ أنه عند زيادة عدد مراكز البيانات الأقصى في الشبكة، من 2 إلى 3 مثلاً، فإن النموذج يختار نفس الموقعين اللذين حصل عليهما في حالة وجود مركزين، ثم يضيف موقع جديد ثالث. وهذه النتيجة هامة، حيث تعني أنه عند إنشاء مراكزالبيانات في الشبكة في مواقعها المثلى فإنه عند الرغبة في إنشاء مركز أو مراكز بيانات إضافية، لاتتغير مواقع المراكزالمثلى الحالية في الشبكة. أي أنه لا يتحتم نقل مركز بيانات من موقعه الحالي إلى موقع آخر لتقليل تكلفة نقل البيانات، وهوأمرغاية في الصعوبة. عليه نستنتج أن الموقع الأمثل لمراكز البيانات يظل هو الأمثل حتى عند إضافة مراكز بيانات أخرى في الشبكة. ننوه إلى أن هذا الاستنتاج يكون صحيحاً إذا زادت كمية طلب البيانات في الشبكة بنفس المعدل لجميع المدن.

7. الخلاصة والتوصيات

بعد الإنتهاء من هذه الدراسة بعون الله وتوفيقه تمكنا من إيجاد أفضل طريقة لربط مدن السودان لتقليل طول الألياف الضوئية الناقلة للبيانات بين المدن لعدة خيارات ربط. كما نجحنا في تحديد مواقع مراكز البيانات الأمثل في الشبكة لضمان سهولة الوصول إلى البيانات وتقليل استهلاك الطاقة. تم ذلك بتكوين معادلات برمجة الأعداد الصحيحة المختلطة ومن ثَم تحويل هذه المعادلات إلى لغة البرمجة الخطية باستخدام برنامج AMPL ومحلل البرمجة الخطية CPLEX.

بعد تحليل البيانات وتجربة تنفيذ النموذجين بمدخلات متعددة تم تحقيق المقارنة والمطابقة بين طريقة ربط الشبكة الضوئية الرئيسية الحالية وطريقة الربط التي تحصلنا عليها بواسطة النموذج. تم اختيار أفضل طريقة لربط مدن الشبكة مع ضمان تقليل تكلفتها، وتعتمد طريقة الربط على عدد المدن والمسافة بينها. توصلت النتائج إلى عدم تأثير كمية طلب البيانات بين المدن على اختيار طريقة الربط المثلى، وبالتالي فإن تغير كمية البيانات في الشبكة لا يتطلب معه تغييرفي طريقة ربط الشبكة لتقليل التكلفة. يضمن نموذج تحديد مواقع مراكز البيانات اختيار المواقع المثلى لإنشاء مراكز البيانات بما يقلل تكلفة تشغيل الشبكة. يعتمد اختيار أفضل المواقع لإنشاء مراكز البيانات على كمية طلب تخزين وتحميل البيانات. وبالتجارب المستمرة استنتجنا عدم اختلاف هذه المواقع عند تغيير طريقة ربط المدن.

يمكن تطوير هذين النموذجين بأخذ بعض القيود الإضافية في الإعتبار. مثلاً التضاريس، حيث لا يفضل ربط مدينتين بينهما مرتفعات أو أي عوائق طبيعية أخرى. كذلك يمكن وضع أفضلية في اختيار مواقع مراكز البيانات من حيث موقعها الجغرافي (ألا تكون مدينة حدودية مثلاً) أو الظروف الأمنية للمدينة. نوصي بتجربة هذين النموذجين باستخدام بيانات حقيقية لكمية طلب البيانات بين مدن السودان للحصول على نتائج فعلية لاستهلاك الطاقة في الشبكة.

المصادر والمراجع

[1] Internet World Stats: Usage and Population Statistics. http://www.internetworldstats.com /africa.htm (retrieved September 2019).

[2] How a data center works, today and tomorrow. https://www.networkworld.com/article/3223692/data-center/what-is-a-data-center-architecture-components-standards-infrastructure-cloud.html (retrieved March 2017).

[3] مناف عقيل مهدي. *ماهو مركز البيانات؟ وكيف نستفيد من مركز البيانات مع خطوات تصميمه*. http://munafaqeelmahdi.blogspot.com/2016/08/Data-Center.html (تاريخ الاقتباس: مارس. 2017).

[4] Mohamed, B. (2014). An Overview of E-Government Strategy in Sudan. *European Journal of Computer Science and Information Tecgnology*. v. 2. (4). p. 1-9.

[5] Osman, N. I. (2017). Cost and Power Minimized Content Placement for Content Distribution Networks. *Journal of Modern Computer Networks*. v. 1. (4). p. 4-13.

[6] Klinkowski, M. Walkowiak, K. Goścień, R. (2013). Optimization algorithms for data center location problem in Elastic Optical Networks. *15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. pp. 1-5. Cartagena.

[7] Wu, Y. Tornatore, M. Thota, S. Mukherjee, B. (2015). Renewable-energy-aware data center placement in optical cloud networks. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. pp. 1-3. USA.

[8] Behrens, C. Hülsermann, R. Jäger, M. and Raack, C. (2015). On the Optimum Topology of a Nationwide Aggregation and Core Network, *20th European Conference on Networks and Optical Communications - (NOC)*, London, pp. 1-5.

[9] Klekamp, A. (2012). Multi-Layer Network Optimization: Benefits of Elastic Optical Networks. *14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON*), Coventry, pp. 1-5.

[10] Rahman, I. J. Zain, A. R. and Syambas, N. R. (2016). A New Heuristic Method for Optical Network Topology Optimization. *2nd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*. Pp. 73-77. Yogyakarta. Indonesia.

[11] Freire, M. Rodrigues, J. and Coelho. R. (2003). The Role of Network Topology in the Optical Core of IP-over-WDM Networks with Static Wavelength Routing. *Telecommunication Systems*. Vol. 24. (2-4). pp 111-122.

[12] Claunir, P. Morais, R. Abel, R. and Armando. P. (2008). Impact of the Mean Nodal Degree On Optical Networks. *Proceeding of SPIE the International Society for Optical Engineering*. Vol. 7099. pp 1-7.

[13] Nonkomo, M. and Sewsunker. R. (2004) Optical Backbone Topology Choice. *IEEE 7th African Conference in Africa*. Vol. 1. pp 353-359. Gaborone.

[14] *مؤسسة دانفوديو القابضة. أعمال الحفر.* https://danfodio.sd/index.php/main/index/20/5/contents/23/7/sub_contents، (تاريخ الاقتباس: سبتمبر 2019).

[15] South Sudan: An Infrastructure Action Plan – African Development Bank. http://www.afdb.org (retrieved September 2019).

[16] Nolle, T. Optical Networks: Core Network Design Best Practices. http://searchnetworking.techtarget.com/tip/Optical-networks-Core-network-design-best-practices (retrieved September 2019).

[17] *قائمة مدن السودان.* https://ar.wikipedia.org/wiki/قائمة_مدن_السودان، (تاريخ الاقتباس: مارس 2017).

[18] *المسافات بين المدن.* toponavi. http://sd.toponavi.com/، (تاريخ الاقتباس: مارس 2017).

[19] *مقاتل من الصحراء. جمهورية السودان*، http://www.moqatel.com/openshare/Behoth/Dwal-Modn1/Sudan/Sudan02.jpg_cvt.htm، (تاريخ الاقتباس: سبتمبر 2017)