

Optimal Location of Emergency Service Centres Using the Set Covering Location Problem with Multiple Coverage (SCLP-MC): A Case Study of the Libyan Iron and Steel Company

Mohamed A. Eshaikh¹ , Abdalla M. Eshaikh^{*2} 

¹Administrative Audit Section, Audit Department, Libyan Iron and Steel Company, Misrata, Libya.

²Business Administration, Faculty of Economics and Political Science, Misrata University, Misrata, Libya.

*Corresponding author email: a.elshaikh@eps.misuratau.edu.ly

Received: 14-08-2026 | Accepted: 27-09-2026 | Available online: 30-09-2026 | DOI:10.26629/jtr.2026.13

ABSTRACT

This study aims to improve the distribution of emergency service centres within the Libyan Iron and Steel Company by applying the Set Covering Location Problem with Multiple Coverage (SCLP-MC) model. The model seeks to determine the minimum number of service centre locations (p) required to cover a set of demand points (n), while ensuring the achievement of a multiple coverage level (k) for all company facilities within a predefined maximum response time (t_{max}). The proposed model enhances the reliability of the emergency response system by providing backup coverage that ensures service continuity in situations involving simultaneous incidents or requiring the intervention of multiple service centres to handle large-scale events. The study utilizes accurate spatial data of the company's facilities, including geographic coordinates and travel times between locations based on the internal road network. The mathematical model was formulated using Binary Integer Linear Programming (BILP) to determine the optimal number of service centres (p) that satisfy the double-coverage requirement ($k = 2$) within the specified maximum response time ($t_{max} = 3$ minutes). The model was solved using the Excel Solver tool. The results revealed that the optimal number of emergency service centers is five ($p = 5$), ensuring double coverage for all 37 company facilities within the specified response time. The coverage analysis further indicated that 12 facilities achieved the basic coverage level provided by two centres, while 15 facilities received triple coverage, and 10 facilities achieved the highest coverage level through four service centres. These findings confirm the effectiveness of the SCLP-MC model in improving the spatial planning of emergency service centres and supporting decision-making processes aimed at enhancing safety levels and operational efficiency in industrial facilities.

Keywords: Set Covering, Multiple Coverage, SCLP-MC, BILP.

تحديد المواقع المثلى لمراكز خدمات الطوارئ باستخدام مواقع المجموعة بالتغطية المتعددة (SCLP-MC): دراسة حالة الشركة الليبية للحديد والصلب

¹محمد عبدالله الشيخ، ²عبدالله محمد الشيخ

¹قسم المراجعة الإدارية ، إدارة المراجعة، الشركة الليبية للحديد والصلب ، مصراتة، ليبيا

²قسم إدارة الأعمال ، كلية الاقتصاد والعلوم السياسية ، جامعة مصراتة ، مصراتة، ليبيا

ملخص البحث

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين توزيع مراكز خدمات الطوارئ بالشركة الليبية للحديد والصلب باستخدام نموذج مواقع المجموعة بالتغطية المتعددة (Set Covering Location Problem with Multiple Coverage - SCLP-MC)، والذي يهدف إلى تحديد الحد الأدنى من مواقع مراكز الخدمة (p) اللازمة لتغطية نقاط الطلب (n)، مع ضمان تحقيق مستوى التغطية المتعددة (k) لجميع مرافق ضمن الحد الأقصى لزمن الاستجابة (t_{max}). ويسهم هذا النموذج في تعزيز موثوقية نظام الاستجابة للطوارئ من خلال توفير تغطية احتياطية تضمن استمرارية الخدمة في حالات وقوع أكثر من حدث في الوقت نفسه، أو الحاجة إلى تدخل أكثر من مركز لمعالجة الأحداث ذات الحجم الكبير. اعتمدت الدراسة على بيانات دقيقة لمرافق الشركة، تضمنت الإحداثيات الجغرافية وأزمنة الانتقال بين المواقع بالاعتماد على شبكة الطرق الداخلية للشركة. وتمت صياغة النموذج الرياضي باستخدام أسلوب البرمجة الخطية الصحيحة الثنائية (Binary Integer Linear Programming - BILP)، بهدف تحديد العدد الأمثل للمراكز (p) التي تحقق شرط التغطية المزدوجة ($k = 2$) ضمن زمن الاستجابة الأقصى المحدد ($t_{max} = 3$) دقائق، وتم حل النموذج باستخدام أداة (Excel Solver). أظهرت النتائج أن العدد الأمثل لمراكز خدمات الطوارئ ($p = 5$)، بما يحقق التغطية المزدوجة لجميع مرافق الشركة البالغ عددها (37) مرفقاً ضمن الزمن المحدد. كما أوضح تحليل مستويات التغطية أن (12) مرفقاً حصلت على التغطية الأساسية بواسطة مركزين، بينما تمتعت (15) مرفقاً بتغطية ثلاثية، في حين حصلت (10) مرافق على أعلى مستوى تغطية بواسطة أربعة مراكز. وتؤكد هذه النتائج فعالية نموذج (SCLP-MC) في تحسين التخطيط لمراكز الطوارئ، ودعم القرارات المتعلقة برفع مستوى الأمان والكفاءة التشغيلية داخل المنشآت الصناعية.

الكلمات الدالة: التغطية، المجموعة، المتعددة، SCLP-MC، BILP.

1. المقدمة

تحديد الحد الأدنى من مواقع الخدمة (p) اللازمة لضمان تغطية نقاط الطلب (Demand Points) ضمن حد أقصى محدد لزمن الاستجابة (Maximum Response Time أو مسافة الاستجابة Maximum Coverage Distance).

يُعد هذا النموذج من الأساليب الفعالة في تخطيط مواقع مراكز خدمات الطوارئ، إذ يعتمد على تحديد المواقع التي تحقق أفضل مستوى ممكن من التغطية وفقاً للقيود التشغيلية والزمنية المعتمدة. ومع تزايد الحاجة إلى تعزيز موثوقية واعتمادية أنظمة الطوارئ، ظهرت نماذج التغطية المتعددة (Multiple Coverage Models)، التي تفرض تغطية كل نقطة طلب بواسطة عدد محدد من مراكز الخدمة (k) على الأقل ضمن حدود زمن أو مسافة الاستجابة المعتمدة. ويسهم هذا القيد في زيادة مرونة

تُعد مسائل تحديد مواقع المرافق (Facility Location Problems) من القرارات الاستراتيجية المهمة في إدارة سلاسل الإمداد، لما لها من تأثير مباشر على تصميم الشبكات التشغيلية، وكفاءة استخدام الموارد، ومستوى الخدمة المقدمة (Melo *al.*, و Farahani & Hekmatfar, (2009) (2009)، [1, 2]. تكتسب هذه المسائل أهمية خاصة في أنظمة خدمات الطوارئ، حيث يؤثر التوزيع المكاني الأمثل لمراكز الخدمة على سرعة الاستجابة وموثوقية النظام وقدرته على التعامل مع الحالات الطارئة بكفاءة. ومن أبرز النماذج الرياضية المستخدمة في معالجة مسائل تحديد المواقع نماذج تغطية المجموعة (Set Covering Location Problems- SCLP)، التي تهدف إلى

الاستجابة، ورفع مستوى الاعتمادية، وتحقيق الاستخدام الأمثل للموارد المتاحة. قَدَّم الشيخ (2026) في رسالة الماجستير نموذجاً لتحديد المواقع المثلى لمراكز خدمات الطوارئ بالشركة باستخدام نموذج المجموعة بالتغطية الأحادية (SCLP)، بهدف تحديد الحد الأدنى من مراكز الخدمة (p) القادرة على تغطية جميع نقاط الطلب ضمن زمن استجابة لا يتجاوز (3) دقائق. وقد اعتمد هذا المعيار ($t_{max}=3$) حداً أقصى لزمن الاستجابة في الدراسة الحالية، استناداً إلى ما ورد في رسالة الماجستير التي طُوِّر فيها النموذج الرياضي، وبناءً على مقابلة أجراها الباحث مع مدير إدارة السلامة المهنية، الذي حدد الزمن المقبول للاستجابة للطوارئ بين (3 و 5) دقائق. وعليه، اعتمدت مدة (3) دقائق معياراً لزمن الاستجابة في النموذج، في حين تمثل الدقيقتان المتبقيتان هامشاً زمنياً لجاهزية فريق الطوارئ واستعداده للتدخل، حيث يقوم النموذج على مبدأ التغطية الأحادية، بحيث تُعد نقطة الطلب مغطاة متى وقعت ضمن نطاق خدمة مركز واحد [3].

وعلى الرغم من فعالية هذا النهج (SCLP) في ظروف التشغيل الاعتيادية، إلا أن الاكتفاء بالتغطية الأحادية قد لا يحقق مستوى الاعتمادية المطلوب في أنظمة الطوارئ، خاصة في الحالات التي يكون فيها مركز الخدمة الأقرب مشغولاً بالاستجابة لحادث آخر، أو عندما يتطلب الحادث في المرفق الطالب للخدمة مشاركة أكثر من مركز خدمة. وفي مثل هذه الحالات قد تصبح التغطية الأحادية غير كافية لضمان استمرارية الخدمة وكفاءة الاستجابة.

وبناءً على هذه الاعتبارات، تتمثل مشكلة الدراسة الحالية في تطوير نموذج تغطية المجموعة (SCLP) من خلال دمج قيد التغطية المزدوجة (Multiple Coverage Constraint)، بحيث يتم ضمان تغطية كل مرفق من المرافق البالغ عددها ($n = 37$) بواسطة مركزي خدمة ($k = 2$) على الأقل من بين مراكز الخدمة المختارة (p). ولتحقيق ذلك، يُعرَّف المتغير (a_{ij}) بحيث يأخذ القيمة (1) إذا كان مركز الخدمة (j) قادراً على

النظام ورفع مستوى جاهزيته، من خلال تقليل مخاطر عدم توفر الخدمة الناتجة عن انشغال أحد المراكز بمعالجة حدث قائم، أو الحاجة إلى تدخل أكثر من مركز خدمة للتعامل مع الأحداث ذات الحجم أو التعقيد المرتفع.

تُعد هذه الدراسة امتداداً لدراسة الشيخ (2026)، التي تم فيها استخدام النموذج الرياضي لتغطية المجموعة (Set Covering Location Problem - SCLP) أحادي التغطية لتحديد المواقع المثلى لمراكز خدمات الطوارئ في الشركة الليبية للحديد والصلب بالاعتماد على معيار زمن الاستجابة (Response Time) [3].

وتتميز هذه الدراسة بتطوير نموذج مواقع المجموعة بالتغطية الأحادية (SCLP) من خلال الأخذ في الاعتبار التغطية المتعددة (Multiple Coverage)، بما يضمن تغطية كل مرفق بواسطة عدد لا يقل عن ($k = 2$) مراكز الخدمة، بما يعزز اعتمادية نظام الاستجابة للطوارئ، خصوصاً في الحالات التي يكون فيها المركز الأقرب مشغولاً بحادث آخر أو عندما تتطلب طبيعة الحادث تدخل أكثر من مركز خدمة. كما تتمثل المساهمة العلمية للدراسة في تطبيق هذا النموذج لأول مرة على الشركة الليبية للحديد والصلب، بالاعتماد على البيانات الفعلية لمرافق الشركة وإحداثياتها الجغرافية وأزمنة الانتقال عبر شبكة الطرق الداخلية، بما يتيح تحديد التوزيع الأمثل لمراكز خدمات الطوارئ ومستويات التغطية لكل مرفق ضمن زمن الاستجابة المحدد، ويوفر أساساً علمياً لدعم قرارات تخطيط خدمات الطوارئ وتعزيز استمرارية الاستجابة داخل المنشأة الصناعية.

2. مشكلة البحث:

تُعد خدمات الطوارئ داخل المنشآت الصناعية، مثل وحدات الإطفاء والعيادات الطبية، من العناصر الأساسية لضمان سلامة العاملين وحماية الأصول من المخاطر المحتملة، ومع اتساع النطاق الجغرافي وتعدد العمليات التشغيلية في الشركة الليبية للحديد والصلب، تبرز الحاجة إلى تخطيط فعال لمراكز خدمات الطوارئ يضمن سرعة

الأدنى من مرافق الخدمة اللازمة لتغطية جميع نقاط الطلب ضمن مسافة أو زمن استجابة محدد [4, 5].

تُعد دراسة (Toregas et al. (1971) من الدراسات التأسيسية في مجال نماذج تحديد مواقع التغطية (Location Covering Models)، حيث قدمت نموذج تحديد مواقع تغطية المجموعة (SCLP)، الذي أصبح أحد النماذج الأساسية في تخطيط مواقع مرافق الخدمة. ويهدف هذا النموذج إلى تحديد الحد الأدنى من مواقع الخدمة (p) اللازمة لتغطية جميع نقاط الطلب (n) ضمن حد أقصى محدد لزمن أو مسافة الاستجابة (t_{max})، بالاعتماد على أسلوب البرمجة الخطية الصحيحة الثنائية (Binary Integer Linear Programming – BILP). وقد افترض النموذج في صيغته التقليدية أن جميع نقاط الطلب تتمتع بنفس مستوى الأهمية وتخضع لنفس قيود التغطية، بحيث تتحقق التغطية بمجرد وقوع نقطة الطلب ضمن نطاق خدمة مركز واحد. وقد شكل هذا النموذج الأساس الرياضي الذي استندت إليه الدراسة الحالية، مع تطويره من خلال إضافة قيد التغطية المتعددة (Multiple Coverage Constraint) لضمان تغطية مرافق الشركة بواسطة أكثر من مركز خدمة، بما يعزز اعتمادية نظام الاستجابة للطوارئ في الحالات التي يتعذر فيها الاعتماد على مركز واحد نتيجة انشغاله بحادث آخر أو الحاجة إلى تدخل عدة مراكز للتعامل مع الأحداث ذات المتطلبات التشغيلية المرتفعة [6].

قدّم Church and ReVelle (1974) نموذجاً لحل مشكلة تُعرف بمشكلة تحديد مواقع التغطية القصوى (Maximal Covering Location Problem–MCLP) باعتباره امتداداً لنموذج تغطية المجموعة (SCLP) الذي قدمه (Toregas et al.) ويهدف النموذج إلى تحديد المواقع المثلى لعدد محدد مسبقاً من مرافق الخدمة ($\sum X_j \leq p$) بهدف تعظيم عدد نقاط الطلب التي يمكن تغطيتها ضمن حد أقصى لزمن أو مسافة الاستجابة. ويختلف هذا النموذج عن (SCLP) في أنه لا يشترط تحقيق التغطية الكاملة لجميع نقاط

تغطية المرفق (i) ضمن معيار زمن الاستجابة المعتمد ($t_{max} = 3$)، ويأخذ القيمة (0) خلاف ذلك، بينما يُعرّف متغير القرار (X_j) بحيث يأخذ القيمة (1) إذا تم اختيار الموقع (j) ليكون مركز خدمة، ويأخذ القيمة (0) خلاف ذلك. ويُعبّر عن شرط التغطية المزدوجة بالقيد الرياضي الآتي ($\sum_{j=1}^p a_{ij}x_j \geq k, \forall i = 1, 2, \dots, n$). ويهدف هذا القيد إلى تحقيق التغطية المزدوجة ($k = 2$) لجميع مرافق الشركة، بحيث تكون كل نقطة طلب مغطاة بواسطة مركزين للخدمة على الأقل، مما يعزز اعتمادية نظام الاستجابة للطوارئ، ويحسن توزيع مراكز الخدمة، ويوفر مستوى أعلى من المرونة التشغيلية، كما يضمن قدرة النظام على استمرارية تقديم الخدمة في حالات انشغال أحد المراكز، أو عند الحاجة إلى مشاركة أكثر من مركز خدمة.

3. الدراسات السابقة

تُعد دراستا (Hakimi (1964, 1965) من الأعمال التأسيسية في مجال مشاكل تحديد المواقع (Location Problem) ضمن علم بحوث العمليات، لمشكلتي الوسيط (p -Median) والمركز (p -Centre) على الشبكات باستخدام نظرية الرسوم البيانية (Graph Theory). فقد تناولت دراسة عام (1964) مشكلة تحديد الموقع الأمثل لمركز خدمة واحد ($p = 1$)، وأثبتت أن الموقع الأمثل يقع عند إحدى عقد الشبكة وليس على حوافها، بينما وسعت دراسة عام (1965) هذا المفهوم ليشمل تحديد عدة مراكز خدمة ($p > 1$)، مما أسهم في تطوير نماذج تحديد مواقع متعددة المرافق. وقد مهدت هاتان الدراستان الطريق لظهور العديد من نماذج تحديد المواقع، ومن أبرزها نماذج التغطية (Covering Models)، التي تهدف إلى تحديد مواقع مرافق الخدمة القادرة على تحقيق متطلبات التغطية ضمن قيود زمنية أو مكانية محددة. ويُعد نموذج تحديد مواقع التغطية للمجموعة (SCLP) أحد أهم هذه النماذج، والذي قدمه (Toregas et al.) عام (1971) لتحديد الحد

و(MCLP)، إذ يتيح تمثيل أكثر من مستوى لمعيار الخدمة من خلال اعتماد زمنين مختلفين للتغطية بما يتناسب مع متطلبات الاستجابة. وأظهرت النتائج أن التوزيع القائم للمحطات لم يحقق مستويات التغطية المطلوبة، إذ لم تتجاوز نسبة التغطية (30%) ضمن معيار الاستجابة الأساسي البالغ (8) دقائق، حتى مع اعتماد معيار ثانٍ قدره (13) دقيقة. وتبرز أهمية هذه الدراسة في إظهار إمكانية توسيع نماذج التغطية التقليدية لتتلاءم مع تعدد متطلبات الخدمة، وهو ما يرتبط بالدراسة الحالية التي تتجه إلى التغطية المتعددة [9].

قاموا (Deng et al. (2021 بتطبيق نموذج تغطية المجموعة (SCLP) في مجال خدمات الطوارئ الطبية بمدينة (Chengdu) في الصين لتحديد مواقع مرافق الخدمة، واستخدموا الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithm) لحل النموذج. وأظهرت النتائج أن تحقيق تغطية (90%) من السكان ضمن زمن استجابة أقصى قدره (15) دقيقة يتطلب إنشاء (55) مرفقاً جديداً، مع خفض متوسط زمن السفر الموزون (Weighted Average Travel Time) من (6.45) إلى (5.51) دقيقة، بنسبة تحسن بلغت (14.57%). ويأخذ هذا المؤشر في الاعتبار اختلاف حجم الطلب بين المناطق، بحيث يكون للمناطق ذات الطلب الأكبر تأثير نسبي أعلى في حساب متوسط زمن السفر. في المقابل، تعتمد الدراسة الحالية على مفهوم التغطية المتعددة (Multiple Coverage) من خلال تطوير نموذج (SCLP) بإضافة قيد يضمن تغطية كل نقطة طلب بواسطة مركزي خدمة على الأقل ضمن زمن الاستجابة المحدد، بما يعزز موثوقية نظام الاستجابة واستمرارية الخدمة عند انشغال أحد المراكز [10].

تناول (Shetab-Boushehri et al. (2022 دراسة مشكلة تحديد مواقع محطات سيارات الإسعاف في مدينة أصفهان بإيران، بهدف تحسين مستوى زمن الاستجابة، مع مراعاة عدم اليقين في حجم الطلب والتغيرات الزمنية في حركة المرور. واعتمدت الدراسة

الطلب، بل يسعى إلى تحقيق أكبر مستوى ممكن من التغطية في ظل محدودية عدد مواقع الخدمة المتاحة مسبقاً. وقد أصبح (MCLP) من النماذج المهمة في تخطيط مواقع خدمات الطوارئ، خاصة في الحالات التي تكون فيها الموارد المتاحة غير كافية لتحقيق التغطية الشاملة [7].

قدّم (Batta and Mannur (1990) إسهاماً مهماً في تطوير نماذج التغطية المطبقة في خدمات الطوارئ، من خلال إدخال مفهوم اختلاف متطلبات التغطية بين نقاط الطلب، بحيث يمكن أن تحتاج بعض النقاط إلى أكثر من وحدة استجابة لتحقيق مستوى الخدمة المطلوب، بينما تكتفي نقاط أخرى بوحدة واحدة. ويتم التعبير عن ذلك رياضياً من خلال تخصيص مستوى تغطية مطلوب لكل نقطة طلب (k_i)، والذي يمثل عدد وحدات الاستجابة (أو المراكز) اللازمة لتغطية نقطة الطلب (i). وبناءً على ذلك، طوّر الباحثان نماذج (SCLP, MCLP) بإضافة متطلبات تغطية مختلفة لنقاط الطلب، بحيث يعكس النموذج عدد وحدات الاستجابة المطلوبة لكل نقطة ضمن نطاق زمن أو مسافة الاستجابة المحددة. وقد أسهم هذا التطوير في جعل نماذج التغطية أكثر واقعية في تطبيقات الطوارئ، من خلال تمثيل الاختلاف في احتياجات الاستجابة بين مواقع الطلب، ومهد لتطور نماذج التغطية المتعددة (Multiple Coverage Models)، كما هو مطبق في الدراسة الحالية [8].

توجد العديد من التطبيقات العملية لنماذج التغطية في مشاكل تحديد المواقع، ولا يتسع نطاق هذه الدراسة لاستعراضها جميعاً؛ لذلك تم اختيار بعض الدراسات ذات الصلة المباشرة أو غير المباشرة بموضوع الدراسة الحالية. وفي هذا السياق، طبق (Liu et al. (2017) نموذج التغطية مزدوج المعيار (Double Standard) لتحديد مواقع سيارات الإسعاف في منطقة (Songjiang) بمدينة شنغهاي الصينية، بالاعتماد على بيانات تشغيلية شملت (8) محطات و(29) سيارة إسعاف. ويُعد هذا النموذج امتداداً لنماذج التغطية التقليدية، مثل (SCLP)

وتختلف هذه الدراسة عن الدراسة الحالية في أن تطبيقها تم في بيئة حضرية لخدمات الإسعاف، مع مراعاة حركة السكان وحجم أسطول سيارات الإسعاف، في حين تركز الدراسة الحالية على بيئة صناعية محددة، وتستخدم بيانات المرافق الفعلية وأزمنة الانتقال عبر شبكة الطرق الداخلية للشركة، مع اعتماد التغطية المزدوجة [13].

قدّم Milad and Alhdar (2025) دراسة تطبيقية لتحديد المواقع المثلى لمحطات الإطفاء في مدينة الخمس بليبيا باستخدام نموذج التغطية القصوى (MCLP)، بالاعتماد على الكثافة السكانية ومستويات المخاطر، بهدف تعظيم التغطية ضمن زمن استجابة لا يتجاوز (15) دقيقة. وأظهرت النتائج إمكانية تحديد أربع محطات مثلى للإطفاء، بما أسهم في تحسين مستوى التغطية وتقليل عدد المحطات القائمة. وترتبط هذه الدراسة بالدراسة الحالية من حيث تطبيق نماذج تحديد المواقع في البيئة الليبية، ومراعاة أهمية نقاط الطلب، واعتماد زمن استجابة محدد كحد أقصى للتغطية. إلا أن الدراسة السابقة اعتمدت الكثافة السكانية مؤشراً لأهمية نقاط الطلب وتحديد أولويات التغطية، في حين تركز الدراسة الحالية على تحقيق التغطية المتعددة للمرافق [14].

قدّم الشيخ (2026) دراسة ماجستير لتحديد المواقع المثلى لمراكز خدمات الطوارئ بالشركة الليبية للحديد والصلب بمدينة مصراتة، بالاعتماد على بيانات (37) مرفقاً، وهي بيئة التطبيق نفسها للدراسة الحالية. واستخدمت الدراسة ثلاثة نماذج قائمة على البرمجة الصحيحة، هي نموذج تغطية المجموعة (SCLP)، ونموذج تعظيم التغطية الاحتياطية (RMP)، ونموذج أقصى التغطية (MCLP)، لتحديد المواقع المثلى ضمن زمن استجابة أقصى قدره (3) دقائق. وأظهرت نتائج نموذج (SCLP) إمكانية تغطية جميع مرافق الشركة باستخدام ثلاثة مراكز لخدمات الطوارئ [3]. وتمثل الدراسة الحالية امتداداً لهذه الدراسة من حيث البيانات وبيئة التطبيق والأساس الرياضي، مع الانتقال من مفهوم التغطية الأحادية إلى التغطية المتعددة

عدة سيناريوهات تشغيلية وخوارزميات استرشادية (Heuristic Algorithms) لحل النموذج بكفاءة. وأظهرت النتائج أن إعادة توزيع المحطات وسيارات الإسعاف يساهم في تقليل زمن الاستجابة وتحسين مستوى التغطية. وفي الدراسة الحالية، يُعتمد زمن الاستجابة معياراً للتغطية وحداً أقصى لزمن الوصول، بينما يتمثل الهدف في تحقيق التغطية المتعددة ضمن هذا الزمن [11].

وقدّما Yıldırım and Soylu (2023) نموذجاً لإعادة تمركز مركبات خدمات الطوارئ في نظام تابع لشركة لتوزيع الغاز الطبيعي عبر شبكة أنابيب بمدينة قيصري (Kayseri) في تركيا، حيث تمثلت نقاط الطلب في المناطق المرتبطة بشبكة الغاز، واستجابت مركبات الخدمة لبلاغات الطوارئ وأعطال الشبكة. وشملت الحالة التطبيقية 141 نقطة طلب، مع مراعاة اختلاف متطلبات التغطية بينها وفق عوامل مثل عدد السكان والأهمية الاستراتيجية، وإمكانية إسناد أكثر من مركبة إلى المحطة الواحدة، مع تصنيف حالات النظام إلى حرجة وغير حرجة. وأظهرت نتائج المحاكاة أن الاستراتيجية المقترحة حققت تغطية آمنة أفضل باستخدام عدد أقل من المحطات، إلى جانب تحسن ملحوظ في مؤشرات زمن الاستجابة [12].

طوروا Zhang et al. (2024) نموذجاً متعدد الفترات لتحديد مواقع وسعة مراكز خدمات الإسعاف، يجمع بين زمن الانتقال الأقصى، تغير الطلب، سعة المراكز، التغطية الكاملة والتغطية الاحتياطية (Backup Service). وطُبق النموذج على مدينة (Zhengzhou) في الصين، مع ضمان وجود محطة أساسية وأخرى احتياطية لكل نقطة طلب. وأظهرت النتائج أن النموذج استطاع تحقيق معايير التغطية المحددة؛ إذ تم تقديم الخدمة لكل نقطة طلب من المركز الأساسي خلال 15 دقيقة، ومن المركز الاحتياطي خلال 18 دقيقة. كما أظهرت المقارنة مع نظام الإسعاف القائم انخفاضاً ملحوظاً في متوسط زمن انتقال سيارات الإسعاف وتحسن نسبة السكان المخدومين.

تبدأ الدراسة بجمع البيانات المكانية والتشغيلية اللازمة لبناء نموذج التغطية، وتشمل تحديد الإحداثيات الجغرافية لمرافق الشركة والمواقع المرشحة لإنشاء مراكز خدمات الطوارئ، واعتماد معيار زمن الاستجابة الحرج البالغ ثلاث دقائق وفقاً لدراسة الشيخ (2026) [3]. بعد ذلك، يتم حساب أزمدة الانتقال بين مراكز الخدمة المحتملة ومرافق الطلب، وبناء مصفوفة التغطية الثنائية وفق معيار الزمن المعتمد.

ب- بناء النموذج الرياضي (SCLP-MC):

تهدف دالة الهدف (Objective Function) إلى تحديد الحد الأدنى من مراكز خدمات الطوارئ (p) واختيار مواقعها المثلى (X_j). وصيغت قيود النموذج (Constraints) لضمان تغطية جميع نقاط الطلب بواسطة عدد لا يقل عن (k) من مراكز الخدمة ضمن الحد الأقصى لزمن الاستجابة (t_{max})، مع استخدام متغيرات قرار ثنائية لتحديد المواقع المختارة وتحقيق مستوى التغطية المطلوب.

ج- حل النموذج الرياضي وتحليل النتائج:

يتم حل النموذج باستخدام أسلوب البرمجة الخطية الصحيحة الثنائية (BILP) باستخدام أداة التحسين أداة (Excel Solver)، بهدف تحديد العدد الأمثل لمراكز خدمات الطوارئ ومواقعها. كما تُحلل النتائج لتقييم مستوى التغطية المزدوجة، ودرجة الاعتمادية التشغيلية، ومدى قدرة النظام المقترح على التعامل مع حالات انشغال المراكز أو الحوادث التي تتطلب استجابة مشتركة.

5. التطبيق العملي

يتناول هذا الجزء تطبيق نموذج مواقع المجموعة بالتغطية المتعددة (SCLP-MC) في الشركة الليبية للحديد والصلب بهدف تحديد العدد (p) والمواقع المثلى لمراكز خدمات الطوارئ، مع تحقيق مستوى التغطية المزدوجة ($k = 2$) لجميع مرافق الشركة ضمن الحد الأقصى لزمن الاستجابة ($t_{max} = 3$) دقائق. ويتضمن

(Multiple Coverage)، من خلال تبني مفهوم التغطية المتعددة بما يضمن تغطية كل مرفق بواسطة مركزي خدمة على الأقل ضمن زمن الاستجابة المحدد.

يتضح من الدراسات السابقة أن نماذج تحديد المواقع، بدءاً من النماذج التأسيسية لـ Hakimi وامتداداً إلى نماذج التغطية مثل SCLP وMCLP، تطورت لتلبية متطلبات أكثر تنوعاً في تخطيط خدمات الطوارئ، بما في ذلك اختلاف مستويات التغطية، وتعدد معايير الخدمة، والتغطية الاحتياطية. كما أظهرت الدراسات التطبيقية الحديثة إمكانية توظيف هذه النماذج في بيئات حضرية وصناعية وخدمية مختلفة. ومع ذلك، تظل التطبيقات التي تجمع بين التغطية المتعددة وتحديد مواقع مراكز خدمات الطوارئ داخل بيئة صناعية محددة، بالاعتماد على بيانات فعلية للمرافق وأزمدة الانتقال عبر شبكة الطرق الداخلية، محدودة. ومن هنا، تتمثل الفجوة البحثية التي تعالجها الدراسة الحالية في تطوير نموذج (SCLP) بإضافة قيد التغطية المتعددة، وتطبيقه (SCLP-MC) على الشركة الليبية للحديد والصلب، بما يضمن تغطية مرافقها بمركزي خدمة على الأقل ضمن زمن الاستجابة المحدد.

4. منهجية الدراسة

تعتمد هذه الدراسة على المنهج الكمي التطبيقي لتحديد المواقع المثلى لمراكز خدمات الطوارئ في الشركة الليبية للحديد والصلب بمدينة مصراتة، وذلك من خلال تطبيق نموذج تغطية المجموعة (SCLP) مع تضمين قيد التغطية المتعددة (Multiple Coverage Constraint). ويهدف هذا القيد إلى ضمان تغطية كل مرفق من مرافق الشركة بواسطة عدد لا يقل عن مركزي خدمة ($k = 2$)، لتحقيق التغطية المزدوجة لجميع المرافق ضمن حد زمن الاستجابة المعتمد، بما يوفر مرونة أكبر في الاستجابة ويعزز استمرارية الخدمة. وتتمثل خطوات المنهجية فيما يأتي:

أ- جمع البيانات ومعالجتها:

واعتمدت هذه البيانات كمدخلات أساسية لبناء مصفوفة التغطية.

استناداً إلى البيانات الجغرافية لمرافق الشركة والمواقع المرشحة لإنشاء مراكز خدمات الطوارئ، الواردة في الملحق (أ)، تم تنفيذ خطوتين رئيسيتين لتجهيز البيانات كمدخلات لنموذج مواقع المجموعة بالتغطية المتعددة (SCLP-MC). تمثلت الخطوة الأولى في حساب أزمنة الانتقال (t_{ij}) بين مواقع مراكز الخدمة المحتملة (j) ومرافق الطلب (i)، بينما تمثلت الخطوة الثانية في بناء مصفوفة التغطية الثنائية (a_{ij})، لتحديد قدرة كل مركز خدمة (j) محتمل على تغطية مرافق الطلب (i) ضمن الحد الأقصى لزمن الاستجابة المعتمد (t_{max}). وفيما يلي توضيح لهاتين الخطوتين.

➤ إعداد مصفوفة أزمنة التنقل (t_{ij}):

تُعد مصفوفة أزمنة التنقل (Travel Time Matrix) أحد المدخلات الأساسية في تطبيق نموذج تغطية المجموعة (SCLP)، وهي مصفوفة مربعة من الدرجة ($n \times n$)، حيث يمثل (n) عدد مرافق الشركة. وتمثل صفوف المصفوفة المرافق المستهدفة بالتغطية، ويرمز لها بـ (i)، في حين تمثل الأعمدة المواقع المرشحة لمراكز خدمات الطوارئ، ويرمز لها بـ (j)، حيث ($i, j = 1, 2, \dots, n$)، ويعبر كل عنصر (t_{ij}) عن زمن الانتقال اللازم للوصول مركبة الطوارئ من الموقع المرشح (j) إلى المرفق (i) عبر شبكة الطرق الداخلية للشركة.

وقد أعدت المصفوفة بالاعتماد على الإحداثيات الجغرافية للمرافق والمواقع المرشحة الواردة في الملحق (ب)، والمستمدة من دراسة الشيخ (2026)، مع تقدير أزمنة التنقل الفعلية باستخدام (Google Maps)، لما توفره من تمثيل أكثر واقعية لحركة مركبات الطوارئ مقارنة بالمسافات الإقليدية (Euclidean Distances)، وأدرجت المصفوفة الناتجة في الملحق (ب). ونظراً للعدد الكبير نسبياً من أزواج المرافق المطلوب حساب أزمنة الانتقال بينها، جرى جمع البيانات على عدة

التطبيق إعداد البيانات المكانية، وبناء مصفوفة التغطية (a_{ij})، وتنفيذ النموذج الرياضي وتحليل نتائجه.

أ- نبذة عن الشركة الليبية للحديد والصلب

تمثل الشركة الليبية للحديد والصلب (LISCO) أحد أكبر المجمعات الصناعية في ليبيا وشمال أفريقيا، وقد تأسست عام 1979 وبدأت عمليات الإنتاج عام 1989 بمدينة مصراتة، حيث تمتد منشآتها على مساحة واسعة تقارب 1200 هكتار. ويضم المجمع الصناعي مجموعة كبيرة من الوحدات الإنتاجية والخدمية المتنوعة، تشمل مصانع الاختزال المباشر، ومصانع الصلب والدرفلة، ومحطات الطاقة وتحلية المياه، ووحدات الغازات الصناعية، والميناء التجاري، والورش المركزية، بالإضافة إلى مرافق الأمن الصناعي والسلامة والخدمات المساندة. ونظراً لاتساع المساحة الجغرافية للمجمع وتعدد مرافقه وتوزعها المكاني، فإن توفير نظام فعال لخدمات الطوارئ يتطلب تخطيطاً مكانياً قادراً على ضمان سرعة الوصول واستمرارية الخدمة. وتزداد أهمية ذلك في البيئات الصناعية الكبيرة التي قد تواجه حالات تتطلب استجابة مترامنة، سواء بسبب انشغال أحد مراكز الخدمة بحدث قائم أو نتيجة حاجة بعض الحوادث إلى مشاركة أكثر من مركز خدمة. ومن هنا تبرز أهمية تطبيق نموذج (SCLP-MC) الذي يهدف إلى توفير مستوى أعلى من الاعتمادية مقارنة بالتغطية الأحادية [3].

ب- إعداد ومعالجة البيانات

اعتمدت الدراسة على البيانات المكانية لمرافق الشركة المشمولة بالتغطية، والتي تم الحصول عليها من دراسة الشيخ (2026)، باعتبارها قاعدة البيانات الأساسية لتطبيق نموذج تحديد المواقع. وشملت البيانات (37) مرفقاً من المرافق التشغيلية والخدمية للشركة، حيث تم تحديد مواقعها باستخدام الإحداثيات الجغرافية (Longitude, Latitude)، إلى جانب تحديد المواقع المرشحة لإنشاء مراكز خدمات الطوارئ [3]. وقد أدرجت بيانات مرافق الشركة وإحداثياتها الجغرافية في الملحق (أ)،

(Coverage)، حيث اعتمدت الدراسة التغطية المزدوجة (k) $= 2$)، بحيث تُغطى كل نقطة طلب بواسطة مركزين على الأقل من مراكز الخدمة، بما يعزز موثوقية واستمرارية الاستجابة. وبناءً على ذلك، تمت صياغة نموذج (SCLP-MC) وفقاً للعناصر والقيود الرياضية الآتية:

$$\text{Minimise } Z = \sum_{j \in J} f_j X_j \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{j \in J} a_{ij} X_j \geq k \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$X_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3)$$

حيث:

(I, J) : تمثل مجموعة المرافق، وتمثل مجموعة المواقع المرشحة على الترتيب

f_j : التكلفة الثابتة لإنشاء مركز في الموقع (j)، وتساوي (1) لافتراض تساوي تكاليف فتح المرافق.

k : يُستخدم للدلالة على مستوى التغطية المطلوب (Coverage Level)، أي الحد الأدنى لعدد مراكز الخدمة التي يجب أن تغطي كل نقطة طلب، حيث تم اعتماد ($k = 2$) في هذه الدراسة، بما يعني اشتراط تغطية كل نقطة طلب بواسطة مركزي خدمة على الأقل.

a_{ij} : تساوي (1)، إذا كان الموقع المرشح (j) قادراً على تغطية المرفق (i)، خلاف ذلك تساوي (0).

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } t_{ij} \leq t_{max} \\ 0 & \text{otherwise (خلاف ذلك)} \end{cases}$$

t_{max} : يمثل الحد الأقصى لزمن الاستجابة (Critical Response Time)، والمحدد في هذه الدراسة 3 دقائق.

X_j : متغير قرار ثنائي يحدد اختيار الموقع المرشح (j)، حيث يأخذ (1) إذا تم فتحه كمركز خدمة، والقيمة (0) خلاف ذلك.

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{(إذا تم اختيار الموقع اختيار } j) \\ 0 & \text{otherwise (خلاف ذلك)} \end{cases}$$

مراحل وفي أوقات مختلفة خلال شهر مارس 2026. كما افترضت الدراسة، نظراً لطبيعة شبكة الطرق داخل الشركة، أن مصفوفة أزمنة التنقل متماثلة (Symmetric Matrix)، بحيث يكون زمن الانتقال من الموقع (i) إلى الموقع (j) مساوياً لزمن الانتقال من الموقع (j) إلى الموقع (i)، أي أنها تحقق العلاقة ($t_{ij} = t_{ji}$).

➤ إعداد مصفوفة التغطية الثنائية (a_{ij}):

تعتمد صياغة نموذج مواقع المجموعة بالتغطية المتعددة (SCLP-MC) في هذه الدراسة على مصفوفة التغطية الثنائية (Binary Coverage Matrix)، ويرمز إلى عناصرها بالرمز (a_{ij})، التي تُشتق من مصفوفة أزمنة التنقل (t_{ij}). وتمثل هذه المصفوفة العلاقة بين مواقع مراكز الخدمة المحتملة (j) ومرافق الطلب (i)، حيث تُبين قدرة كل موقع مرشح على تغطية كل مرفق ضمن معيار زمن الاستجابة المعتمد ($t_{max} = 3$) دقائق.

وتُحدد عناصر مصفوفة التغطية الثنائية بالرمز (a_{ij})، بحيث تأخذ القيمة (1) إذا كان زمن الانتقال من الموقع المرشح (j) إلى المرفق (i) أقل من أو يساوي الحد الزمني المعتمد ($t_{max} = 3$) دقائق، بينما تأخذ القيمة (0) إذا تجاوز زمن الانتقال هذا الحد. وبذلك تُحوّل أزمنة التنقل إلى تمثيل ثنائي يوضح إمكانية تغطية كل مرفق من قبل كل موقع مرشح. ويوضح الملحق (ج) مصفوفة التغطية الثنائية (a_{ij}) المستخدمة في بناء النموذج الرياضي (SCLP-MC).

ج- الصياغة الرياضية لنموذج (SCLP-MC)

يُعد نموذج مواقع المجموعة بالتغطية المتعددة (SCLP-MC) أحد نماذج تحديد مواقع مراكز الخدمات، ويهدف إلى تحديد الحد الأدنى من مراكز خدمات الطوارئ (p) واختيار مواقعها المثلى (X_j)، بما يضمن تغطية نقاط الطلب ضمن الحد الأقصى لزمن الاستجابة (t_{max}). وفي هذه الدراسة، تم توسيع نطاق التغطية في النموذج التقليدي ليأخذ في الاعتبار التغطية المتعددة (Multiple

تحديد العدد الأمثل لمراكز الطوارئ والمواقع المختارة لإنشائها، كما يتضح من تقرير الإجابة (Answer Report) الناتج عن أداة (Solver)، والذي سيُعرض فيما يلي.

1- تحليل نتائج دالة هدف النموذج (SCLP-MC):

يوضح الجدول رقم (1) نتائج دالة الهدف (Objective Function) لنموذج مواقع المجموعة بالتغطية المتعددة (SCLP-MC)، كما وردت في تقرير الإجابة (Answer Report) الناتج عن أداة (Solver) باستخدام محرك (Simplex LP)، حيث تمثل قيمة دالة الهدف الحد الأدنى لعدد مراكز خدمات الطوارئ (p) المطلوبة لتحقيق مستوى التغطية لكل مرفق من مرافق الشركة قيد الدراسة، المحدد بمركزي خدمة (k) ($= 2$) وفقاً لقيود النموذج.

حيث تمثل المعادلة رقم (1) دالة الهدف التي تسعى إلى تقليل العدد الإجمالي ($Min p$) لمراكز الخدمة المفتوحة في الشركة قيد الدراسة. بينما تضمن المعادلة (2) أن يتم تغطية كل نقطة طلب (i) بواسطة عدد لا يقل عن (k) من مراكز الخدمة، بما يحقق مستوى التغطية المطلوب. أما المعادلة (3) فتوضح الطبيعة الثنائية لمتغير القرار (X_j)، حيث يأخذ القيمة (1) في حال اختيار الموقع (j) لإنشاء مركز خدمة، والقيمة (0) خلاف ذلك.

د- حل وتفسير نتائج نموذج (SCLP-MC):

تم حل النموذج الرياضي باستخدام أداة التحسين (Excel Solver) بهدف تحديد الحد الأدنى لعدد مراكز خدمات الطوارئ (p) واختيار مواقعها المثلى (X_j)، بما يضمن تغطية جميع مرافق الشركة وفق مفهوم التغطية المتعددة (Multiple Coverage). حيث تم في هذا التطبيق اعتماد مستوى التغطية ($k = 2$). وقد تم الالتزام بجميع قيود النموذج الرياضي، وأسفر الحل عن

جدول رقم (1): نتائج دالة هدف (Objective).

Microsoft Excel 16.0 Answer Report			
Worksheet: [SCLP with Multiple Coverage .xlsx]SCLP			
Report Created: 2026-08-06 6:45:37 PM			
Result: Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.			
Solver Engine			
Engine: Simplex LP			
Solution Time: 0.281 Seconds.			
Iterations: 48 Subproblems: 0			
Solver Options			
Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0.000001,			
Use Automatic Scaling			
Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative			
Objective Cell (Min)			
Cell	Name	Original Value	Final Value
\$AN\$88	Objective Function: Minimize the Number of Facilities (p) = Reference	0	5

(Function) لنموذج (SCLP-MC)

المصدر: إعداد الباحثين، نتائج حل النموذج باستخدام Solver

لمستوى التغطية المعتمد ($k = 2$)، ضمن الحد الأقصى لزمن الاستجابة المحدد ($t_{max} = 3$) دقائق. أما حالة (Not Binding) فتشير إلى أن قيد التغطية قد تحقق مع وجود فائض في مستوى التغطية، أي أن المرفق يحظى بتغطية إضافية من أكثر من مركزي خدمة.

وأظهرت نتائج النموذج أن (12) مرفقاً من أصل (37) مرفقاً، ونسبة بلغت (32.43%)، قد حققت الحد الأدنى المطلوب من مستوى التغطية المعتمد ($k = 2$)، في حين حصلت (15) مرفقاً إضافياً، ونسبة (40.54%)، على مستوى تغطية أعلى تمثل في تغطيتها بواسطة ثلاثة مراكز خدمة. كما أظهرت النتائج أن (10) مرفق، ونسبة (27.03%)، قد استفادت من أعلى مستوى تغطية ضمن النموذج، حيث تمت تغطيتها بواسطة أربعة مراكز خدمة نتيجة وقوعها ضمن نطاق تغطية عدد أكبر من المراكز المختارة. وبذلك، حققت المراكز المحددة مستوى التغطية المتعددة المطلوب لجميع مرفق الشركة، مع الالتزام بقيود النموذج المتمثلة في الحد الأقصى لزمن الاستجابة البالغ (3) دقائق ومستوى التغطية المعتمد ($k = 2$)، حيث بلغ إجمالي عدد حالات التغطية المحققة (109) حالة تغطية.

4- نتائج تخصيص المرافق لمراكز الخدمات

يوضح الجدول (2) المواقع المثلى لمراكز خدمات الطوارئ المختارة (X_j) وفق نتائج حل نموذج تغطية المجموعة بالتغطية المتعددة (SCLP-MC)، حيث أظهرت نتائج النموذج تحديد العدد الأمثل لمراكز الخدمة بمقدار ($p = 5$)، وتم اختيار المواقع (17، 19، 20، 23، 29) لإنشائها. ويضمن هذا التوزيع تغطية جميع مرفق الشركة البالغ عددها (37) مرفقاً ضمن الحد الأقصى لزمن الاستجابة المعتمد ($t_{max} = 3$) دقائق، مع تحقيق الحد الأدنى لمستوى التغطية المطلوب ($k = 2$). كما أظهرت النتائج وجود تفاوت في قدرة مراكز الخدمة المختارة على تغطية مرفق الشركة، حيث بلغ عدد المرافق

يوضح الجدول (1) نتائج حل النموذج الرياضي لمشكلة تغطية المجموعة (SCLP) باستخدام أداة (Microsoft Excel Solver)، حيث أظهرت النتائج التوصل إلى حل أمثل يحقق جميع قيود النموذج باستخدام محرك الحل (Simplex LP) خلال زمن قدره (0.235) ثانية. وقد بلغت قيمة دالة الهدف (Final Value) مقدار (5)، مما يدل على أن العدد الأمثل لمراكز خدمات الطوارئ المطلوبة هو خمسة مراكز ($p = 5$) لتغطية جميع المرافق البالغ عددها (37) موقعاً. وقد تم الحصول على هذا الحل وفق معيار الحد الأقصى لزمن الاستجابة ($t_{max} = 3$) دقائق، وبمستوى تغطية متعدد ($k = 2$).

2- تحليل نتائج المتغيرات القرارية للنموذج

يوضح الملحق (د) نتائج المتغيرات القرارية (Decision Variables) للنموذج (SCLP-MC)، والتي تحدد المواقع المختارة لإنشاء مراكز خدمات الطوارئ بما يحقق مستوى التغطية المتعددة المحدد في النموذج ($k = 2$). ففي عمود (Final Value)، تشير قيمة المتغير (1) إلى اختيار الموقع لإنشاء مركز خدمة، بينما تشير القيمة (0) إلى عدم اختياره. وقد أظهرت نتائج النموذج أن المواقع (17، 19، 20، 23، 29) هي المواقع المثلى لإنشاء مراكز خدمات الطوارئ، حيث ظهرت بقيمة (1)، في حين لم يتم اختيار بقية المواقع، والتي ظهرت بقيمة (0). ويضمن توزيع هذه المراكز تغطية جميع مرفق الشركة ضمن الحد الأقصى لزمن الاستجابة المعتمد ($t_{max} = 3$) دقائق، مع تحقيق مستوى التغطية المحدد ($k = 2$).

3- تحليل نتائج قيود (Constraints) النموذج تغطية:

يوضح الملحق (هـ) نتائج قيود التغطية (Constraints) لنموذج تغطية المجموعة بالتغطية المتعددة (SCLP-MC)، وذلك من خلال حالة كل قيد (Binding or Not Binding) وقيمة الفائض (Slack). ففي هذا النموذج، تشير حالة (Binding) إلى أن قيد التغطية قد تحقق عند الحد الأدنى المطلوب

كفاءة الحل الأمثل في تحقيق متطلبات نموذج التغطية المتعددة، وتعزيز موثوقية نظام الاستجابة للطوارئ من خلال ضمان التغطية الكاملة وتوفير مستوى إضافي من الاعتمادية التشغيلية لبعض المرافق.

التي يمكن لكل مركز تغطيتها (32، 29، 14، 31، 3) مرفقاً على التوالي، وذلك وفقاً لمواقعها ونطاق التغطية المحدد. وقد نتج عن هذا التوزيع تحقيق إجمالي حالات تغطية بلغ (109) حالة تغطية، مما يؤكد

جدول رقم (2): توزيع مرافق الشركة على مراكز خدمات الطوارئ (X_j) وفق نموذج (SCLP-MC)

أرقام المرافق المشمولة بتغطية مركز الخدمة	عدد المرافق المشمولة بتغطية المركز	رقم المرفق	المرافق المختارة كمراكز للخدمة
(1 إلى 12، 15 إلى 19، 21، 23 إلى 28، 30 إلى 37)	32	17	مركز الخدمة (1)
(2، 4 إلى 17، 19، 21 إلى 24، 26، 27، 28، 30 إلى 33، 36، 37)	29	19	مركز الخدمة (2)
(6 إلى 9، 16، 20، 21، 25، 29، 32، 33، 35، 36، 37)	14	20	مركز الخدمة (3)
(1، 3 إلى 19، 21 إلى 24، 26، 27، 28، 30 إلى 33، 36، 37)	31	23	مركز الخدمة (4)
(34، 29، 20)	3	29	مركز الخدمة (5)
	109		إجمالي التغطية

المصدر: إعداد الباحثين، نتائج حل نموذج (SCLP-MC).

حيث يحقق هذا التوزيع تغطية جميع مرافق الشركة ضمن زمن الاستجابة المحدد ومستوى التغطية المعتمد.

5- النتائج:

كما أظهرت نتائج التخصيص تفاوتاً في قدرة المراكز المختارة على تغطية مرافق الشركة، إذ بلغ عدد المرافق الواقعة ضمن نطاق تغطية المراكز الخمسة (32، 29، 14، 31، 3) مرفقاً على التوالي، وذلك وفقاً لمواقع إنشاء المراكز ونطاق الاستجابة المعتمد في الدراسة. كما بين تحليل مستويات التغطية أن (12) مرفقاً حققت الحد الأدنى المطلوب للتغطية ($k = 2$)، بما يمثل (32.43%) من إجمالي المرافق، في حين حظي (15) مرفقاً بتغطية من ثلاثة مراكز، بنسبة (40.54%). أما أعلى مستوى للتغطية ضمن النموذج، فقد تحقق لـ (10) مرافق تمت تغطيتها بواسطة أربعة مراكز، وهو ما يمثل (27.03%) من إجمالي المرافق. وبلغ إجمالي حالات التغطية المحققة (109) حالة، مما يعكس كفاءة الحل الأمثل في تحقيق متطلبات نموذج التغطية المتعددة وتعزيز موثوقية تغطية مرافق الشركة.

وتؤكد هذه النتائج أن النموذج المقترح لا يحقق فقط التغطية الشاملة لجميع مرافق الشركة ضمن زمن الاستجابة المحدد، بل يوفر أيضاً مستوى إضافياً من

أظهرت نتائج تطبيق نموذج تغطية المجموعة بالتغطية المتعددة (Set Covering Location Problem with Multiple Coverage)، باستخدام أداة (Microsoft Excel Solver) ووفق أسلوب البرمجة الخطية الصحيحة الثنائية (Binary Integer Linear Programming - BILP)، إمكانية تحديد المواقع المثلى لمراكز خدمات الطوارئ بما يحقق مستويات التغطية المستهدفة وفق القيود والمعايير المعتمدة في الدراسة، بما يضمن تغطية جميع مرافق الشركة البالغ عددها (37) مرفقاً ضمن الحد الأقصى لزمن الاستجابة المعتمد ($t_{max} = 3$) دقائق، مع تحقيق الحد الأدنى لمستوى التغطية المطلوب ($k = 2$).

وأظهرت نتائج حل النموذج أن القيمة المثلى لدالة الهدف ($Z = 5$)، مما يشير إلى أن الحد الأدنى لعدد مراكز خدمات الطوارئ اللازمة لتحقيق متطلبات التغطية المتعددة هو خمسة مراكز ($p = 5$). وقد تم تحديد مواقعها المثلى (X_j) في المرافق (17، 19، 20، 23، 29)،

الاعتمادية التشغيلية من خلال تعدد مصادر التغطية لبعض المرافق، بما يعزز مرونة وكفاءة نظام خدمات الطوارئ.

مقارنة نتائج النموذجين: (SCLP) و (SCLP-MC)

تكشف المقارنة بين نتائج نموذج (SCLP) ونموذج التغطية المتعددة (SCLP-MC)، عن اختلاف جوهري في مستوى الاعتمادية التشغيلية. فقد حقق نموذج (SCLP) التغطية الشاملة للمرافق باستخدام ثلاثة مراكز ($p = 3$) فقط، إلا أن (11) مرفقاً، بما نسبته 30%، حصلت على تغطية من مركز واحد فقط، مما يزيد من مخاطر تأثر التغطية عند انشغال المركز أو وقوع حوادث تستلزم تدخل عدة مراكز.

في المقابل، تطلب نموذج (SCLP-MC) خمسة مراكز خدمة ($p = 5$) لتحقيق الحد الأدنى للتغطية المتعددة ($k = 2$) لجميع المرافق، مع توفير مستوى أعلى من الاعتمادية التشغيلية. فقد حصلت (15) مرفقاً، بما نسبته نحو 41%، على تغطية من ثلاثة مراكز، في حين حصلت (10) مرافق، بما نسبته 27%، على تغطية من أربعة مراكز. ويعني ذلك أن جميع المرافق تتمتع بأكثر من مصدر للتغطية، بما يوفر بدائل للاستجابة عند انشغال أحد المراكز أو وقوع حوادث تتطلب تدخل أكثر من مركز.

وعليه، توضح المقارنة أن نموذج (SCLP) يحقق كفاءة أعلى من حيث تقليل عدد المراكز، في حين يوفر نموذج (SCLP-MC) اعتمادية ومرونة تشغيلية أعلى من خلال تعدد مصادر التغطية. ومن ثم، تتمثل القيمة المضافة للنموذج المقترح في الانتقال من تحقيق التغطية الأساسية إلى تعزيز موثوقية واستمرارية الاستجابة للطوارئ، ولا سيما عند انشغال أحد المراكز أو وقوع حوادث متزامنة تستدعي تدخل عدة مراكز.

وتوصي الدراسة ببنية نماذج التغطية المتعددة عند تخطيط مواقع مراكز خدمات الطوارئ في المنشآت الصناعية، لما توفره من مستوى أعلى من الاعتمادية مقارنة بنماذج التغطية الأحادية، ولا سيما في المرافق ذات الأهمية التشغيلية العالية. كما توصي بإجراء دراسات مستقبلية تتضمن دمج عوامل إضافية، مثل الكثافة التشغيلية، واحتمالات وقوع الحوادث، وأحجام الموارد المتاحة...، بما يساهم في تطوير نماذج أكثر واقعية وشمولاً لدعم اتخاذ القرار في مجال تخطيط خدمات الطوارئ.

المراجع

- [1] Farahani, R.Z.; Hekmatfar, M., Eds. *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*; Springer: Berlin, Germany, 2009.
- [2] Melo, M.T.; Nickel, S.; Saldanha-da-Gama, F. Facility location and supply chain management—A review. *Eur. J. Oper. Res.* 2009, 196, 401–412.
- [3] الشيخ، محمد عبدالله تحديد مواقع مراكز خدمات الطوارئ باستخدام نماذج التغطية: (Covering Location) دراسة تطبيقية على الشركة الليبية للحديد والصلب (LISCO)؛ رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الاقتصاد والعلوم السياسية، قسم إدارة الأعمال، جامعة مصراتة: مصراتة، ليبيا، 2026.

6- الخلاصة والتوصيات

أثبتت الدراسة فاعلية نموذج المجموعة بالتغطية المتعددة (Set Covering Location Problem)

- [4] Hakimi, S.L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Oper. Res.* **1964**, *12*, 450–459.
- [5] Hakimi, S.L. Optimum distribution of switching centers in a communication network. *Oper. Res.* **1965**, *13*, 462–475.
- [6] Toregas, C.; Swain, R.; ReVelle, C.; Bergman, L. The location of emergency service facilities. *Oper. Res.* **1971**, *19*, 1363–1373.
- [7] Church, R.L.; ReVelle, C. The maximal covering location problem. *Pap. Reg. Sci. Assoc.* **1974**, *32*, 101–118.
- [8] Batta, R.; Mannur, N.R. Covering-location models for emergency situations that require multiple response units. *Manag. Sci.* **1990**, *36*, 16–23.
- [9] Liu, M.; Yang, D.; Hao, F. Optimization for the Locations of Ambulances under Two-Stage Life Rescue in the Emergency Medical Service: A Case Study in Shanghai, China. *Math. Probl. Eng.* **2017**, 1830480, 14 pages.
- [10] Deng, Y.; Zhang, Y.; Huang, Q. Optimization for locating emergency medical service facilities: A case study for health planning in Chengdu, China. *Risk Manag. Healthc. Policy* **2021**, *14*, 1791–1802.
- [11] Shetab-Boushehri, S.-N.; Rajabi, P.; Mahmoudi, R. Modeling location–allocation of emergency medical service stations and ambulance routing problems considering the variability of events and recurrent traffic congestion: A real case study. *Healthcare Anal.* **2022**, *2*, 100048.
- [12] Yildirim, B.; Soylu, B. Relocating emergency service vehicles with multiple coverage and critical levels partition. *Comput. Ind. Eng.* **2023**, *177*, 109016.
- [13] Zhang, G., Ma, R., Kong, Y., Lian, C., Guo, H., & Zhai, S. A multi-period capacitated facility location problem with maximum travel time and backup service for locating and sizing EMS stations. *Comput. Urban Sci.* **2024**, *4*, 29.
- [14] Milad, A.; Alhdar, A. Maximal covering problem model (MCP) for fire station location determination: A case study in Al-Khoms City. *Libyan J. Comput. Sci. Appl. Math.* **2025**, *4*, 62–66.

ملحق (أ): بيانات مرافق الشركة ومواقعها الجغرافية

دوائر العرض (Latitude)	خط الطول (Longitude)	أسم المرفق المستهدفة بالتغطية	ر.م. (i, j)
15.2378918772079	32.3380098844844	المبنى الإداري	1
15.2375316742648	32.3413733573378	إدارة الخدمات والميناء	2
15.2403440188945	32.3365324586117	مصيف الشركة	3
15.2283665515593	32.3436576022354	محطة تحلية المياه	4
15.2285919151658	32.3423571067853	مركز محطة شبكات الكهرباء	5
15.2122157362711	32.3404031114244	مصنع درفلة الأقطاب والاسياخ	6
15.2124826648726	32.3384560816721	مصنع درفلة القطاعات	7
15.2164212084163	32.3394620237906	مصنع صهر الصلب 1	8
15.2188420998445	32.3391525945894	الورشة الفرعية	9
15.2195151228781	32.3356117947754	مصنع الجير والدول وميت	10
15.2227050000000	32.3351348000000	مصنع تشغيل الاختزال المباشر الأولى	11
15.2164150569140	32.3349834099946	مصنع صهر الصلب 2	12
15.2080786191267	32.3329044880643	مصنع الدرفة على البارد	13
15.2083081372567	32.3309090807330	مصنع الدرفة على الساخن	14
15.2280728678608	32.3385770268489	خدمات مياه المجاري والصرف الصحي	15
15.2069513206951	32.3379286365966	مجمع المطاعم (أ)	16
15.2260472469543	32.3418759680142	مجمع المطاعم (ب)	17
15.2342783309136	32.3351569967283	محطة توزيع المياه المركزية	18
15.2143686330599	32.3328446986868	إدارة الشبكات الكهربائية	19
15.2000112071994	32.3427222504491	الورشة المركزية (النقطة أ)	20
15.2086709039762	32.3359592690414	الورشة المركزية (النقطة ب)	21
15.2106012798281	32.3353010360528	الورشة المركزية (النقطة ج)	22
15.2195312628657	32.3315412016905	إدارة مراقبة الجودة	23
15.2214441671401	32.3315179123429	إدارة الوقاية الصناعية	24
15.2027687122439	32.3426490676764	إدارة النقل	25
15.2158379748810	32.3314557346185	محطة إطفاء الحديد والصلب	26
15.2142679531315	32.3357289326554	المكاتب الهندسية	27
15.2227559350165	32.3315041938190	إدارة الحاسبات والنظم	28
15.1914348206917	32.3432299438074	مركز تدريب الشركة	29
15.2310545859734	32.3329583834522	محطة توليد الكهرباء وتحلية المياه	30
15.2226751735971	32.3389445892061	مصنع الاختزال المباشر الوحدة الثالثة	31
15.2122212	32.3336966	مبنى العيادة	32
15.2159364	32.3317045	مبنى محطة الإطفاء	33
15.2159558	32.3438517	مبنى المصرف	34
15.206941227491	32.341893861092	مصنع القضبان 2	35
15.212120096149	32.337380838784	مصنع الأكسجين القديم	36
15.209756353817	32.337222934782	مصنع الأكسجين الجديد	37

المصدر: الشيخ (2026).

ملحق (ب): مصفوفة أزمنة التنقل (t_{ij}) المستخدمة في نموذج (SCLP-MC) بالدقائق

$j \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
1	0	2	1	2	2	4	4	4	3	3	4	4	6	5	2	5	2	2	4	6	6	6	3	3	6	4	4	3	6	2	3	5	4	3	5	5	6
2	2	0	2	3	3	5	5	4	4	4	5	5	6	6	2	5	2	2	2	5	6	6	4	3	6	5	5	3	7	2	3	5	4	4	5	4	5
3	1	2	0	2	2	4	5	4	3	3	5	5	6	6	2	5	2	2	4	6	6	6	3	3	6	4	4	3	6	2	3	5	4	4	5	5	5
4	2	3	2	0	1	3	3	2	2	2	3	3	4	5	1	4	1	2	3	4	4	4	3	3	4	4	3	3	5	2	1	4	3	2	4	3	4
5	2	3	2	1	0	3	3	2	2	2	3	3	4	5	1	3	1	2	3	4	4	4	3	3	4	3	3	3	5	2	1	3	3	3	4	3	3
6	4	5	4	3	3	0	2	1	2	2	4	3	3	4	2	2	2	4	3	3	2	3	3	3	3	3	3	4	5	4	3	3	3	4	4	2	2
7	4	5	5	3	3	2	0	2	1	3	4	1	2	3	3	1	2	4	1	3	1	1	2	2	3	1	1	3	4	4	3	1	1	4	3	1	1
8	4	4	4	2	2	1	2	0	1	2	4	2	3	4	2	2	2	4	3	3	3	3	2	3	3	3	2	3	4	4	2	3	2	3	2	2	2
9	3	4	3	2	2	2	1	1	0	2	3	1	3	3	2	2	1	3	1	3	2	2	1	2	3	2	1	2	5	3	2	2	1	3	2	1	1
10	3	4	3	2	2	2	3	2	2	0	2	2	4	4	2	3	1	3	2	4	4	4	1	1	4	2	2	1	6	2	2	3	2	4	4	3	3
11	4	5	5	3	3	4	4	4	3	2	0	4	5	5	3	5	3	4	3	6	5	5	2	2	6	3	4	3	7	3	2	4	3	6	5	4	4
12	4	5	5	3	3	3	1	2	1	2	4	0	2	2	3	1	2	4	1	4	2	2	2	2	4	1	1	2	5	3	3	1	1	4	3	1	1
13	6	6	6	4	4	3	2	3	3	4	5	2	0	2	4	2	4	6	2	4	1	1	3	3	4	2	2	4	5	5	4	1	2	6	3	2	1
14	5	6	6	5	5	4	3	4	3	4	5	2	2	0	5	2	4	6	2	4	3	2	3	3	4	2	2	4	5	4	5	1	2	6	4	3	3
15	2	2	2	1	1	2	3	2	2	2	3	3	4	5	0	3	1	2	3	4	3	4	3	2	4	3	2	2	6	2	1	3	3	3	3	3	3
16	5	5	5	4	3	2	1	2	2	3	5	1	2	2	3	0	3	5	2	2	1	1	2	3	2	2	1	3	4	4	3	2	2	4	2	1	1
17	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	3	2	4	4	1	3	0	2	3	4	3	4	2	2	3	3	2	3	6	2	1	3	3	3	3	3	3
18	2	2	2	2	2	4	4	4	3	3	4	4	6	6	2	5	2	0	4	6	5	6	3	3	6	4	4	3	7	2	3	5	4	5	5	4	5
19	4	2	4	3	3	3	1	3	1	2	3	1	2	2	3	2	3	4	0	4	2	2	1	2	4	1	1	2	6	3	3	1	1	4	4	1	1
20	6	5	6	4	4	3	3	3	3	4	6	4	4	4	4	2	4	6	4	0	3	4	4	5	1	5	4	5	3	6	4	1	2	5	2	3	3
21	6	6	6	4	4	2	1	3	2	4	5	2	1	3	3	1	3	5	2	3	0	1	3	3	3	2	2	4	5	5	4	1	2	5	3	1	1
22	6	6	6	4	4	3	1	3	2	4	5	2	1	2	4	1	4	6	2	4	1	0	3	4	4	2	2	4	5	5	4	1	2	5	3	1	1
23	3	4	3	3	3	3	2	2	1	1	2	2	3	3	3	2	2	3	1	4	3	3	0	1	4	1	1	1	6	2	2	2	1	4	4	2	2
24	3	3	3	3	3	3	2	3	2	1	2	2	3	3	2	3	2	3	2	5	3	4	1	0	5	2	2	1	7	2	2	2	1	5	4	3	3
25	6	6	6	4	4	3	3	3	3	4	6	4	4	4	4	2	3	6	4	1	3	4	4	5	0	5	4	5	4	6	4	4	4	5	2	3	3
26	4	5	4	4	3	3	1	3	2	2	3	1	2	2	3	2	3	4	1	5	2	2	1	2	5	0	1	2	6	3	3	1	1	5	4	1	2
27	4	5	4	3	3	3	1	2	1	2	4	1	2	2	2	1	2	4	1	4	2	2	1	2	4	1	0	2	5	3	3	1	1	4	3	1	1
28	3	3	3	3	3	4	3	3	2	1	3	2	4	4	2	3	3	3	2	5	4	4	1	1	5	2	2	0	7	2	2	3	2	5	5	3	3
29	6	7	6	5	5	5	4	4	5	6	7	5	5	5	6	4	6	7	6	3	5	5	6	7	4	6	5	7	0	7	6	5	5	3	4	4	4
30	2	2	2	2	2	4	4	4	3	2	3	3	5	4	2	4	2	2	3	6	5	5	2	2	6	3	3	2	7	0	2	4	3	5	5	4	4
31	3	3	3	1	1	3	3	2	2	2	2	3	4	5	1	3	1	3	3	4	4	4	2	2	4	3	3	2	6	2	0	3	3	4	3	3	3
32	5	5	5	4	3	3	1	3	2	3	4	1	1	1	3	2	3	5	1	1	1	1	2	2	4	1	1	3	5	4	3	0	1	5	3	1	1
33	4	4	4	3	3	3	1	2	1	2	3	1	2	2	3	2	3	4	1	2	2	2	1	1	4	1	1	2	5	3	3	1	0	4	4	2	2
34	3	4	4	2	3	4	4	3	3	4	6	4	6	6	3	4	3	5	4	5	5	5	4	5	5	5	4	5	3	5	4	5	4	0	5	4	4
35	5	5	5	4	4	4	3	2	2	4	5	3	3	4	3	2	3	5	4	2	3	3	4	4	2	4	3	5	4	5	3	3	4	5	0	2	2
36	5	4	5	3	3	2	1	2	1	3	4	1	2	3	3	1	3	4	1	3	1	1	2	3	3	1	1	3	4	4	3	1	2	4	2	0	1
37	6	5	5	4	3	2	1	2	1	3	4	1	1	3	3	1	3	5	1	3	1	1	2	3	3	2	1	3	4	4	3	1	2	4	2	1	0

المصدر: الشيخ (2026)

ملحق (ج): مصفوفة التغطية الثنائية (a_{ij}) المستخدمة في نموذج (SCLP-MC) عند حد أقصى لزمن الاستجابة
($t_{max} = 3$) دقائق

$j \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	
2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
3	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	
6	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	
7	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	
8	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
9	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
10	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	
11	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	
12	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	
13	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	
14	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
16	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
18	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
19	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	
20	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	
21	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	
22	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	
23	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	
25	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
26	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	
27	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	
28	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	
30	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	
32	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	
33	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	
34	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	
35	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	
36	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	
37	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	

المصدر: الشيخ (2026)

ملحق (د): نتائج المتغيرات القارضية (Decision Variables) لنموذج (SCLP-MC)

<i>i</i> (Constraint)	Variable Cells				
	Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
1	\$C\$46	Changing Variables	0	0	Binary
2	\$D\$46	Changing Variables	0	0	Binary
3	\$E\$46	Changing Variables	0	0	Binary
4	\$F\$46	Changing Variables	0	0	Binary
5	\$G\$46	Changing Variables	0	0	Binary
6	\$H\$46	Changing Variables	0	0	Binary
7	\$I\$46	Changing Variables	0	0	Binary
8	\$J\$46	Changing Variables	0	0	Binary
9	\$K\$46	Changing Variables	0	0	Binary
10	\$L\$46	Changing Variables	0	0	Binary
11	\$M\$46	Changing Variables	0	0	Binary
12	\$N\$46	Changing Variables	0	0	Binary
13	\$O\$46	Changing Variables	0	0	Binary
14	\$P\$46	Changing Variables	0	0	Binary
15	\$Q\$46	Changing Variables	0	0	Binary
16	\$R\$46	Changing Variables	0	0	Binary
17	\$S\$46	Changing Variables	0	1	Binary
18	\$T\$46	Changing Variables	0	0	Binary
19	\$U\$46	Changing Variables	0	1	Binary
20	\$V\$46	Changing Variables	0	1	Binary
21	\$W\$46	Changing Variables	0	0	Binary
22	\$X\$46	Changing Variables	0	0	Binary
23	\$Y\$46	Changing Variables	0	1	Binary
24	\$Z\$46	Changing Variables	0	0	Binary
25	\$AA\$46	Changing Variables	0	0	Binary
26	\$AB\$46	Changing Variables	0	0	Binary
27	\$AC\$46	Changing Variables	0	0	Binary
28	\$AD\$46	Changing Variables	0	0	Binary
29	\$AE\$46	Changing Variables	0	1	Binary
30	\$AF\$46	Changing Variables	0	0	Binary
31	\$AG\$46	Changing Variables	0	0	Binary
32	\$AH\$46	Changing Variables	0	0	Binary
33	\$AI\$46	Changing Variables	0	0	Binary
34	\$AJ\$46	Changing Variables	0	0	Binary
35	\$AK\$46	Changing Variables	0	0	Binary
36	\$AL\$46	Changing Variables	0	0	Binary
37	\$AM\$46	Changing Variables	0	0	Binary

المصدر: إعداد الباحثين، نتائج حل النموذج باستخدام Solver

ملحق (هـ): نتائج قيود التغطية (Constraints) لنموذج تغطية المجموعة بالتغطية المتعددة (SCLP-MC)

<i>i</i> (Constraint)	Constraints					
	Cell	Name	Cell Value	Formula	Status	Slack
1	\$AN\$47	Reference	2	\$AN\$47>=\$AP\$47	Binding	0
2	\$AN\$48	Reference	2	\$AN\$48>=\$AP\$48	Binding	0
3	\$AN\$49	Reference	2	\$AN\$49>=\$AP\$49	Binding	0
4	\$AN\$50	Reference	3	\$AN\$50>=\$AP\$50	Not Binding	1
5	\$AN\$51	Reference	3	\$AN\$51>=\$AP\$51	Not Binding	1
6	\$AN\$52	Reference	4	\$AN\$52>=\$AP\$52	Not Binding	2
7	\$AN\$53	Reference	4	\$AN\$53>=\$AP\$53	Not Binding	2
8	\$AN\$54	Reference	4	\$AN\$54>=\$AP\$54	Not Binding	2
9	\$AN\$55	Reference	4	\$AN\$55>=\$AP\$55	Not Binding	2
10	\$AN\$56	Reference	3	\$AN\$56>=\$AP\$56	Not Binding	1
11	\$AN\$57	Reference	3	\$AN\$57>=\$AP\$57	Not Binding	1
12	\$AN\$58	Reference	3	\$AN\$58>=\$AP\$58	Not Binding	1
13	\$AN\$59	Reference	2	\$AN\$59>=\$AP\$59	Binding	0
14	\$AN\$60	Reference	2	\$AN\$60>=\$AP\$60	Binding	0
15	\$AN\$61	Reference	3	\$AN\$61>=\$AP\$61	Not Binding	1
16	\$AN\$62	Reference	4	\$AN\$62>=\$AP\$62	Not Binding	2
17	\$AN\$63	Reference	3	\$AN\$63>=\$AP\$63	Not Binding	1
18	\$AN\$64	Reference	2	\$AN\$64>=\$AP\$64	Binding	0
19	\$AN\$65	Reference	3	\$AN\$65>=\$AP\$65	Not Binding	1
20	\$AN\$66	Reference	2	\$AN\$66>=\$AP\$66	Binding	0
21	\$AN\$67	Reference	4	\$AN\$67>=\$AP\$67	Not Binding	2
22	\$AN\$68	Reference	2	\$AN\$68>=\$AP\$68	Binding	0
23	\$AN\$69	Reference	3	\$AN\$69>=\$AP\$69	Not Binding	1
24	\$AN\$70	Reference	3	\$AN\$70>=\$AP\$70	Not Binding	1
25	\$AN\$71	Reference	2	\$AN\$71>=\$AP\$71	Binding	0
26	\$AN\$72	Reference	3	\$AN\$72>=\$AP\$72	Not Binding	1
27	\$AN\$73	Reference	3	\$AN\$73>=\$AP\$73	Not Binding	1
28	\$AN\$74	Reference	3	\$AN\$74>=\$AP\$74	Not Binding	1
29	\$AN\$75	Reference	2	\$AN\$75>=\$AP\$75	Binding	0
30	\$AN\$76	Reference	3	\$AN\$76>=\$AP\$76	Not Binding	1
31	\$AN\$77	Reference	3	\$AN\$77>=\$AP\$77	Not Binding	1
32	\$AN\$78	Reference	4	\$AN\$78>=\$AP\$78	Not Binding	2
33	\$AN\$79	Reference	4	\$AN\$79>=\$AP\$79	Not Binding	2
34	\$AN\$80	Reference	2	\$AN\$80>=\$AP\$80	Binding	0
35	\$AN\$81	Reference	2	\$AN\$81>=\$AP\$81	Binding	0
36	\$AN\$82	Reference	4	\$AN\$82>=\$AP\$82	Not Binding	2
37	\$AN\$83	Reference	4	\$AN\$83>=\$AP\$83	Not Binding	2
X_j	\$C\$46:\$A\$46=Binary		Sum = 109			

المصدر: إعداد الباحثين، نتائج حل النموذج باستخدام Solve