

أثر التمثيل السكاني عالي الدقة في تقليص أخطاء التجميع ورفع كفاءة نتائج نماذج تخصيص المواقع: دراسة تطبيقية على مدينة الرياض باستخدام نظم المعلومات الجغرافية

د. إبراهيم بن عبيد الشويش

أستاذ نظم المعلومات الجغرافية المشارك، بقسم الجغرافيا، كلية اللغات والعلوم الإنسانية، جامعة القصيم

(أرسل بتاريخ 15/ 4/ 2026م، وقبل للنشر بتاريخ 6/ 5/ 2026م)

المستخلص:

تواجه نماذج تخصيص المواقع (Location-Allocation Models) في بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) فجوة بنيوية ناجمة عن الاعتماد التقليدي على بيانات التعداد الإجمالية ومراكز الثقل الهندسي (Centroids) للمناطق الإدارية الكبيرة كمثال مدينة الرياض، مما يؤدي إلى أخطاء التجميع (Aggregation Errors) ومشكلة الوحدات المساحية القابلة للتعديل (MAUP)، ويؤدي هذا إلى تشويه الواقع الديموغرافي وتوليد حلول مكانية مضللة. تهدف هذه الدراسة إلى قياس مدى إسهام الانتقال نحو نماذج التمثيل السكاني عالي الدقة (شبكة خلايا 200 متر) في تقليص أخطاء التجميع، ورصد حجم التشوه المكاني الناتج عن تمثيل السكان بالنقاط الوسطى لرفع كفاءة نمذجة المواقع المثلى للخدمات ودراسات سهولة الوصول. ولقد اعتمدت الدراسة على منهج التحليل المكاني والمنهج التحليلي المقارن عبر بناء أسطح طلب للسكان ديناميكية مستمرة تحاكي التوزيع الفعلي للسكان، مع اختبار حساسية واستجابة خوارزميات نماذج تخصيص المواقع الوسيط المكاني (p-median) لدى تغير مستوى التمثيل المكاني لبيانات السكان (الطلب). وأثبتت نتائج الدراسة نجاح أسطح الطلب عالية الدقة في تفكيك كتل البيانات الإجمالية المصمتة وإبراز التشتت السكاني الواقعي، مما قلص مسافات الوصول الوهمية الناتجة عن النقاط الوسطى (Centroids) وأسهم هذا التصحيح في توجيه خوارزميات التخصيص نحو اختيار مواقع مثلى حقيقية للخدمات تحقق الكفاءة والعدالة المكانية بدلاً من الحلول المتحيزة. في المقابل تظهر المؤشرات الإحصائية تفوقاً مستمراً لنموذج "النقطة الوسطى للحي السكني" في حجم التغطية السكانية مقارنة بنموذج خلية السكان 200متر في معظم سيناريوهات المسافة، كما سجل بعض السيناريوهات للنقطة الوسطى خطأ مطلق يبلغ +358,679 نسمة، ونسبة تضخيم لعدد السكان تصل إلى 62.7% مقارنة بالخلايا السكانية. وخلصت الدراسة إلى أن الاعتماد على مستويات التجميع الجغرافي الكبيرة (مثل الأحياء) في التخطيط الحضري والإقليمي يضلّل صنّاع القرار، وتوصي بتبني أسطح الطلب الدقيقة كضرورة منهجية حتمية، لا سيما عند التخطيط للخدمات الاستراتيجية شحيحة الموارد كالمرافق الصحية.

الكلمات المفتاحية: نماذج تخصيص المواقع؛ نظم المعلومات الجغرافية (GIS)؛ مشكلة MAUP؛ أسطح الطلب الديناميكية؛ P-median.

The Impact of High-Resolution Population Representation on Reducing Aggregation Errors and Enhancing the Efficiency of Location-Allocation Model Outcomes: An Applied Study

On Riyadh City Using GIS

Dr. Ibrahim Obeid Al Shwesh

Associate Professor of Geographic Information Systems (GIS) Department of Geography, College of Languages and Humanities, Qassim University, Kingdom of Saudi Arabia.

Abstract:

Location-allocation models within Geographic Information Systems (GIS) face a structural limitation stemming from their conventional reliance on aggregated census data and geometric centroids of large administrative units, such as in Riyadh. This reliance generates aggregation errors and induces the Modifiable Areal Unit Problem (MAUP), thereby distorting demographic realities and yielding misleading spatial solutions. This study aims to assess the extent to which transitioning to high-resolution population representation models (a 200-meter grid cell network) mitigates aggregation errors, and to quantify the spatial distortions resulting from centroid-based representation to enhance the efficiency of optimal facility location modeling and accessibility assessments. Employing spatial analysis and comparative analytical methodologies, continuous dynamic population demand surfaces were constructed to simulate actual population distribution. The sensitivity and responsiveness of the \$p\$-median location-allocation algorithm were tested against variations in the spatial resolution of demand data. The findings demonstrate that high-resolution demand surfaces effectively disaggregate solid data blocks, revealing realistic population dispersion and eliminating fictitious accessibility distances associated with centroid points. This correction directed allocation algorithms toward authentic optimal locations, ensuring spatial efficiency and equity over biased solutions. Conversely, statistical indicators revealed a consistent apparent over performance of the neighborhood centroid model in population coverage compared to the 200-meter grid model across most scenarios. In certain scenarios, centroid representation registered an absolute error of +358,679 persons—an overestimation reaching up to 62.7% relative to gridded population data. The study concludes that reliance on coarse geographic aggregation levels (e.g., neighborhoods) misleads urban and regional planning decision-makers. It recommends adopting high-resolution demand surfaces as an indispensable methodological necessity, particularly when planning strategic and resource-constrained services such as healthcare facilities.

Keywords: Location-Allocation Models; GIS; MAUP; Dynamic Demand Surfaces; P-median.

1. مقدمة:

تعدُّ عملية التخطيط المكاني وتحديد المواقع المثلى للخدمات والمرافق العامة (Optimal Facility Location) ركيزةً أساسيةً في التنمية المستدامة واستغلال الموارد المتاحة بكفاءة عالية (Hodgson et al., 1997) وفي هذا السياق، برزت نماذج تخصيص المواقع (Location-Allocation Models) كأدوات تحليلية متقدمة في نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، تهدف إلى الموازنة بين مواقع العرض (المرافق) ومواقع الطلب (السكان)، لضمان وصول الخدمة إلى مستحقيها بأقل تكلفة وجهد زمني أو مكاني ممكن. (Church & Murray, 2009)

ومع ذلك، فإنَّ كفاءة ودقَّة هذه النماذج لا تتوقَّف على خوارزميات التخصيص فحسب، بل تعتمد بشكلٍ مباشر على جودة وطبيعة "أسطح الطلب" المدخلة فيها (Current & Schilling, 1990). وهنا تبرز الأهمية البالغة لبيانات التعدادات السكانية الممثلة لوحدة مساحية صغيرة (Micro-scale Spatial Units)؛ إذ إنَّ الاعتماد التقليدي على النقاط الوسطى (Centroids) لمناطق التعداد الكبيرة أو البيانات الإجمالية (Aggregated Data) كثيراً ما يؤدي إلى حدوث خطأ التجميع المعروف بـ (Modifiable Areal Unit Problem – MAUP) ممَّا يتسبب في تشويه الواقع الديموغرافي وإنتاج حلول مكانية غير دقيقة تُعرف بالخطأ التجميعي. (Hewko et al., 2002; Openshaw, 1984)

إنَّ الانتقال نحو استخدام بيانات سكانية عالية الدقة على مستوى وحدات مساحية صغيرة أو من خلال تقنيات الاستيفاء المساحي (Areal Interpolation) والتَّمثيل السكاني الأمثل (Mennis, 2003; Alshwesh, 2014) يمثِّل استجابة علمية حتمية لسدِّ الفجوة بين النمذجة النظرية والواقع الفعلي (الشويش، 2020). فهو يُتيح لنماذج تخصيص المواقع محاكاة التوزيع الحقيقي للسكان بدقة متناهية، والتعامل مع النطاقات الجغرافية كـ "أسطح طلب ديناميكية" مستمرة بدلاً من التعامل معها ككتل مُصنَّعة متجانسة (Langford & Unwin, 1994) بناءً على ذلك، يسعى هذا البحث إلى دراسة التفاعلات العلمية بين نماذج تخصيص المواقع وأساليب التَّمثيل السكاني المختلفة، لتقديم دعم علمي ومنهجي يُسهم في ترشيد قرارات التخطيط المكاني ودعم القرار الجغرافي في اختيار المواقع المثلى للخدمات.

2. الدراسات السابقة:

تُمثِّل دراسة نماذج تخصيص المواقع ركيزةً بنويةً في دعم الجوانب العلمية لقرارات التخطيط المكاني، وتحديد المواقع المثلى للمنشآت والخدمات (Alshwesh, 2014). وتعود الجذور النظرية والرياضية الأولى لهذه النماذج إلى ستينيات القرن العشرين من خلال أعمال حكيمي وتيتز وبارت (Hakimi, 1964; Teitz & Bart, 1968)، لينتقل العلم بعدها إلى طور التطبيق المتسع في مجالات الجغرافيا التحليلية، والتخطيط الحضري، والهندسة، والإدارة العامة (Cromley & McLafferty, 2002; Teixeira & Antunes, 2008).

ويتجسد دور التحليل المكاني في نظم المعلومات الجغرافية على ضرورة سدِّ النقص العلمي المتعلق بفهم التفاعلات الديناميكية بين نماذج التخصيص الرياضية وأسطح الطلب المختلفة (Demand Surfaces) للمشكلة المكانية ذاتها؛ وكجغرافيين نربط دائماً سطح الطلب (التَّمثيل المكاني للسكان) بالتحليلات المكانية، سواء كان ذلك على هيئة Raster data أو Vector data؛ حيث ركزت جُلَّ الأدبيات السابقة على استخدام مواقع الطلب الفعلية الثابتة للسكان، أو الاعتماد على النقط الوسطى لمناطق التعداد السكاني الإدارية (Centroid Points) للمساحات الكبيرة، في حين لم ينل "التَّمثيل السكاني الأمثل" الذي يحاكي الواقع الفعلي لتوزيع السكان داخل الأحياء السكانية أو الوحدات المساحية الإدارية الاهتمام الكافي وسبر التفاعلات المكانية على كفاءة النماذج في بيئة نظم المعلومات الجغرافية.

2-1 نموذج الوسيط (p-median model) وتطبيقاته مع أسطح الطلب

يُعد نموذج p-median من أوائل النماذج وأكثرها شيوعاً في التحليل المكاني. ويقوم على دالة هدف تسعى إلى تقليل إجمالي المسافات المقطوعة أو زمن السفر بين مراكز العرض ونقاط الطلب، ممّا يحقق كفاءة عالية وتوزيعاً عادلاً للمرافق. وقد تفاعل هذا النموذج مع أسطح طلب متنوعة في الأدبيات كالتالي:

- أسطح الطلب المعتمدة على بيانات التعداد والمقاطع: صاغ كروملي وماكلافيرتي (Cromley & McLafferty, 2002) النموذج في قطاع الخدمات الصحية عبر التّعيين المباشر لمواقع العرض والطلب. وفي سياق خدمات السلامة، طبق الغرب (Algharib, 2011) النموذج باستخدام النقط الوسطى للمقاطع في دولة الكويت لدعم التخطيط المكاني لمحطات الإطفاء.
- أسطح الطلب المشتقة من النمذجة الرياضية المعقدة حيث قدّم ميتروبولوس وآخرون (Mitropoulos et al., 2006) صياغة تعتمد على البرمجة الخطيّة الصحيحة المختلطة (Mixed Integer Programming) لتوزيع مراكز الرعاية الصحية الأولية في غرب اليونان، بهدف موازنة الطلب الإقليمي وتخفيف العبء عن المستشفيات المركزية.
- أسطح الطلب المعتمدة على المحاكاة الدّقيقة: (Spatial Microsimulation) في توجه متقدم لتمثيل الطلب في المناطق الصّغيرة، استخدم تومينتز وآخرون (Tomintz et al., 2013) تقنيات المحاكاة الدّقيقة لتقدير معدلات المواليد، ومن ثمّ إدخال هذا السطح التقديري في نموذج p-median لتحديد المواقع المثلى لخدمات رعاية ما قبل الولادة.
- المقارنة مع الخوارزميات الذكيّة (Heuristic Methods): تناولت دراسة الشويش وآخرين (Alshwesh et al., 2016) المقارنة بين نموذج p-median وخوارزمية الجينات التجميعية (Grouping Genetic Algorithm) في بيئة نُظم المعلومات الجغرافيّة؛ للكشف عن أثر أساليب البحث والاستدلال وعلاقتها بخصائص التوزيع الجغرافي لسطح الطلب السكاني عند تحديد المواقع المثلى لمراكز الإسعاف في مدينة بريدة.

2-2 نماذج التغطية الجغرافية (Coverage Models)

تختلف نماذج التغطية عن نموذج الوسيط في كونها لا تسعى لتقليل متوسط المسافة، بل تهدف إلى توفير تغطية (كاملة أو قصوى) لأوزان الطلب بناءً على حدود زمنية أو مسافة محدّدة (Church & Murray, 2009). وتتفرّع إلى نمطين رئيسيين: أ. نموذج تغطية مجموعة المواقع (Location Set Covering Problem - LSCP) يهدف هذا النموذج إلى تقليل عدد المرافق المعروضة إلى أدنى حدٍ ممكن، مع الالتزام بتغطية جميع نقاط الطلب السكاني بنسبة 100% بشرط ألا تتجاوز المسافة أو الزمن حدّاً معيّناً، انظر على سبيل المثال:

(Toregas & ReVelle, 1973; ReVelle & Hogan, 1989; Marianov & ReVelle, 1994; Rajagopalan et al., 2008).

ب. نموذج التغطية القصوى (Maximal Covering Location Problem - MCLP)

يعمل هذا النموذج في ظل قيود الميزانية المحدودة (ثبات عدد المرافق المتاحة)، ويسعى إلى تعظيم حجم الطلب السكاني المغطى ضمن المسافة أو الزمن المحددين، وهو ما يجعله نموذجاً واقعياً عند عجز الموارد عن تغطية كامل السطح السكاني، ومن أبرز الدّراسات ما يلي: (Church & ReVelle, 1974; ReVelle & Hogan, 1989; Spaulding & Cromley, 2007; Murawski & Church, 2009).

2-3 نماذج التفاعل وتلاشي الطلب مع المسافة (Maximise Attendance)

على النقيض من النماذج الحتمية التي تفترض توجه السكان دائماً إلى أقرب مرافق، توجد نماذج تختلف في الوظائف والأهداف

والعمليات، وكذلك في كيفية البحث من خلال الحلول الممكنة لتخصيص نقاط الطلب، ومن أبرزها نموذج تعظيم الحضور (Maximise Attendance) الذي يركز على نمذجة السلوك البشري؛ إذ تُحدد أوزان الطلب استنادًا إلى دالة رياضية تفترض أنه كلما زادت المسافة أو الزمن، قلت نسبة تخصيص الطلب والتفاعل مع المرفق، وهو ما يُعرف في الجغرافيا تلالشي الأثر مع المسافة، ومن أبرز الدراسات (Holmes et al., 1972; Algharib, 2011).

هناك دراسات حاولت التغلب على عدم وجود بيانات سكانية لوحداث مساحية صغيرة باستخدام تقنيات الاستيفاء المساحي مع نماذج تخصيص المواقع انظر مثلاً (الشويش، 2020).

وتكمن أهمية هذا الربط المنهجي والتحليلي بين نماذج تخصيص المواقع وتقنيات الاستيفاء المساحي لتمثيل سطح الطلب للدراسات السابقة في النقاط الجوهرية التالية:

- تأثير دقة "سطح الطلب" على كفاءة النماذج الرياضية: تُشكل البيانات السكانية المستخلصة عبر الاستيفاء المساحي ما يُعرف (Demand Surface) الذي تعتمد عليه خوارزميات التخصيص (مثل نموذج التغطية القصوى Maximal Covering أو نموذج تقليل المسافة P-Median، لذلك نجد إن الاعتماد على تقنيات تقليدية مثل الوزن المساحي (Areal Weighting) يفترض توزيعاً متجانساً للسكان، مما يتسبب في حدوث "إزاحة مكانية للطلب" ونمذجة مراكز ثقل (Centroids) وهمية لا تعكس الواقع الفعلي. نتيجة لذلك، تقع النماذج في مشكلة تخصيص الخدمات في مواقع قد تكون بعيدة ميكانيكياً وزمنياً عن الكثافات السكانية الحقيقية، مما يضعف كفاءة المخرج التخطيطي.
- الحد من مشكلة الوحدات المساحية القابلة للتعديل (MAUP) وأخطاء التجميع: تساهم تقنية الخرائط الداسيمترية (Dasymetric Mapping) في تفتيت الوحدات الإدارية الحشنة والمتباينة (كمناطق التعداد) وتحويلها إلى وحدات مكانية أصغر وأكثر تجانساً استناداً إلى مؤشرات الغطاء الأرضي. هذا التحسين المقياسي يقلل بشكل ملحوظ من أثر مشكلة (MAUP) بنوعيتها (Scale and Aggregation effects)، ويجعل حساب مصفوفة المسافات أو أزمنة الوصول (Origin-Destination Matrix) بين نقاط الطلب (السكان) ونقاط العرض (الخدمات) عبر شبكة الطرق أكثر دقة ومطابقة للواقع الميداني، وهو ما أيدته دراسات (Fisher and Langford, 1995; Cromley et al., 2012).
- تعزيز العدالة المكانية وكفاءة تخصيص الموارد: عندما تنجح المنهجيات الهجينة أو الداسيمترية في تنقية البيانات وإقصاء البُطاقات غير المأهولة (كالوديان، السبخات، المناطق الصناعية، أو الأراضي البيضاء) من الحسابات الكثافية — كما ظهر جلياً في دراسة الدغيري والشويش (2018) في أحواض وديان مدينة بريدة — فإن نماذج تخصيص المواقع تتجه ديناميكياً للاستجابة فقط للكُتل البشرية الحية. هذا التمكن يضمن توزيعاً عادلاً للخدمات الحيوية (كالرعاية الصحية والتعليم)، ويمنع الهدر الاقتصادي الناتج عن بناء مرافق في نطاقات جغرافية معزولة أو ذات كفاءة وصول منخفضة.

4-2 أسطح الطلب السكاني المعتمدة على الذكاء الاصطناعي والاستشعار عن بعد عالي الدقة

اتجهت الدراسات الحديثة إلى توظيف خوارزميات التعلم الآلي (Machine Learning) مثل Random Forest والشبكات العصبية لدمج صور الأقمار الاصطناعية عالية الدقة وبصمات المباني مع بيانات التعداد لإنتاج شبكات سكانية دقيقة (Gridded Population Surfaces) بدقة خلايا سكانية 100م، مما أثبت تفوقها الملحوظ على الخرائط الداسيمترية التقليدية في تغذية نماذج التخصيص (Smith et al. (2021) & Wang et al. (2022). كما ركزت دراسات أخرى مثل (Zhao et al. (2023) على إدماج بيانات الترموضع اللحظي المستخلصة من الهواتف المحمولة (Mobile Phone)

(Big Data) لإنشاء "أسطح طلب سكاني ديناميكية زمنياً" (Spatiotemporal Demand Surfaces)؛ حيث أثبتت الدراسة أن توزيع الطلب السكاني يختلف بين الليل والنهار، وأن استخدام النقاط الوسطى الثابتة للتعداد يُهمّل هذا التباين ويؤدي إلى إزاحة في تخصيص المرافق الطبية الطارئة (الطوارئ) بنسب تصل إلى 35%.

5-2 التطورات المنهجية في نماذج إمكانية الوصول والتخصيص العادل للخدمات

قام باحثون آخرون (Tao et al. (2020) & Chen et al. (2024) بدمج نماذج تخصيص المواقع مع أساليب قياس إمكانية الوصول المكانية المتقدمة والتي تعرف (Multi-modal 2SFCA) ونماذج تقليل عدم المساواة المكانية، مؤكدين أن دقة سطح الطلب تُعد المتغير الحاكم في تقييم الفجوات الخدمية والمناطق المحرومة من تخصيص الخدمات مثل (Healthcare Deserts). وفي دراسة إقليمية في البيئة الخليجية الحضرية قارنت هذه الدراسة بين استخدام نقاط ثقل الأحياء السكنية والتمثيل الشبكي الدقيق (Grid-based Demand) في تخصيص الخدمات التعليمية والبلدية، وبيّنت أن التمثيل الشبكي يقلل أخطاء التجميع (Aggregation Errors) بنسبة تزيد عن 40% ويوفر أساساً متيناً لدعم القرار التخطيطي. Al-Kindi and. (Al-Awadhi (2023

من خلال الاستعراض المنهجي للأدبيات يتضح أن نماذج تخصيص المواقع المكانية وعلى رأسها نموذج الوسيط (p-median) ونماذج التغطية الجغرافية بمختلف تنويعاتها شهدت تطوراً مستمراً في محاولة محاكاة الواقع المكاني بدقة. إلا أن الغالبية العظمى من التطبيقات المبكرة اتكأت على اختزال الطلب في النقاط الوسطى (Centroids) للمناطق الإدارية أو التعدادية، وهو ما يوقع مخرجات النمذجة في أخطاء تجميعية وتشوهات ناتجة عن مشكلة الوحدات المساحية القابلة للتعديل (MAUP). ورغم محاولات الدراسات اللاحقة الحديثة تحسين دقة أسطح الطلب السكاني باستخدام المحاكاة الدقيقة مثل الذكاء الاصطناعي والاستشعار عن بعد أو الاستيفاء المساحي تظل هناك حاجة ماسة لقياس أثر هذا التحول المنهجي على دقة قرارات التخصيص في المدن الكبرى ذات المساحات الواسعة كمدينة الرياض.

وتأسيساً على ذلك، تأتي هذه الدراسة لسد هذه الفجوة البحثية والتطبيقية، عبر إخضاع (p-median) لاختبار حساسية مقارنة بين التمثيل السكاني الإجمالي التقليدي (مراكز ثقل الأحياء) والتمثيل الدقيق المستمر (شبكة خلايا 200م)، وتتبع أثر ذلك على سيناريوهات مصفوفات المسافة الفعلية عبر شبكة الطرق وحجم التغطية المحققة من السكان، بما يضمن رفع كفاءة وعدالة قرارات التخطيط المكاني في محاولة من هذا البحث في إثبات أن دقة مخرجات التخطيط المكاني لا ترتبط بكفاءة الخوارزمية الرياضية فحسب، بل تتأثر بصفة أساسية بمدى دقة تمثيل سطح الطلب السكاني؛ فالتحول من النقاط التقريبية للأحياء السكنية إلى الأسطح المستمرة المشتقة من الاستيفاء المساحي أو المحاكاة الذكية الدقيقة للتوزيع المكاني للسكان الذي حاولت تمثيله الدراسات السابقة يعيد رسم جودة القرار الجغرافي، ويقدم دعماً علمياً ومنهجياً يساهم في ترشيد قرارات التخطيط المكاني ودعم القرار الجغرافي في اختيار المواقع المثلى للخدمات.

3. مشكلة الدراسة:

على الرغم من القيمة التحليلية المتقدمة التي تقدمها نماذج تخصيص المواقع (Location-Allocation Models) في بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتحديد المواقع المثلى للخدمات، إلا أن مخرجاتها تظل رهينة طبيعة ودقة البيانات السكانية المدخلة كـ "أسطح طلب" (Current & Schilling, 1990). وتبطل المشكلة البحثية في وجود فجوة منهجية وتطبيقية ناشئة عن الاعتماد التقليدي على بيانات التعداد الإجمالية (Aggregated Data) والنقاط الوسطى للسكان (Centroids) للمناطق الإدارية الكبيرة كحال مدينة الرياض؛ إذ يؤدي هذا التبسيط المكاني إلى بروز مشكلة الوحدات المساحية القابلة للتعديل (MAUP) وحدوث "أخطاء التجميع" (Openshaw, 1984; Hewko et al.,) (Aggregation Errors)

(2002)، ممّا يتسبب في تشويه الواقع الديموغرافي وإنتاج حلول مكانية مضللة تُعامل النطاقات الجغرافية ككتل مُصمتة متجانسة لا تعكس التوزيع الفعلي للسكان (Unwin, 1994. & Langford)

وتتأصل هذه المشكلة في تساؤل محوري جوهره: إلى أي مدى يسهم الانتقال من البيانات السكانية الإجمالية إلى نماذج التمثيل السكاني عالي الدقة على مستوى الوحدات المساحية الصغيرة في تقليص أخطاء التجميع ورفع كفاءة ونمذجة تخصيص المواقع المثلى للخدمات؟ ويتفرع من هذا التساؤل جملة من الاستفهامات البحثية المرتبطة بالواقع التطبيقي؛ حيث تهدف الدراسة إلى رصد حجم ونوع التشوه المكاني الناتج عن استخدام النقاط الوسطى للمناطق التعدادية الكبيرة في منطقة الدراسة، تليها محاولة فهم كيفية تأثير كفاءة خوارزميات التخصيص المكانية مثل p-median بتغير مستوى التفصيل المكاني لبيانات الطلب (Church & Murray, 2009) وتختتم الدراسة مشكلتها بالبحث عن المقاربة المنهجية الأفضل بين بيانات التعداد لوحداث مساحية كبيرة أو النقطة الوسطى وصولاً إلى البيانات السكانية لوحداث مساحية صغيرة والتي بدورها تنتج أسطح طلب ديناميكية مستمرة تعكس الواقع الفعلي بدقة (Mennis, 2003; Alshwesh, 2014)؛ ممّا يساهم في النهاية في سدّ الفجوة بين النمذجة النظرية والواقع الفعلي للتوزيع السكاني.

4. أهداف الدراسة:

الهدف الرئيس للدراسة هو قياس أثر التحول من التمثيل السكاني الإجمالي ومراكز الثقل التقليدية (Centroid Points) إلى أسطح الطلب عالية الدقة (شبكة خلايا 200 متر) في رفع كفاءة وعدالة مخرجات نماذج تخصيص المواقع في مدينة الرياض. وتركز الدراسة على الأهداف التفصيلية التالية:

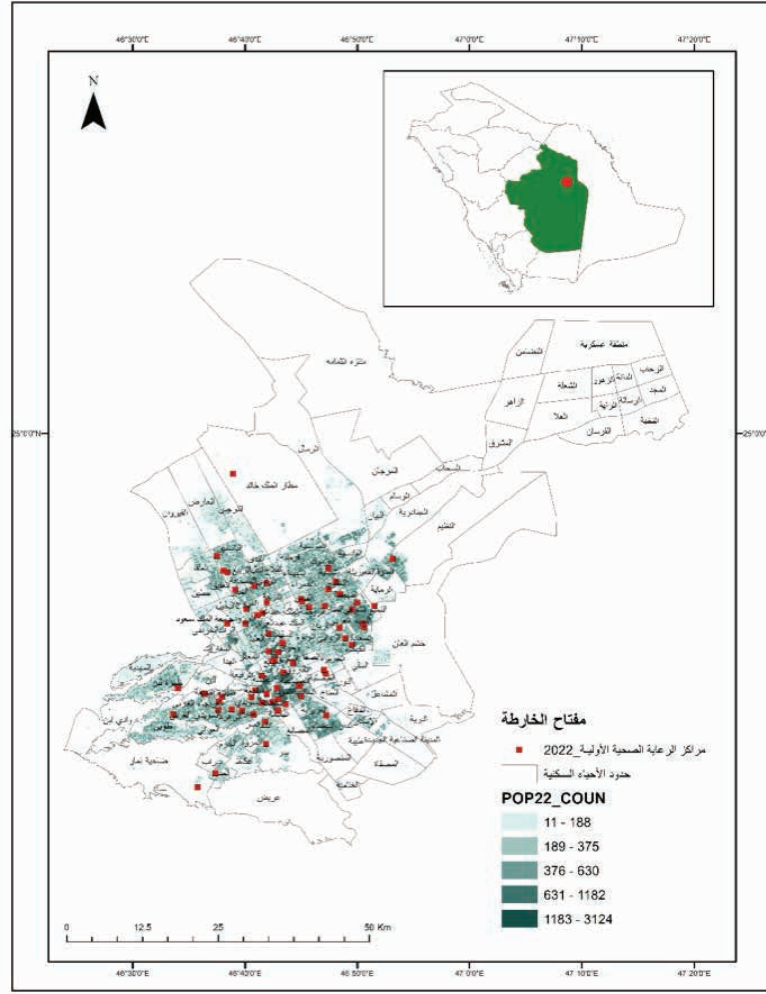
1. قياس حجم التشوه المكاني وأخطاء التجميع (Aggregation Errors / MAUP) الناتجة عن استخدام النقاط الوسطى لمناطق التعداد الكبيرة.
2. اختبار حساسية استجابة خوارزمية الوسيط المكاني (p-median) لتغير المقاييس المكانية لأسطح الطلب وتخصيص الخدمات.
3. مقارنة إحصائية لدقة مصفوفات المسافة وحجم التغطية الجغرافية للخدمات عبر شبكة الطرق الفعلية بين التمثيل النقطي التقليدي (النقطة الوسطى للحي السكني) والأسطح الشبكية الدقيقة خلايا السكان 200م.

5. منطقة الدراسة:

تشهد مدينة الرياض، عاصمة المملكة العربية السعودية ومركزها الثقافي والاقتصادي النابض، تحولات بنيوية وديموغرافية متسارعة جعلت منها إحدى أسرع الحواضر العالمية نمواً في العقود الأخيرة (Al-Hathloul & Rahman, 2003). وفي ضوء رؤية المملكة 2030، تضاعف الدور الاستراتيجي للمدينة كوجهة جاذبة للاستثمارات والسكان؛ حيث أظهرت النتائج الرسمية التفصيلية للتعداد السكاني الأخير 2022 أنّ حجمها السكاني قفز ليقترّب من 7 ملايين نسمة (بواقع 6,982,192 نسمة) الهيئة العامة للإحصاء، 2022، ممّا يضعها أمام تحديات تخطيطية كبرى تتعلق بضمان عدالة وكفاءة التوزيع المكاني للخدمات والمرافق العامة بما يتناسب مع هذا النمو المتسارع (Garba, 2004)).

ولم يقتصر هذا التوسع على الجانب الديموغرافي فحسب، بل واكبه امتداد جغرافي شاسع أدّى إلى تباين واضح وتنوع ملموس في المساحات الهندسية والخصائص العمرانية لأحيائها السكنية، وهو ما ينعكس بشكل مباشر على الأنماط المكانية لطلب الخدمة (Al-Khedheiri, 2002). فبينما تتسم بعض الأحياء المركزية والتاريخية بالكثافة السكانية العالية والمساحات المحدودة المترابطة (مثل أحياء وسط وجنوب الرياض)، تظهر الأحياء المستحدثة في أطراف المدينة (شمالاً وشرقاً) على شكل نطاقات جغرافية شاسعة المساحة وذات نمط عمراني متناثر بكثافات منخفضة أنظر (شكل رقم 1) (Al-Anazi, 2010).

د. إبراهيم بن عبيد الشويش: أثر التمثيل السكاني عالي الدقة في تقليص أخطاء التجميع ورفع كفاءة نتائج نماذج تخصيص المواقع...



شكل رقم 1: التوزيع المكاني للسكان في أحياء مدينة الرياض، وفي الإطار أعلاه منطقة الدراسة بالنسبة للمملكة العربية السعودية *من عمل الباحث استناداً إلى خرائط التعداد السكاني التي تم الحصول عليها من الهيئة العامة للإحصاء

هذا التباين الحاد في أحجام الأحياء وتوزيعها المساحي يفرض تعقيداً إضافياً على عملية تقييم التوزيع المكاني للخدمات القائمة؛ إذ إنَّ الاعتماد على الحدود الإدارية التقليدية للأحياء أو نقاطها الوسطى كمواضع للطلب السكاني يؤدي إلى حساب مسافات مُضللة نتيجة "خطأ التجميع"، خاصة في الأحياء الطرفية ذات المساحات الشاسعة (Hewko et al., 2002) بناءً على ذلك، تمثل مدينة الرياض بيئة تطبيقية مثالية لاستكشاف كيف يمكن لأساليب التمثيل السكاني عالي الدقة المعتمدة على بيانات تعداد 2022 التفصيلية أن تسهم في رفع كفاءة ونمذجة تخصيص المواقع المثلى للخدمات، وضمان وصولها الفعلي للمستفيدين بأقل جهد مكاني وزمني ممكن.

6. منهجية البحث:

تعتمد هذه الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي ومدخل النمذجة المكانية المتقدمة (Advanced Spatial Modeling) عبر بيئة تُظَم المعلومات الجغرافية، وتتمحور الفلسفة المنهجية للبحث حول قياس وتقييم أثر التغير في الدقة المكانية لأسطح الطلب (Demand Surfaces) على كفاءة ومخرجات خوارزميات تخصيص المواقع (Location-Allocation). ويتحقق ذلك من خلال بناء وإجراء مقارنة تباينية بين سيناريوهين للنمذجة: السيناريو الأول (التقليدي) المعتمد على النطاقات المجمعة (النقاط الوسطى للأحياء)، والسيناريو الثاني (عالي الدقة) القائم على شبكة الخلايا المربعة بمقياس (200 × 200 م) وفقاً للبيانات

التفصيلية للتعداد السكاني لمدينة الرياض 2022م، مع ضبط المدخلات في كلا السيناريوين بناءً على قياس المسافات الفعلية عبر شبكة الطرق الواقعية.

6 - 1 مرحلة إعداد وبناء قاعدة البيانات الجغرافية (Geodatabase Design)

تتطلب النمذجة الدقيقة بناء قاعدة بيانات مكانية موحدة ومتكاملة الطوبولوجيا، تعتمد على مسقط نظام الإحداثيات العالمي الخاص بمدينة الرياض (WGS 1984 UTM Zone 38N)، وتشكل من ثلاث طبقات رئيسية:

6 - 1 - 1 أسطح الطلب (Demand Surfaces):

يتم تمثيل التوزيع السكاني كنقاط وزن رقمية (Weighted Points) عبر مستويين متباينين في الدقة المكانية: المستوى المجمع (Aggregated Level): ويتم فيه اشتقاق النقاط الوسطى (Centroids) للأحياء السكنية بمدينة الرياض، وربطها ببيانات التعداد العام للسكان الصادر عن الهيئة العامة للإحصاء 2022م ويفترض هذا التمثيل - تماشيًا مع الطرح الكلاسيكي لـ (Current & Schilling, 1990) - تجانس التوزيع السكاني داخل الحي الواحد، وهو ما يؤدي إلى نشوء ما يُعرف بـ "خطأ المصدر" (Source Error).

المستوى الشبكي عالي الدقة (High-Resolution Grid): ويتم فيه الاعتماد على شبكة خلايا مربعة بمساحة (200 × 200 م)، والمنشئة من قبل الهيئة العامة للإحصاء وذلك بتوظيف طبقة استخدامات الأراضي والمباني الفعلية.

6 - 1 - 2 مواقع العرض والخدمة (Supply Layer):

تتمثل في حصر وإسقاط الإحداثيات الجغرافية الفلكية (X,Y) لجميع مراكز الرعاية الصحية الأولية القائمة حاليًا (71 مركزًا صحيًا) والتابعة لوزارة الصحة في مدينة الرياض.

6 - 1 - 3 شبكة النقل والمواصلات (Network Dataset - Distance Optimized):

بناءً شبكة طرق رقمية ذات مواصفات معينة مبنية بشكل هندسي Topology متكاملة لمدينة الرياض صالحة للاستخدام والتطبيق مع التحليل الشبكي (Network Analysis)؛ حيث يتجاوز هذا النموذج حساب "المسافات الإقليدية الخطية" (Euclidean Distance) التي تُعد مضللة في البيئات الحضرية المعقدة (Hewko et al., 2002)، ويعتمد بدلاً من ذلك على حساب المسافة الفعلية للسفر (Network Distance)، ونقصد هنا المسافة بين نقاط السكان إلى أقرب خدمة مركز صحي بالأمتار بناءً على هندسة الشوارع والالتفافات النظامية المسموحة (Turns)، مع استبعاد متغيرات السرعة والزمن تمامًا؛ لضمان استقرار النموذج جغرافيًا وقابليته للمقارنة الثابتة.

6 - 2 النمذجة المكانية وتطبيق خوارزميات التخصيص (Location-Allocation Analytics)

يتم تشغيل نماذج تخصيص المواقع عبر حزمة التحليل الشبكي (Network Analyst) في دورتين منفصلتين (دورة مستقلة لكل سيناريو طلب)، مع تثبيت مواقع المراكز الصحية (p)، وذلك بالاعتماد على خوارزميتين رئيسيتين:

- خوارزمية المشكلة الوسيطة لـ p (The p-Median Problem)

تستهدف هذه الخوارزمية تقليل المسافة الموزونة بين السكان والمراكز الصحية الأولية لضمان الكفاءة المكانية الكلية وعدالة التوزيع (Church & Murray, 2009) وتصاغ رياضياً كالتالي:

The objective function of this model IS to:

د. إبراهيم بن عبيد الشويش: أثر التمثيل السكاني عالي الدقة في تقليص أخطاء التجميع ورفع كفاءة نتائج نماذج تخصيص المواقع...

$$\text{Minimise } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_i d_{ij} x_{ij} \quad \text{(المعادلة رقم 1)}$$

Given the following constraints:

1) A facility has to be allotted with a separate demand site: $x_{ij} \leq x_{jj}$ for all (i, j)

2) An open facility must be allotted a demand:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \text{ for all } i \quad \text{(المعادلة رقم 2)}$$

3) Only the p facilities are to be located:

$$\sum_{j \in J} x_{jj} = p \text{ for all } j \quad \text{(المعادلة رقم 3)}$$

4) The sum of the neighbourhoods assigned to them equals the number of facilities to be located.

The total demand from a separate demand site is given as:

$x_{ij} = (0.1)$ for all (i, j) is allotted to only one facility,

where:

Z = objective function; هدف المعادلة

I = all the demand areas where the nodes on the network along the subscript i are an index signifying a specific demand area; جميع نقاط الطلب على الشبكة تعتبر منطقة طلب محددة

J = the collection of candidate facility sites when the nodes on the network along with the subscript j are frequently an index which signifies a particular facility site;

مجموعة مواقع الخدمات أو المرافق المرشحة على عقد الشبكة

a_i = the number of people who are present at the demand site i ; عدد السكان في مواقع الطلب

d_{ij} denotes the distance in terms of the travel cost and separates place i from candidate facility site j ; تشير إلى أقصر مسافة من حيث تكلفة السفر بين نقاط الطلب ومواقع الخدمات

but $d_{ij} \leq \text{distance}$; (متر) المسافة

x_{ij} is equal to 1 when demand at place i is allotted to a facility opened at site j , or is equal to 0 when the demand at place i is not allotted to that site; and

تساوي 1 عندما يتم تخصيص نقاط الطلب للخدمة أو صفر عندما تكون خارج التخصيص

p = the number of facilities that need to be located. عدد المرافق أو الخدمات المراد تخصيصها

3 - 6 التحليل المكاني والتحليل المقارن ورصد أخطاء التجميع (Spatial & Statistical Comparative Analysis)

لإثبات الفجوة المنهجية في هذه الدراسة، ومعالجة أثر مشكلة الوحدات المساحية القابلة للتعديل (MAUP)، تُخضع مخرجات

السيناريوهين التاليين للمقارنات التحليلية التالية:

أسلوب الخلايا المساحية المنتظمة (Grid-Based Population): حيث تم تقسيم النطاق الجغرافي للمدينة إلى خلايا مساحية صغيرة وعالية الدقة بأبعاد 200 م، تمثل التوزيع المكاني الفعلي للتعداد السكاني لعام 2022. وقد تم التعامل مع النقطة الوسطى لكل خلية كمركز ثقل للطلب السكاني يحتوي على أوزان تقديرات عدد السكان، لاعتمادها كقاعدة ارتكاز في التحليل المكاني. النقطة الوسطى للحي السكني (Neighborhood Centroid): وتمثل إجمالي عدد السكان التجميعي على مستوى الحي السكني ككل، حيث عُبر عن هذا العدد بنقطة واحدة تتوسط النطاق الإداري والجغرافي للحي، لتمثيل الأسلوب التقليدي الشائع.

3 - 6 - 1 قياس خطأ التجميع والإزاحة المكانية: (Aggregation & Displacement Errors)

1. حساب مسافة الإزاحة (Displacement Distance): قياس المسافة الشبكية الفاصلة بين المركز الهندسي للحي

(Centroid) ومراكز ثقل الخلايا المأهولة فعلياً (200 × 200 م) الناتجة عن التوزيع الفعلي للسكان، لتحديد حجم التشويه الجغرافي المرتكب في النموذج التقليدي، ونقصد هنا الفرق بين (مجموع السكان في مساحة التجميع) تخصيص نقاط الطلب السكاني بين النموذج الأول والثاني.

2. خطأ التخصيص المفقود ^{**}(Misallocation Error): حصر حجم السكان الذين تم تخصيصهم لمركز صحي معين في السيناريو التقليدي بناءً على موقع مركز الحي، بينما يكشف السيناريو عالي الدقة أنهم يقعون فعلياً في نطاق خدمة مركز آخر أو خارج نطاق التغطية تماماً.

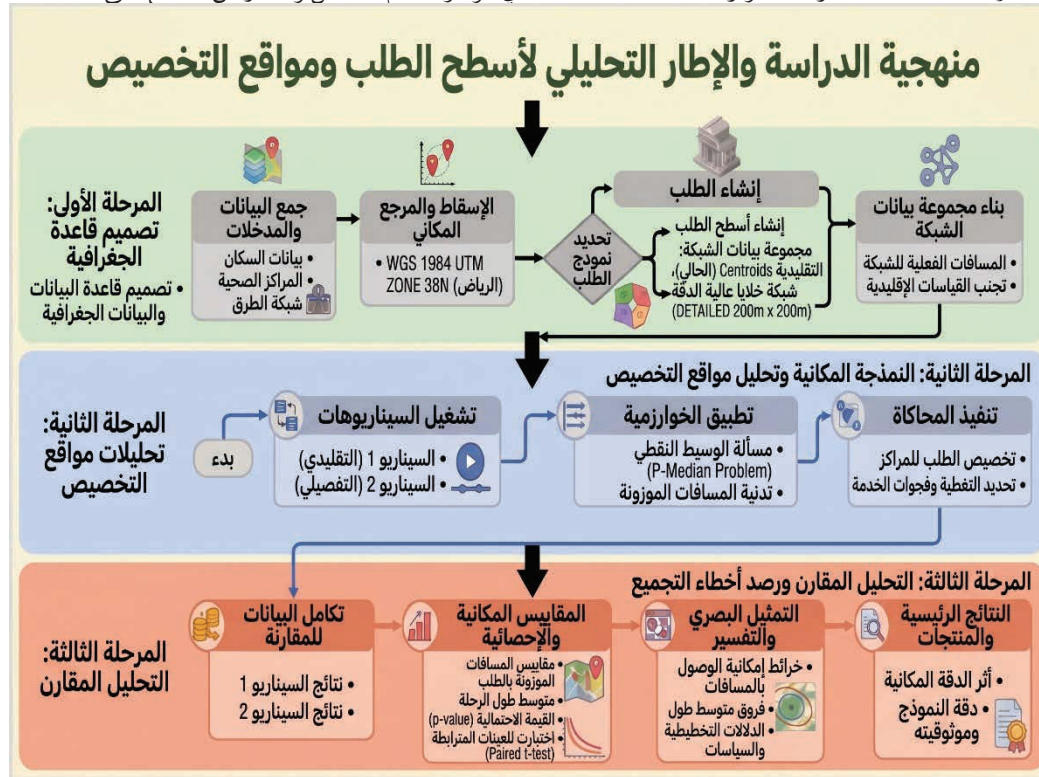
2-3-6 التحليل الإحصائي المقارن للمخرجات: (Statistical Metrics)

مقارنة دالة الهدف ل p-Median: تقييم التباين في قيمة دالة الهدف الإجمالية (Z) بين السيناريوهين، لاختبار الفرضية القائلة بأن الاعتماد على مراكز الأحياء يمنح تقديرًا متفائلاً وزائفاً (Underestimation) لإجمالي مسافات السفر الفعلية مقارنة بالواقع المستمر للشبكة المربعة. ولقد تم التحليل الإحصائي بناءً على ما يلي:

أولاً: مقاييس المسافات الموزونة بالطلب (Distance-Weighted Metrics)

تُعد المسافة الموزونة بحجم الطلب السكاني المعيار الرياضي الأساسي في الخوارزميات التي طبقت على أسطح الطلب على الخدمات في التغطية الجغرافية للسكان مع على نموذج (P-Median Problem). ثانياً: أثر مستوى التجميع (Aggregation Error)

في منهجية التحليل المكاني، يُقاس خطأ التجميع عبر رصد التباين بين القيمة المجمعة (الأحياء) والقيمة الحقيقية للخلايا بمقياس 200 م والتي تُعتبر هنا بمثابة الحقيقة الرسمية المتوفرة لبيانات التعداد السكاني. وسوف يتم التحليل واستعراض النتائج على عدة معاملات إحصائية.



شكل رقم (2): منهجية الدراسة والإطار التحليلي مع نماذج تخصيص المواقع

6 - 4 الإسقاط والربط المكاني (Spatial Reference & Join):

د. إبراهيم بن عبيد الشويش: أثر التمثيل السكاني عالي الدقة في تقليص أخطاء التجميع ورفع كفاءة نتائج نماذج تخصيص المواقع...

- نظام الإسقاط الجغرافي: لضمان التّطابق المكاني الدقيق وتفاذي أي إزاحة في الطبقات أثناء التّحليل، تمّ توحيد النظام المرجعي والإسقاط لكافة البيانات الجغرافية المستخدمة وفقاً للنظام العالمي المستعرض ميركاتور (WGS 1984 UTM Zone 38N)، وهو النظام المتوافق مع الموقع الجغرافي لمدينة الرياض.
- المعالجة والربط المكاني: خضعت خلايا التعداد السكاني (200م) لعملية ربط مكاني (Spatial Join) وتراكب هندسي (Overlay) مع طبقات استعمالات الأراضي والحدود الإدارية للأحياء الصّادرة عن الهيئة الملكية، وذلك لدمج المتغيرات السكانية والتنوع في قاعدة بيانات موحدة تدعم التّحليل المكاني المتقدم.

7. مصادر البيانات ونوعيتها:

تعتمد هذه الدّراسة على تكامل مجموعتين رئيسيتين من البيانات الجغرافية والإحصائية، تمّ استيرادها ومعالجتها ضمن بيئة نُظُم المعلومات الجغرافية، وذلك وفقاً للمصادر التالية:

- 7 - 1 بيانات الهيئة الملكية لمدينة الرياض: تمّ الحصول عليها بصيغة الملفات الخطية (Shapefile Format)، وتتضمن الطبقات الجغرافية التالية:

- خارطة الأساس (Base Map): لمدينة الرياض، مقياس رسم 1: 250,000
- شبكة الطرق: وتشتمل على الشرايين المرورية والطرق الرئيسية والفرعية، مقياس رسم 1: 250,000
- التّطابق الإداري للأحياء: خارطة حدود أحياء مدينة الرياض مدجّجاً بها نتائج الدّراسة السكانية لعام 2022م، مقياس رسم 1: 250,000

- 7 - 2 بيانات الهيئة العامّة للإحصاء (تعداد السعودية 2022):* البيانات السكانية التفصيلية: تمّ الاعتماد على بيانات التعداد السكاني العام لعام 2022م الموزعة مكانياً على مستوى الخلايا الشبكية بدقة (Grid Cells) 200m لضمان رصد دقيق للتوزيع السكاني الفعلي (بيانات غير منشورة).

8. النتائج:

يُستعرض في هذا الجزء النتائج التي توصلت إليها الدّراسة تحقيماً لهدفها الرئيس، وأهدافها التفصيلية من أجل توفير الدعم العلمي لقرارات اختيار المواقع المثلى للمرافق وسد الفجوة المعرفية المتعلقة بأهمية التّمثيل السكاني الأمثل مع نماذج تخصيص المواقع في نُظُم المعلومات الجغرافية (GIS). ولتحقيق ذلك، اعتمدت الدّراسة على نوعين من التّمثيل السكاني لتمثيل سطح (الطلب) على خدمات مراكز الرّعاية الصّحية الأولية بمدينة الرياض كمثال تطبيقي يمكن استخدامه وتعميمه عند دراسة باقي الخدمات التي تتوزع بشكل شحيح على مستوى المدن الكبيره والتي تتباين فيها المراكز الإدارية (الأحياء السكانية) من حيث المساحة والكثافة السكانية العالية. ولقياس حجم الفجوة والاختلافات الجوهرية في قرارات التّخصيص وحجم التغطية الجغرافية عند الانتقال بين هذين المستويين من التّمثيل السكاني، تمّ تطبيق نموذج التّخصيص والمواقع المثلى (P-Median) على كلا السّطحين، وذلك بهدف تحديد أفضل مواقع مراكز الرعاية الصحية الأوليّة التي تُقلل المسافات وتخدم العدد الأكبر من السكان، وفقاً للمحددات والسيناريوهات التالية:

- نطاقات الخدمة (المسافة المستهدفة): تم اختبار مسافتين هما 1500 م و 3000 م كأمثلة للمقارنة بين نتائج تطبيقهما على سطحي الطلب المتفاوتين في الدّقة الجغرافية (المعايير التخطيطية لم توضح المسافة الخاصة بالتجميع ولكن استخدم البحث هذه المسافات بناءً على دراسات سابقة).

- عدد المواقع المستهدفة (P): تمّ تحديد وتخصيص أفضل 10، 30، و 60 موقعاً مستخلصاً من إجمالي 71 موقعاً قائماً

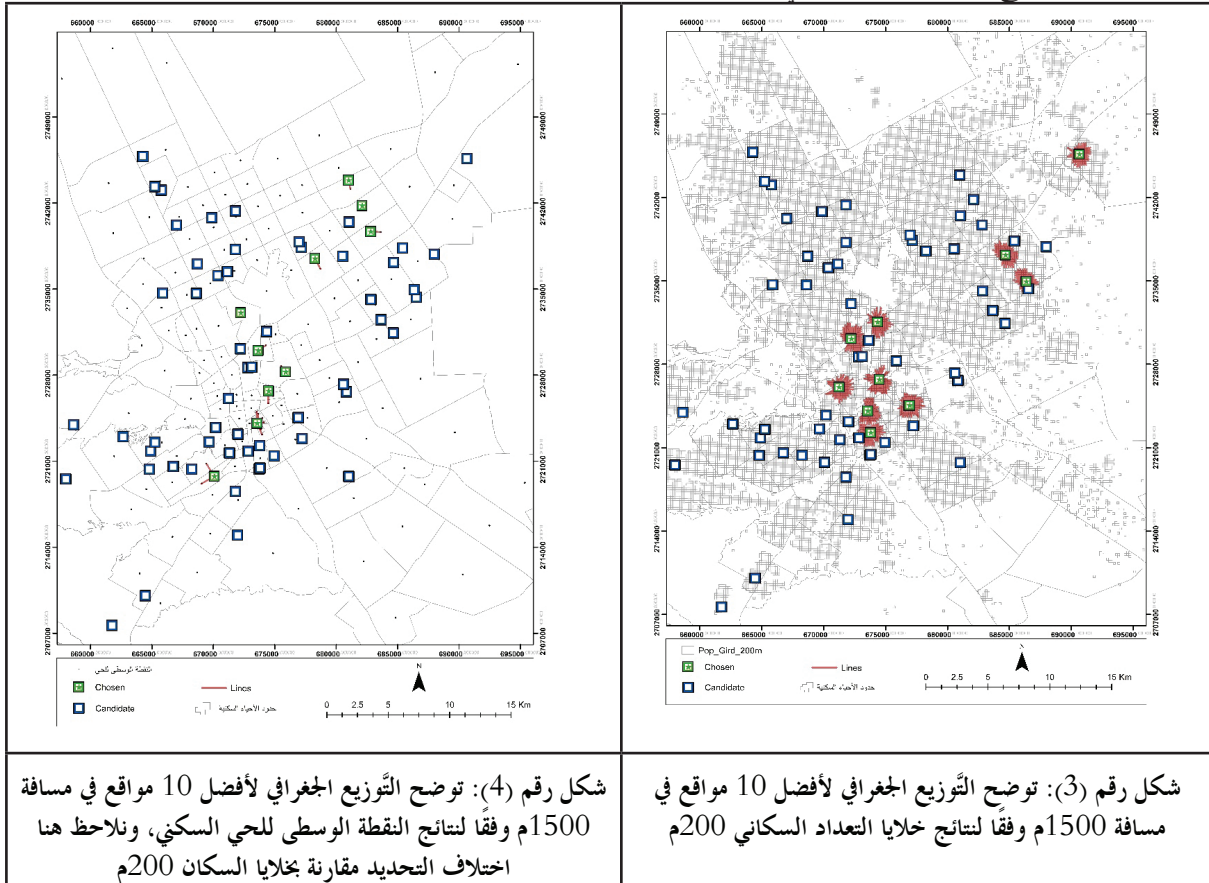
لمراكز الرعاية الصحية الأولية.

يهدف هذا السيناريو المتعدد والمتقاطع إلى استكشاف الفروق الجوهرية بين نتائج النمذجة المعتمدة على البيانات الشبكية المصغرة (Grid-based) والبيانات التجميعية التقليدية، وتقديم خيارات نمذجة متنوعة ومتعددة الأبعاد تدعم صنّاع القرار علمياً في اختيار المواقع المثلى ومعرفة حجم التغطية الجغرافية الفعلية للسكان في البيئة العمرانية لمدينة الرياض.

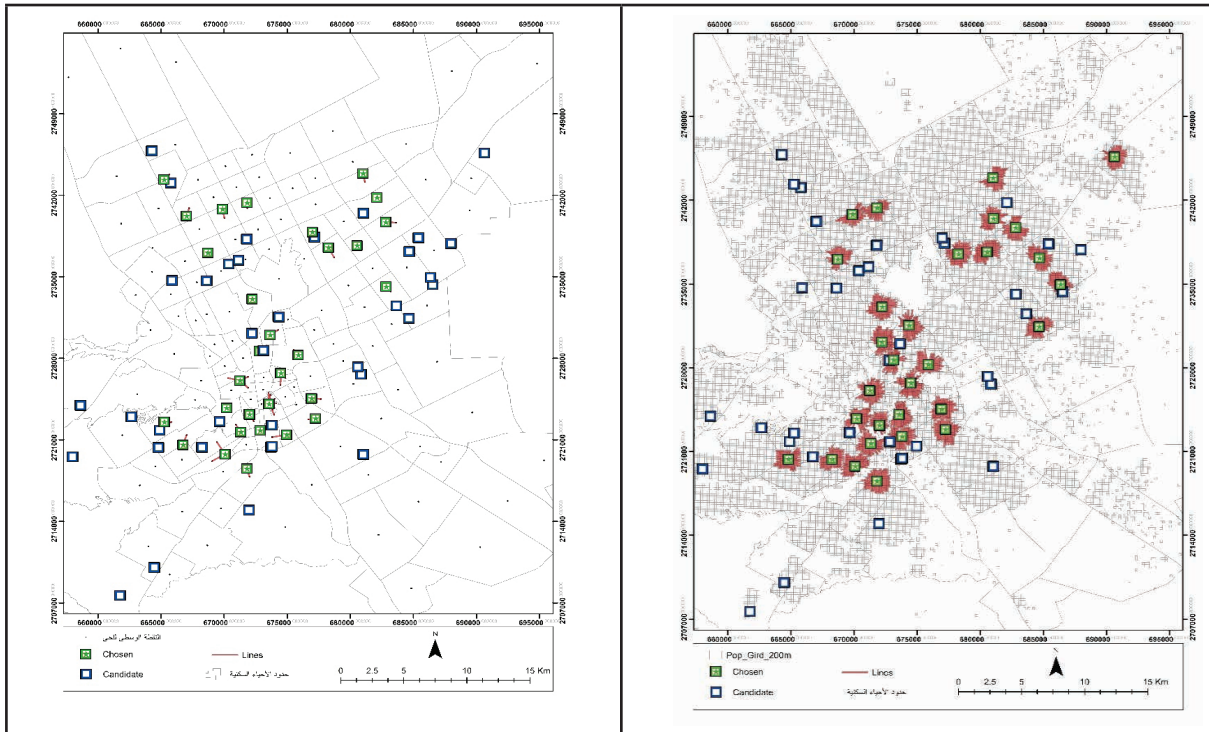
تستعرض الأشكال والخرائط المتسلسلة من شكل رقم 3 حتى شكل رقم 15 نتائج تطبيق نموذج p-median على نوعين من أسطح الطلب السكاني؛ تمثل الأولى النقطة الوسطى الهندسية للحي السكاني (Centroid)، في حين تعتمد الثانية على نقاط خلايا السكان (بدقة مكانية تبلغ 200 م)، والتي جرى نمذجتها وتوزيعها استناداً إلى البيانات الرسمية الصادرة عن تعداد السعودية لعام 2022م، لضمان تمثيل أدق وأحدث للوزن الديموغرافي الفعلي.

ونظراً لامتداد العمران الشاسع والمساحة الجغرافية الكبيرة لمدينة الرياض، فقد تمّ الاعتماد على أسلوب التكبير الخرائطي لنطاقات محددة عند عرض النتائج؛ وذلك بهدف إبراز التباينات المكانية الدقيقة في الأحياء الأكثر كثافة سكانية، والأكثر تركيزاً لخدمات مراكز الرعاية الصحية الأولية. وقد اعتمد مفتاح الخرائط المصطلحات والمفاهيم العلمية التالية لتفسير مخرجات النمذجة:

1. المواقع المختارة (Chosen): وتُشير إلى مراكز الرعاية الصحية التي حددها النموذج كواقع مثالي يُمثل الحل الأمثل لتقليل مسافات الانتقال بين حقول الطلب (السكان) والعرض (الخدمات) بناءً على قيد المسافة المحدد.
2. المواقع المرشحة (Candidate): وتُمثل بقية مراكز الرعاية الصحية الأولية القائمة والدّاخلية في التحليل، والتي لم يتمّ اختيارها ضمن الحل الأمثل في هذا السيناريو، مع بقائها كمواقع بديلة للتخصيص في سيناريوهات أخرى.
3. خطوط التخصيص (Lines): وهي خطوط ربط مستقيمة تصل بين نقاط الطلب السكاني ومراكز الخدمة المخصصة لها؛ بهدف توضيح النطاق الجغرافي الفعلي للتغطية الجغرافية.

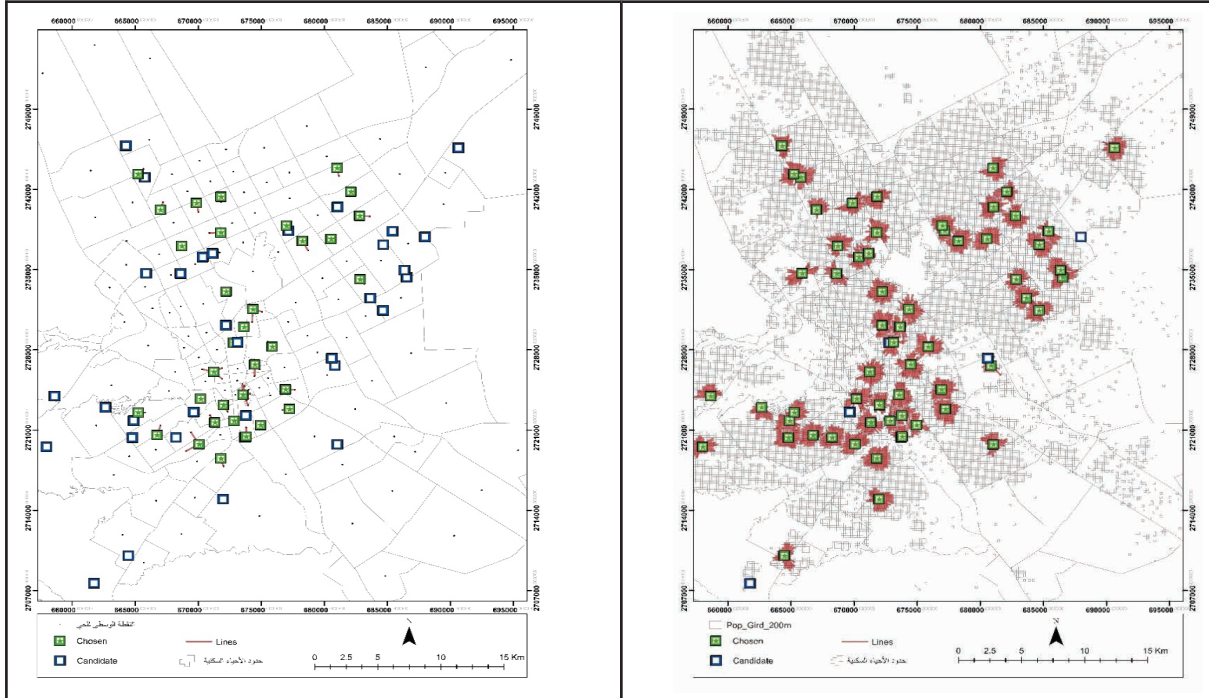


د. إبراهيم بن عبيد الشويش: أثر التمثيل السكاني عالي الدقة في تقليص أخطاء التجميع ورفع كفاءة نتائج نماذج تخصيص المواقع...



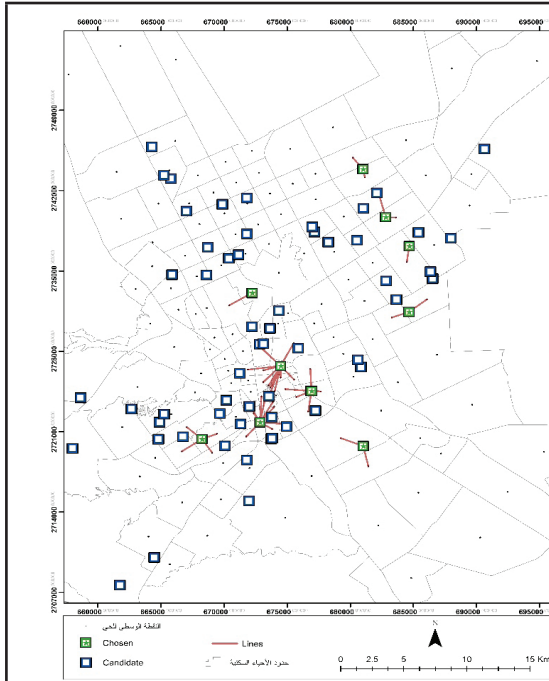
شكل رقم (6): توضيح التوزيع الجغرافي لأفضل 30 موقعًا في مسافة 1500م وفقًا لنتائج النقطة الوسطى للحي السكاني، ونلاحظ هنا اختلاف التحديد مقارنة بخلايا السكان 200م

شكل رقم (5): توضيح التوزيع الجغرافي لأفضل 30 موقعًا في مسافة 1500م وفقًا لنتائج خلايا التعداد السكاني 200م

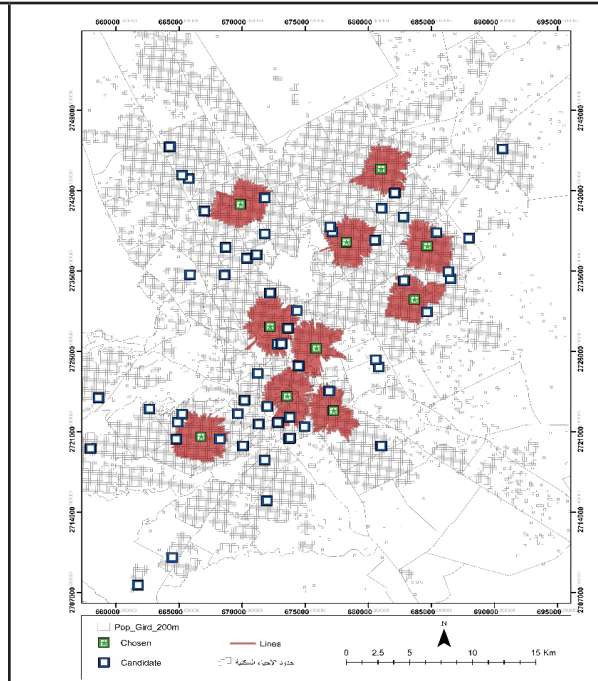


شكل رقم (8): توضيح التوزيع الجغرافي لأفضل 60 موقعًا في مسافة 1500م وفقًا لنتائج النقطة الوسطى للحي السكاني، ونلاحظ هنا اختلاف التحديد مقارنة بخلايا السكان 200م

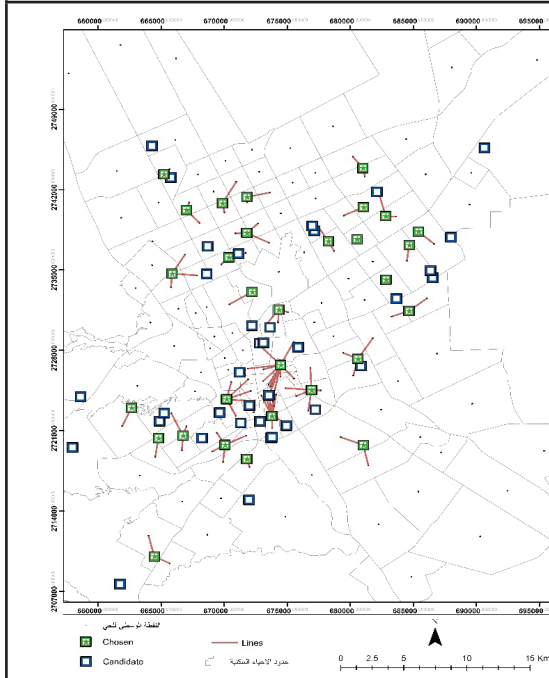
شكل رقم (7): توضيح التوزيع الجغرافي لأفضل 60 موقعًا في مسافة 1500م وفقًا لنتائج خلايا التعداد السكاني 200م



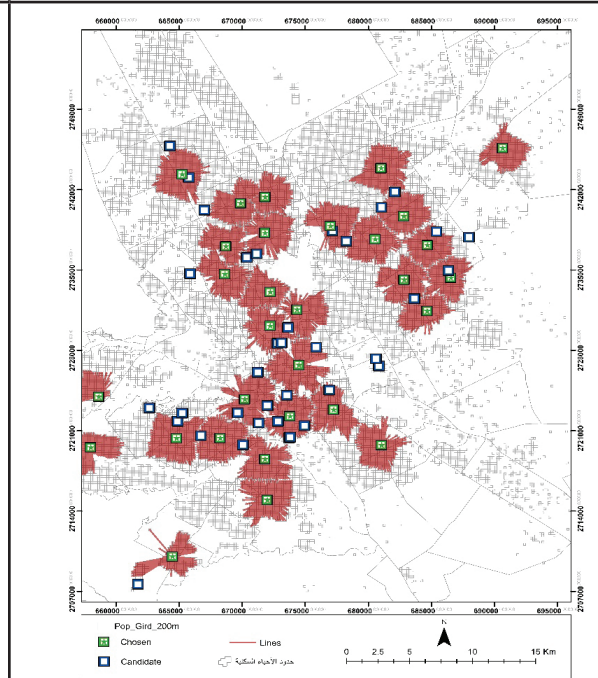
شكل رقم (10): توضيح التوزيع الجغرافي لأفضل 10 مواقع في مسافة 3000م وفقاً لنتائج النقطة الوسطى للحي السكاني، ونلاحظ هنا اختلاف التحديد مقارنة بخلايا السكان 200م



شكل رقم (9): توضيح التوزيع الجغرافي لأفضل 10 مواقع في مسافة 3000م وفقاً لنتائج خلايا التعداد السكاني 200م

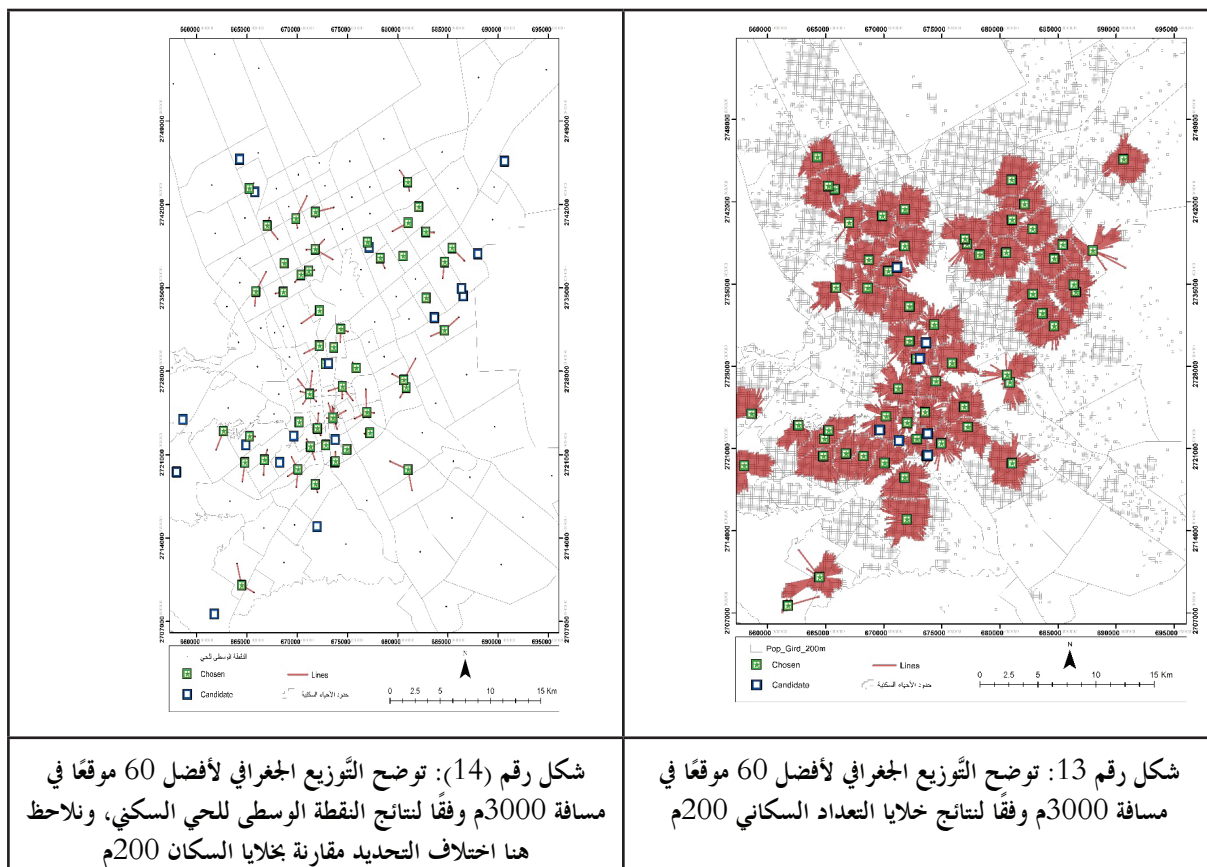


شكل رقم (12): توضيح التوزيع الجغرافي لأفضل 30 موقعاً في مسافة 3000م وفقاً لنتائج النقطة الوسطى للحي السكاني، ونلاحظ هنا اختلاف التحديد مقارنة بخلايا السكان 200م



شكل رقم (11): توضيح التوزيع الجغرافي لأفضل 30 موقعاً في مسافة 3000م وفقاً لنتائج خلايا التعداد السكاني 200م

د. إبراهيم بن عبيد الشويش: أثر التمثيل السكاني عالي الدقة في تقليص أخطاء التجميع ورفع كفاءة نتائج نماذج تخصيص المواقع...



تُظهر الخرائط والنتائج المستعرضة تبايناً مكانياً واضحاً في مخرجات تطبيق نموذج الموقع والأثر (p-median model) لتحديد التوزيع الأمثل للمراكز الصحية عند المستويات الثلاثة (10، 30، و 60 مركزاً). هذا التباين يبرز بشكل جلي عند المقارنة بين الاعتماد على نقاط التمثيل السكاني المستندة إلى النقطة الوسطى للحي السكاني، وتلك المستندة إلى أسطح خلايا التعداد السكاني (بدقة 200 م)؛ حيث لم تخل أي خارطة من خرائط الدراسة من وجود اختلافات جوهرية في نطاقات الخدمة المقترحة عبر جهات المدينة الأربع (الوسط، الشرق، الشمال، والجنوب). ويعزى هذا الاختلاف في الواقع إلى تباين أوزان نقاط الطلب (السكان) بين السطحين؛ إذ يركز نموذج p-median أساساً على خوارزمية تقليل مسافات الانتقال بين العرض والطلب لتحقيق أعلى كفاءة تغطية ممكنة. وبناءً على ذلك، فإن الاختلاف المكاني في توزيع نقاط التمثيل والمسافات الفاصلة بينها يولد بالضرورة مخرجات متباينة. فبينما تتأثر نتائج «النقطة الوسطى للحي» بالحلول القريبة والمحصورة في نطاق هذه النقطة المفردة، يتيح سطح «خلايا الـ 200 م» مرونة عالية في الاستجابة للمسافة، نظراً للتنوع المكاني الكثيف والتقارب الجغرافي لنقاط التمثيل السكاني.

كما رصدت الدراسة مفارقة تمثلت في ارتفاع حجم التغطية السكانية النظري عند تطبيق النموذج على مستوى النقطة الوسطى للحي مقارنة بسطح خلايا الـ 200 م (كما يوضح الجدول رقم 1 والشكل رقم 15). وتُفسّر الدراسة هذا الارتفاع بأن النقطة الوسطى للحي تختزل سكان الحي بأكملهم في نقطة هندسية واحدة، وعند ارتباطها بالخدمة وفقاً للمسافة المحددة، يفترض النموذج «تلقائياً» خدمة كافة سكان الحي، وهو افتراض مُضلل لا يعكس الواقع الجغرافي؛ ممّا يجعل مخرجات هذا السطح غير قابلة للموثوقية العالية في اتخاذ القرار.

وفي المقابل، تمتاز نقاط التمثيل الناجمة عن «خلايا الـ 200 م» بتوزيع أوزان الطلب جغرافياً على أجزاء الحي كافة، استناداً إلى التوزيع الفعلي للمباني السكنية؛ وهو ما يضمن كفاءة وموثوقية قرارات التوزيع الأمثل للمراكز الصحية، لكونها تأتي متوافقة تماماً مع

الكثافة الحقيقية والتشتت السكاني الواقعي داخل الأحياء.

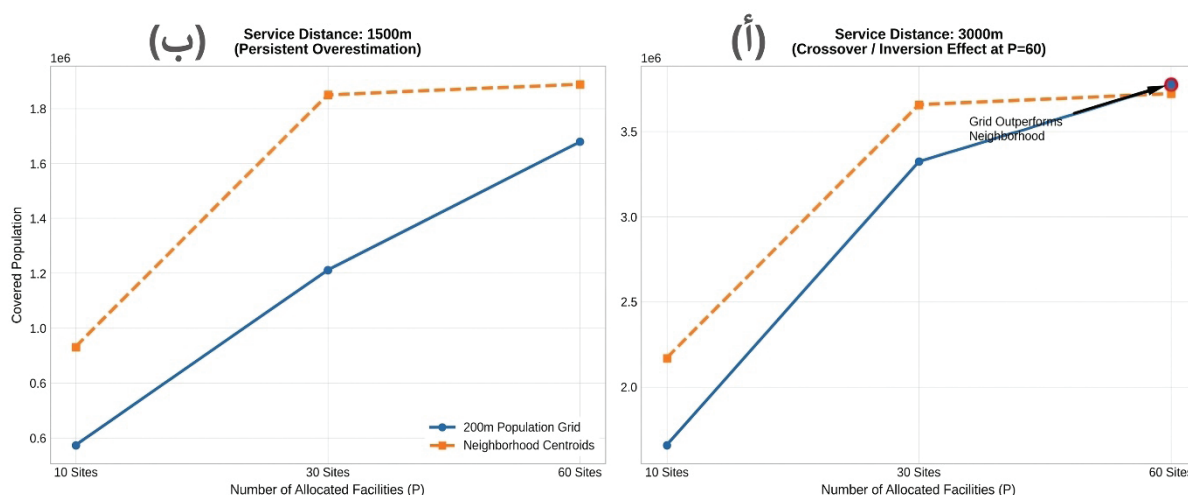
وقد لاحظت الدراسة وجود ارتفاع في حجم التغطية السكانية لنقاط الطلب عندما تم تطبيق نموذج p-median على سطح النقطة الوسطى للحي السكاني مقارنة بنتائج تطبيق النموذج على سطح النقطة الوسطى لخلايا السكان 200م (انظر الجدول رقم 1 والشكل رقم 15).

جدول رقم (1):

أعداد السكان في نطاق الخدمة الجغرافي لاختيار أفضل المواقع المثلى للخدمات بناءً على استخدام نموذجين من تمثيل السكان والمسافات مختلفة

عدد السكان في نطاق الخدمة الجغرافي لمسافة 3000m				عدد السكان في نطاق الخدمة الجغرافي لمسافة 1500m				Location- Allocation P-median
الفرق		النقطة الوسطى	النقطة الوسطى لخلية السكان 200m	الفرق		النقطة الوسطى	النقطة الوسطى لخلية السكان 200m	
النسبي	المطلق	للحي السكاني		النسبي	المطلق	للحي السكاني		
30.9	511918	2168104	1656186	38.5	358679	930666	571987	أفضل 10 مواقع
10.1	334799	3657658	3322859	34.6	639628	1851101	1211473	أفضل 30 موقعًا
-1.5	-56174	3722301	3778475	11.1	210352	1890123	1679771	أفضل 60 موقعًا

Impact of Spatial Aggregation Error on P-median Location-Allocation Models



شكل رقم 15: الحساسية المكانية لاستخدام تحليل Aggregation error على التغطية الجغرافية للسكان بين نموذجين للسكان مع نماذج تخصيص المواقع: رقم (أ) الحساسية المكانية لحجم التغطية على مسافة 3000 متر، ورقم (ب) الحساسية المكانية لحجم التغطية على مسافة 1500متر

في منهجية التحليل المكاني، يُقاس خطأ التجميع عبر رصد التباين بين القيمة المجمعة (الأحياء) والقيمة الحقيقية (الخلايا) بمقياس 200 م والتي تُعتبر هنا بمثابة الحقيقة الرسمية المتوفرة لبيانات التعداد السكاني.

1. كمية ونوع خطأ التجميع (Quantifying the Error)

من خلال طرح قيم التغطية الحقيقية (الخلايا) من القيم المجمعة (الأحياء)، يمكننا تصنيف وتحليل الخطأ إلى نوعين رئيسيين:

أ. خطأ التفاؤل / التضخيم (Positive Aggregation Error)

د. إبراهيم بن عبيد الشويش: أثر التمثيل السكاني عالي الدقة في تقليص أخطاء التجميع ورفع كفاءة نتائج نماذج تخصيص المواقع...

- يحدث هذا الخطأ عندما يمنحنا النموذج المجمع أرقامًا للتغطية أكبر من الواقع الحقيقي، وهو ما ساد في معظم النتائج:
- نطاق 1500 م لأفضل 10 مواقع، بلغ الخطأ المطلق +358,679 نسمة تضخيم تصل إلى 62.7% مقارنة بالخلايا السكانية. هذا هو أكبر مستويات الخطأ في التخطيط المكاني للخدمات، حيث يعطي انطباعاً وهمياً بأن الخدمة تغطي عدداً كبيراً من السكان، بينما هم في الواقع خارج النطاق الجغرافي.
- نطاق 1500 م لأفضل 30 موقعاً، قفز الخطأ المطلق إلى ذروته ليبلغ +639,628 نسمة (52.8%+) رغم زيادة المواقع، إلا أن توزيع المراكز الهندسية للأحياء استمر في سحب كتل سكانية ضخمة إلى داخل النطاق نظرياً فقط.
- نطاق 3000 م لأفضل 10 مواقع، بلغ الخطأ +511,918 نسمة (30.9%+) اتساع المسافة لم يمنع خطأ التجميع من تضخيم النتائج.

مثال:

$$\begin{aligned} \text{معادلة رقم (4) نسبة التضخيم} &= (\text{الخطأ المطلق} / \text{عدد السكان في الخلايا السكانية}) \times 100 \\ \text{نسبة التضخيم} &= 100 \times (571,987 / 358,679) \\ \text{نسبة التضخيم} &= 100 \times 0.627075 = 62.7\% \end{aligned}$$

ب. خطأ الإقصاء المكاني (Negative Aggregation Error)

يحدث عندما يؤدي التجميع إلى إسقاط وتجاهل سكان مغلطين بالفعل من الواقع:

- نطاق 3000 م لأفضل 60 موقعاً: (تحول الخطأ إلى قيمة سالبة بلغت -56,174 نسمة) بنسبة -1.5%.
- التفسير: عند الكثافة العالية للمواقع والمساحة الواسعة، وقعت بعض مواقع النقطة الوسطى للأحياء هندسياً خارج النطاق الخدمي بقليل (فأقصت الحي بالكامل)، في حين أن خلايا الـ 200 م التفصيلية أثبتت أن أجزاء واسعة من سكان هذا الحي تقع داخل نطاقات الخدمة للمراكز المتعددة والمنتشرة على مستوى المدينة.

2. ديناميكية سلوك الخطأ (Error Behavior Dynamics)

عند تحليل سلوك الخطأ هندسياً ومكانياً، نجد أنه محكوم بقانونين رئيسيين في دراستك:

↑ عدد المواقع (P) + ↑ مسافة الخدمة (D) << ↓ حجم خطأ التجميع المكاني (Aggregation Error)

أولاً: أثر تكثيف الشبكة (Effect of P-Sites)

- عند مسافة 1500 م، وبزيادة المواقع من 10 إلى 60، انكمش خطأ التجميع النسبي من 62.7% إلى 12.5%.
- النتيجة التخطيطية: كلما كانت شبكة الخدمات كثيفة ومنتشرة، ضعفت حساسية الخوازية تجاه خطأ التجميع، وتساوت المخرجات تقريباً سواء كانت البيانات دقيقة أو مجمعة.

ثانياً: أثر اتساع المساحة الجغرافية (Effect of Distance)

عند تثبيت عدد المواقع المثلى على 30 موقعاً ومضاعفة المسافة من 1500 م إلى 3000م، هبط خطأ التجميع بحدة من 52.8% إلى +10.1%.

النتيجة التخطيطية: النطاقات الجغرافية الواسعة تبتلع الفروقات المكانية الصغيرة؛ لذا فإن خطأ التجميع يقل تأثيره في الخدمات الإقليمية (مثل المستشفيات التخصصية)، بينما يكون فعالاً في الخدمات المحلية (مثل مراكز الرعاية الصحية الأولية).

9. المناقشة:

في هذه الجزئية من البحث نتمتع أكثر في تحليل جغرافي مكاني متقدم لنتائج نمذجة الموقع والتخصيص (P-median) مع نوعين من أسطح الطلب السكاني. حيث تُعبر النتائج التي تم استعراضها في الخرائط والجداول والشكل السابق في النتائج عن منهجية متقدمة في نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والتحليل المكاني، وهي أثر أسلوب تمثيل البيانات السكانية ومستوى التجميع (Spatial Aggregation) على مخرجات نماذج الأمثلة المكانية (Spatial Optimization).

تقليل دالة التكلفة المقاسة بالمسافة المرجحة بين الطلب (السكان) والعرض (مواقع الخدمات) يمكن مناقشتها على ثلاثة محاور رئيسية:

9 - 1 خطأ التجميع وظاهرة المبالغة التقديرية (Aggregation Error & Overestimation)

تُظهر المؤشرات الإحصائية تفوقاً مستمراً لنموذج "النقطة الوسطى للحي السكاني" في حجم التغطية السكانية مقارنة بنموذج "خلية السكان 200m في معظم السيناريوهات. هذا التباين ليس دليلاً على كفاءة نموذج الحي، بل هو تجسيد علمي يدل على ما يلي:

- مشكلة الوحدة المساحية القابلة للتعديل (MAUP) عند تجميع السكان في مركز هندسي واحد للحي (Centroid)، يفترض النموذج أن كامل الوزن الديموغرافي للحي يقع في تلك النقطة. فإذا وقعت هذه النقطة داخل النطاق الجغرافي للخدمة 1500م أو 3000م، يتم احتساب سكان الحي بالكامل كمستفيدين، مما يؤدي إلى تضخيم وهمي للتغطية الجغرافية الفعلية. دراسات حديثة مثل (Luo et al. 2022) و (Xiao et al. 2024) دجت نموذج p-median مع مقاييس الوصول المتطورة مثل Gaussian 2SFCA و Inverted 2SFCA لمقارنة الفجوات المكانية في المناطق الحضرية الكبرى كحال مدينة الرياض، ولقد أظهرت النتائج أن الأسطح التجميعية الكبيرة تخفي تماماً "جيوب بعض المواقع، في حين أن التحليل الشبكي المستمر (Grid Cells) هو الوحيد القادر على تحديد العدالة المكانية بدقة على مستوى الشارع والمربع السكني.

- الواقعية المكانية للنموذج الشبكي: نموذج الخلايا بدقة 200م يُفتت الكتلة السكانية إلى وحدات صغيرة وموزعة؛ مما يسمح للنموذج برصد الأطراف الهامشية للأحياء التي تقع خارج نطاق الخدمة الفعلي، وبالتالي يقدم تقديراً أكثر تحفظاً وواقعية.

9 - 2 تأثير حجم الشبكة الخدمية (Scale Effect):

يكشف التحليل المقارن بين السيناريوهات الثلاثة (أفضل 10، 30 و 60 موقعاً) عن قانون جغرافي مهم: "تقل حساسية نماذج التخصيص المكاني لأسلوب تمثيل السكان كلما اتجهت الشبكة الخدمية نحو التشبع".

- قانون التشبع المكاني: الفجوة الرقمية (الفرق النسبي) بين نموذجي التمثيل تتقلص بشكل حاد مع زيادة عدد المواقع. في سيناريو الندرة أفضل 10 مواقع تبلغ الفجوة ذروتها عند مسافة 1500م بفارق نسبي يصل إلى 38.5%، هنا يكون اختيار الموقع حساساً جداً لأي تغيير في ميكانيكية حساب المسافات.

- في سيناريو الوفرة أفضل 60 موقعاً تنخفض الفجوة إلى 11.1% عند مسافة 1500م، وتتحول إلى قيمة سالبة 1.5% عند مسافة 3000م هذا التحول يعود إلى أن الانتشار الكثيف للمراكز يغطي معظم المساحة المأهولة، مما يجعل "خطأ التجميع" يتلاشي تلقائياً بسبب تداخل نطاقات الخدمة.

9 - 3 تفاعل احتكاك المسافة مع دقة البيانات (Distance Friction)

- عند الانتقال من مسافة خدمة قصيرة 1500 م إلى مسافة أطول 3000 م، تظهر ديناميكيات مكانية مختلفة:
- تأثير النطاقات الواسعة عند مسافة 3000 م وسيناريو 60 موقعًا، نلاحظ ظاهرة استثنائية حيث تفوق نموذج الخلايا الشبكية على نموذج الحي مطلقًا ونسبيًا الفرق بالسالب 56,174- نسمة، بنسبة 1.5%- . وتدعم هذه النتيجة ما توصل إليه الدغيري والشويش (2018) و Zhao et al. (2023) من أن التمثيل النقطي التقليدي يفشل في تمثيل الجيوب السكانية والأطراف الممتدة، مما يحدث تحيزًا تخطيطيًا يهمل المناطق الهامشية ويُفاقم نشوء Service Deserts (Tao et al., 2020; Chen et al., 2024).
- التفسير العلمي: النطاق الواسع 3000 م مع الكثافة العالية للمواقع 60 موقعًا أتاح للنموذج الشبكي التفصيلي التقاط التجمعات السكانية المتناثرة على أطراف المخططات بدقة أعلى، في حين أن نموذج الحي عجز عن تخصيصها لأن مراكز الأحياء قد تقع أحيانًا خارج النطاقات المثلى المتداخلة، مما تسبب في استبعاد أحياء بأكملها من الحساب.

9 - 4 مقارنة التباين في قيمة دالة الهدف (Z) بين السطحين:

عند ثبات عدد المواقع المفتوحة ($p = 10, 30, 60$)، يظهر التباين في قيمة Z نتيجة لاختلاف طريقة التجميع المكاني (Spatial Aggregation) على النحو التالي:

- سيناريو النقطة الوسطى للحي السكاني (قيمة Z) مضللة أو منخفضة وهيئًا
- آلية التأثير: يتم تجميع الآلاف من السكان في نقطة مركزية واحدة (Centroid).
- سلوك دالة الهدف: عندما يختار النموذج موقعًا قريبًا من مركز الحي، تصبح المسافة (dij) قريبة جدًا من الصفر لكتلة سكانية ضخمة (wi).
- النتيجة على Z: تنخفض قيمة دالة الهدف الإجمالية (Z) بشكل كبير ووهمي، مما يعطي انطباعًا خاطئًا بأن كفاءة الوصول عالية جدًا، بينما في الواقع تم إهمال المسافات الحقيقية التي يقطعها السكان من أطراف الحي إلى المركز.
- سيناريو الخلايا السكانية 200 م قيمة Z حقيقية وأكثر واقعية
- آلية التأثير: يتوزع السكان على مئات النقاط الصغيرة (الخلايا)، حيث تعبر كل خلية عن موقعها الفعلي بدقة.
- سلوك دالة الهدف: حتى لو تم وضع المرفق في موقع مثالي، ستظل هناك مسافات حقيقية (dij) تفصله عن بقية الخلايا المجاورة المحيطة به.
- النتيجة على Z: تكون القيمة الإجمالية لدالة الهدف (Z) أعلى منطقيًا مقارنة بسيناريو الأحياء، لأنها تحسب بدقة المسافات التراكمية الفعلية للتجمعات السكانية الموزعة مكانيًا، ولا يعد التباين في قيمة Z بين السيناريوهين مجرد تباين رقمي، بل هو انعكاس لـ "خطأ التجميع المكاني" الناتج عن تمثيل السكان عند مستوى الحي، إذ توفر القيمة الإجمالية لـ Z في نموذج الخلايا السكانية تقييمًا حقيقيًا لكفاءة توزيع المرافق الصحية أو الخدمية، بينما يؤدي الاعتماد على مستوى الحي إلى إخفاء تفاصيل مكانية حرجة، مما قد يؤدي إلى اتخاذ قرارات تخطيطية قد لا تخدم السكان القاطنين على أطراف تلك الأحياء. تؤكد هذه المقارنة ما خلص إليه Alshwesh et al. (2016) و Wang et al. (2022) من أن انخفاض قيمة دالة الهدف (Z) في النماذج التجميعية ليس دليلًا على كفاءة تخطيطية، بل هو "تفاؤل خوارزمي مضلل"

ناتج عن اختزال أبعاد الحي في نقطة متجانسة وهمية. وبذلك، فإنَّ الانتقال إلى أسطح الطُّلب الشَّبكة (200م) لا يُغيِّر فقط من دقَّة الحساب، بل يُعيد هيكلة قرارات التَّخصيص لترتكز على قياسات إمكانية وصول عادلة تعكس حركة السُّكان الحقيقية عبر شبكة الطُّرق.

10. الخاتمة:

ثبتت هذه الدِّراسة أنَّ دقَّة مخرجات نماذج التَّخصيص والمواقع (p-median) لا تتوقَّف عند كفاءة الخوارزمية الرِّياضية فحسب، بل يجب أن تعتمد بصورة جوهرية على التوزيع المكاني لسطح الطُّلب (السكان)؛ إذ كشفت النتائج أنَّ الاعتماد التَّقليدي على النِّقاط الوسطى للأحياء (Centroids) يُنتج "تفاوتاً خوارزمياً مضللاً" يُخفي احتكاك المسافة الحقيقي ويهمش الأطراف الحضرية، في حين يضمن التَّمثيل الشَّبكي عالي الدِّقَّة (خلايا 200م) رصد حركة السُّكان الفعلية عبر شبكة الطُّرق والحدِّ من أخطاء التَّجميع ومشكلة الوحدات المساحية القابلة للتَّعديل (MAUP). إنَّ تبني مستويات التَّجميع الهندسية الكبيرة يُفرز مبالغاة تقديرية تُضلل صنَّاع القرار، وتشتدُّ خطورة هذه التَّشوُّهات في سيناريوهات شحِّ الموارد والمرافق الاستراتيجية (كمراكز الرعاية الصحية والمستشفيات ومراكز الطَّوارئ). وتأسيساً على ذلك، توصي الدِّراسة بضرورة التَّحوُّل في التَّخطيط الإقليمي والحضري نحو دراسات التَّمذجة المكانية المعتمدة على الأسطح المستمرة عالية الدِّقَّة (High-Resolution Grids) أو بصمات المباني السَّكنية، بوصفها مركِّزاً علمياً ومنهجياً حاسماً لترشيد الاستثمار العام، وتحقيق العدالة المكانية، وتفادي أخطاء التَّخصيص في توزيع الخدمات الحيوية بالمدن الكبرى.

المراجع:

- الخضيرى، عبد العزيز بن علي. (2002). التنمية الإقليمية والمحلية في المملكة العربية السعودية: الواقع والمأمول. مؤسسة اليمامة الصحفية.
- الدغيري، أحمد بن عبدالله، والشويش، إبراهيم بن عبيد. (2018). استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد والاستيفاء المساحي لتقييم أثر النمو العمراني في أحواض الوديان الداخلة على مدينة بريدة بمنطقة القصيم. *مجلة العلوم العربية والإنسانية*، 11(4)، 2157-2179.
- الشويش، إبراهيم بن عبيد. (2020). أهمية التمثيل السكاني الأمثل باستخدام نماذج تخصيص المواقع في نظم المعلومات الجغرافية. *مجلة العلوم العربية والإنسانية*، 13(3)، 1567-1535.
- الهيئة العامة للإحصاء. (2022). [بيانات غير منشورة حول التوزيع السكاني والتعداد العام للسكان والمساكن 2022]. المملكة العربية السعودية.
- الهيئة الملكية لمدينة الرياض. (2022). [خارطة الأساس الرقمية وطبقات الشيب فايل الجغرافية (Shapefiles)]. [بيانات مكانية غير منشورة]. إدارة البيانات الحضرية ونظم المعلومات الجغرافية، الرياض، المملكة العربية السعودية.

References:

- Al-Anazi, M. (2010). Spatial analysis of public services distribution using Geographic Information Systems (GIS). *Journal of Geographic Research*, 11(2), 45-68.
- Al-Dghairi, A. b. A., & Al-Shuwaish, I. b. O. (2018). Istikhdām tiqniyāt al-istish‘ār ‘an ba‘d wa-al-istifā’ al-masāhī li-taqyīm athar al-numūw al-‘umrānī fī aḥwāḍ al-widyān al-dākhilah ‘alā madīnat Buraydah bi-mantiqat al-Qasīm [Using remote sensing techniques and spatial interpolation to assess the impact of urban growth in the valley basins entering Buraidah city in the Qassim region]. *Majallat al-‘Ulūm al-‘Arabiyyah wa-al-Insāniyyah [Journal of Arabic and Human Sciences]*, 11(4), 2157-2179.
- Algharib, S. M. (2011). Distance and coverage: An assessment of location-allocation models for fire stations in Kuwait City, Kuwait (Doctoral dissertation, Kent State University).
- Al-Hathloul, S., & Rahman, A. (2003). The evolution of urban planning in Saudi Arabia: The role of the public sector. *International Development Planning Review*, 25(3), 285-302.
- Al-Khudairi, A. b. A. (2002). Al-tanmiyah al-iqlīmiyyah wa-al-maḥalliyyah fī al-Mamlakah al-‘Arabiyyah al-Su‘ūdiyyah: Al-wāqī‘ wa-al-ma’mūl [Regional and local development in the Kingdom of Saudi Arabia: Reality and expectations]. *Mu’assasat al-Yamāmah al-Ṣuḥufiyyah*.
- Al-Kindi, K. M., & Al-Awadhi, T. (2023). Evaluating spatial aggregation errors in location-allocation models: A comparative study of centroid-based vs. grid-based demand representation in urban Gulf contexts. *Journal of Urban Planning and Development*, 149(3), 04023028.
- Al-Shuwaish, I. b. O. (2020). Ahmiyyat al-tamthīl al-sukkānī al-amthāl bisti-khdām namādhij takhshīṣ al-mawāqī‘ fī nuḥūm al-ma’lūmāt al-jughrāfiyyah [The importance of optimal population representation using location allocation models in Geographic Information Systems]. *Majallat al-‘Ulūm al-‘Arabiyyah wa-al-Insāniyyah [Journal of Arabic and Human Sciences]*, 13(3), 1535-1567.
- Alshwesh, I. (2014). GIS-based interaction of location allocation models with areal interpolation techniques (Doctoral dissertation, University of Leicester).
- Alshwesh, I. (2018). A comparison of GIS-based supply and demand models to determining optimal access to health care facilities. *Bulletin of the Faculty of Arts*, 47(1).

- Alshwesh, I., Comber, A., & Brunsdon, C. (2016). GIS-based impact of different search heuristics in relation to demand surface characteristics: Comparing P-median with Grouping Genetic Algorithm approaches. *Journal of Arabic and Human Sciences*, Qassim University, 9(3), 21-39.
- Church, R. L., & Murray, A. T. (2009). *Business site selection, location analysis, and GIS*. John Wiley & Sons.
- Church, R. L., & ReVelle, C. S. (1974). The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, 32(1), 101-118.
- Chen, Y., Liu, Y., & Wang, S. (2024). Integrating location-allocation models with modified 2SFCA to mitigate spatial disparities and identify healthcare deserts. *Cities*, 145, 104689.
- Current, J. R., & Schilling, D. A. (1990). Analysis of errors due to data aggregation in location-allocation models. *Journal of Geography*, 89(6), 261-267.
- Garba, S. B. (2004). Managing urban growth and development in the Riyadh region, Saudi Arabia. *Cities*, 21(6), 503-511.
- General Authority for Statistics. (2022). [*Bayānāt ghayr manshūrah ḥawla al-tawzī' al-sukkānī wa-al-ta'dād al-'āmm lil-sukkān wa-al-masākin 2022*] [Unpublished data on population distribution and the general census of population and housing 2022]. Riyadh, Saudi Arabia.
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3), 450-459.
- Hewko, J., Smoyer-Tomic, K. E., & Hodgson, M. J. (2002). Measuring neighbourhood spatial accessibility to urban amenities: Does choice of spatial data type matter?. *Environment and Planning A*, 34(7), 1185-1206.
- Hodgson, M. J., Shmulewitz, F., & Korczak, M. (1997). Aggregation error in location-allocation models: A test of mitigation methods. *Geographical Analysis*, 29(4), 310-323.
- Langford, M., & Unwin, D. J. (1994). Generating and mapping population density surfaces within a geographical information system. *The Cartographic Journal*, 31(1), 21-26.
- Luo, J., Tian, L., Luo, L., Yi, H., & Wang, F. (2022). Two-step floating catchment area (2SFCA) method-based spatial accessibility to healthcare facilities and its inequality: A comparison of aggregation levels. *Applied Geography*, 146, 102763.
- Marianov, V., & ReVelle, C. (1994). The queuing probabilistic location set covering problem: A model for the location of emergency vehicles. *Socio-Economic Planning Sciences*, 28(1), 59-78.
- Mennis, J. (2003). Generating surface models of population using dasymetric mapping. *Professional Geographer*, 55(1), 31-42.
- Mitropoulos, P., Mitropoulos, I., & Giannatos, G. (2006). A biobjective model for the locational planning of hospitals and health centers. *Health Care Management Science*, 9(2), 171-179.
- Murawski, L., & Church, R. L. (2009). Improving accessibility to rural health services: The maximal covering location problem with workload capacities. *Spatial Economic Analysis*, 4(3), 317-339.
- Openshaw, S. (1984). *The modifiable areal unit problem (Concepts and Techniques in Modern Geography, Vol. 38)*. Geo Books.
- Rajagopalan, H. K., Saydam, C., & Xiao, J. (2008). A multiperiod set covering location model

- for dynamic redeployment of ambulances. *Computers & Operations Research*, 35(3), 814-826.
- ReVelle, C., & Hogan, K. (1989). Spatially structured server availability in emergency services. *Papers of the Regional Science Association*, 67(1), 113-121.
- ReVelle, C., & Hogan, K. (1989). The maximum availability location problem. *Transportation Science*, 23(3), 192-200.
- Royal Commission for Riyadh City. (2022). [*Khāriṭat al-asās al-raqmiyyah wa-ṭabaqāt al-shīb fāyil al-jughrāfiyyah (Shapefiles), madīnat al-Riyāḍ, bayānāt makāniyyah ghayr manshūrah*] [Digital base map and geographic shapefile layers, Riyadh city, unpublished spatial data]. Urban Data and GIS Administration, Riyadh, Saudi Arabia.
- Spaulding, B. D., & Cromley, R. G. (2007). Integrating dasymetric with location-allocation modeling. *Geographical Analysis*, 39(3), 281-305.
- Smith, A., Stevens, F. R., & Sorichetta, A. (2021). High-resolution gridded population mapping using Random Forest and multi-source geospatial data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 88, 101642.
- Tao, Z., Cheng, Y., & Dai, T. (2020). Measuring spatial accessibility to healthcare services with a multi-modal two-step floating catchment area (2SFCA) method. *Applied Geography*, 121, 102252.
- Teitz, M. B., & Bart, P. (1968). Heuristic methods for estimating the generalized vertex median of a weighted graph. *Operations Research*, 16(5), 955-961.
- Teixeira, J. C., & Antunes, A. P. (2008). A hierarchical location model for coordinating multi-level public services. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1050-1061.
- Tomintz, M. N., Clarke, G. P., & Rigby, J. E. (2013). Optimising the location of health care facilities using spatial microsimulation and location-allocation models. *International Journal of Health Geographics*, 12(1), 1-15.
- Toregas, C., & ReVelle, C. (1973). Binary logic solutions to a class of location-allocation problems. *Geographical Analysis*, 5(2), 145-155.
- Wang, Y., Wardrop, N. A., & Tatem, A. J. (2022). Integrating building footprints and high-resolution satellite imagery with neural networks for fine-scale population disaggregation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108, 102715.
- Xiao, Y., Chen, Y., Wu, W., & Li, M. (2024). Multi-objective spatial optimization of urban public services using inverted two-step floating catchment area and high-resolution gridded demand. *Computers, Environment and Urban Systems*, 107, 102058.
- Zhao, P., Li, X., & Kwan, M. P. (2023). Spatiotemporal dynamics of emergency medical service demand: Assessing the disparity using mobile phone big data. *Social Science & Medicine*, 318, 115632.

شكر وتقدير

يتقدم الباحث بخالص الشُّكر وعظيم الامتنان إلى الهيئة الملكية لمدينة الرياض، وإلى الهيئة العامة للإحصاء، على تعاونهم المثمر ودعمهم اللامحدود الذي حظي به البحث. ويخصُّ الباحث بالشُّكر والتقدير المسؤولين في كلا الجهتين لتزويده بالبيانات الإحصائية والمكانية غير المنشورة، والتي كان لتوفيرها أثرٌ بالغ ودورٌ جوهري في تعزيز دقة التحليلات والوصول إلى النتائج المنشودة. فلهما جزيل الشكر والثناء على دعمهم المستمر للبحث العلمي.

Biographical Statement	معلومات عن الباحث
Author's name Dr. Ibrahim Obeid Al Shwesh, Associate Professor of Geographic Information Systems in the Department of Geography, College of Languages and Humanities, Qassim University. Dr Ibrahim received his PhD degree in Geographical Information Systems 2014() from University of Leicester in the United Kingdom. His research interests focus on location-allocation modeling, dasymetric mapping techniques, service accessibility analytics, remote sensing analytics, and the analysis of geographic information and spatial data within the frameworks of spatial planning and future growth policies.	د. إبراهيم بن عبيد الشويش، أستاذ نظم المعلومات الجغرافية المشارك في قسم الجغرافيا، بكلية اللغات والعلوم الإنسانية، في جامعة القصيم، (المملكة العربية السعودية). حاصل على درجة الدكتوراه في نظم المعلومات الجغرافية من جامعة ليستر في المملكة المتحدة عام ٢٠١٤م. تدور اهتماماته البحثية حول قضايا تحليلات نماذج تخصيص المواقع وتقنيات الاستيفاء المساحي، وتحليلات قياس سهولة الوصول للخدمات، وتحليلات تقنيات الاستشعار عن بعد، وتحليلات المعلومات الجغرافية والبيانات المكانية المندرجة تحت سياسات التخطيط المكاني والنمو المستقبلي.

Email: Shoiesh@qu.edu.sa