

تقييم كفاءة البنية التحتية الخضراء في مواجهة التحديات المناخية (نموذج كمي قائم على المؤشرات الجغرافية الحضرية)

رسل رعد علوان

جامعة آزاد علوم تحقيقات

russellraad100@gmail.com

استلام البحث: 26-06-2025 مراجعة البحث: 12-07-2025 قبول البحث: 11-08-2025

المخلص

تشهد المناطق الحضرية تصاعداً غير مسبوق في التحديات المناخية، خاصة الجزر الحرارية الحضرية والفيضانات السطحية، مما يفاقم الضغط على البنى التحتية التقليدية. يهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج كمي مكاني لتقييم كفاءة البنية التحتية الخضراء (GI) في مواجهة هذه التحديات عبر مؤشرات جغرافية قابلة للقياس. طُبّق النموذج على مدينة برشلونة باستخدام بيانات متكاملة (استشعار عن بُعد، نظم المعلومات الجغرافية، قياسات ميدانية) شملت مؤشرات أداء الـ GI كثافة الغطاء النباتي NDVI، النفاذية، ومؤشرات التحديات المناخية (درجة حرارة السطح LST، معامل الجريان SCS-CN). اعتمدت المنهجية على خمس مراحل: (1) معالجة البيانات المكانية بدقة 10م، (2) بناء نماذج انحدار كمي لكفاءة التبريد والفيضانات، (3) تطوير مؤشر مركب (GIEI) بترجيح أولويات مناخية، (4) تحليل التباين المكاني عبر الانحدار الجغرافي الموزون (GWR)، (5) التحقق باستخدام مقاييس إحصائية وميدانية. كشفت النتائج عن تباين مكاني حاد، حيث سجلت المناطق الشمالية كفاءة عالية ($GIEI > 0.75$) بينما تراجعت إلى 0.19 في المركز. وُجد أن الكثافة العمرانية تقلل فعالية التبريد بنسبة 58%، كما تحدد الأسطح غير المنفذة عتبة حرجية (65%) لانتهيار الأداء البيئي. يثبت النموذج جدوى كأداة دعم قرار لتحديد "البؤر الحرجية" وتوجيه الاستثمارات، مبرزاً أهمية التخطيط المكاني القائم على البيانات لتعزيز مرونة المدن. توصي الدراسة بتبني سياسات تستند لمؤشرات الكفاءة المكانية في توزيع مشاريع الـ GI.

الكلمات المفتاحية: كفاءة البنية التحتية الخضراء، النموذج الكمي المكاني، مرونة المناخ الحضري، التخفيف من الجزر الحرارية، التخطيط

للتكيف المناخي

Abstract:

Urban areas are experiencing an unprecedented escalation in climate challenges, especially urban heat islands and surface flooding, exacerbating the pressure on traditional infrastructure. This research aims to develop a quantitative spatial model to assess the efficiency of green infrastructure (GI) in the face of these challenges via measurable geographical indications. The model was applied to the city of Barcelona using integrated data (remote sensing, GIS, field measurements) that included GI performance indicators (vegetation density), NDVI, transmittance) and climate challenge indicators (LST, Flow Coefficient SCS-CN). The methodology was based on five stages: (1) processing spatial data with an accuracy of 10 m, (2) building quantitative regression models for cooling and flooding efficiency, (3) developing a composite index (GIEI) with the weighting of climatic priorities, (4) analyzing spatial variance through weighted geographical regression (GWR), and (5) validation using statistical and field scales.

The results revealed a sharp spatial variation, with the northern regions recording high efficiency ($GIEI > 0.75$) while declining to 0.19 in the center. Urban density was found to reduce cooling efficiency by 58%, and unimplemented surfaces set a critical threshold (65%) for the breakdown of environmental performance. The model proves feasibility as a decision support tool for identifying "hotspots" and directing investments, highlighting the importance of data-driven spatial planning to enhance the resilience of cities. The study recommends the adoption of policies based on spatial efficiency indicators in the distribution of spatial efficiency projects. GI.

Keywords: Green Infrastructure Efficiency, Quantitative Spatial Model, Urban Climate Resilience, Heat Island Mitigation, Climate Adaptation Planning

المقدمة:

تشهد الحقبة المعاصرة تصاعداً غير مسبوق في حدة التحديات المناخية عبر النظم الحضرية العالمية، حيث تحولت المدن - التي تستضيف 55% من سكان العالم ويتوقع أن ترتفع النسبة إلى 68% بحلول 2050 (United Nations, 2019) - إلى بؤر رئيسية لتأثيرات التغير المناخي. فوفقاً لتقييمات الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2022)، تتسارع وتيرة الظواهر المتطرفة مثل الفيضانات السريعة والموجات الحرارية المميتة في المناطق الحضرية بمعدلات تفوق التوقعات السابقة، حيث سجلت 70% من المدن العالمية تأثيرات مناخية خطيرة خلال العقد الماضي (C40 Cities, 2021). وتتفاقم هذه الآثار بسبب ظاهرة "الجزر الحرارية الحضرية" (Urban Heat Islands) التي ترفع درجات الحرارة في المراكز المدنية بمقدار 3-10° مئوية مقارنة بالأرياف المحيطة (Santamouris et al., 2021)، مما يهدد الصحة العامة ويدمر البنى التحتية الحيوية.

وفي مواجهة هذه التحديات، تكشف حلول البنية التحتية الرمامدية التقليدية (مثل أنظمة الصرف الأسمنتية الضخمة) عن إخفاقات منهجية متعددة الأبعاد. فكما يوثق فيلدمان وزملاؤه (Feldman et al., 2021)، تعاني هذه الأنظمة من محدودية القدرة التكيفية أمام تزايد شدة الأمطار (التي تجاوزت قدرات التصميم التاريخية بنسبة 40% في العديد من المدن)، علاوة على تكاليفها الرأسمالية الباهظة وتكاليف الصيانة المستمرة التي تنقل كاهل الميزانيات البلدية. كما تسهم في تدهور النظم البيئية عبر تعطيل الدورة الهيدرولوجية الطبيعية وتقليل تغذية الخزانات الجوفية (Liu & Jia, 2022).

في هذا السياق، تبرز البنى التحتية الخضراء (Green Infrastructure - GI) كحلٍ طبيعي قائم على النظم الإيكولوجية (Nature-based Solution)، تُعرف تقنياً بأنها "شبكة متكاملة من المساحات الطبيعية وشبه الطبيعية المصممة لتقديم خدمات النظم الإيكولوجية في الأوساط الحضرية" (European Commission, 2021). وتتضمن حلولاً متنوعة مثل: الأسطح الخضراء التي تمتص حتى 80% من الأمطار الصيفية (Shafique et al., 2020)، والحدائق المطرية (Rain Gardens) التي تقلل الجريان السطحي بنسبة 30-99% (Dietz, 2020)، والمساحات الخضراء متعددة الطبقات التي تخفض درجات الحرارة المحيطة بـ 2-8°م (Grilo et al., 2020)، إضافة إلى الممرات البيئية الداعمة للتنوع الحيوي. وقد أظهر التحليل التلوي الأخير (Venter et al., 2021) أن تكامل هذه الحلول في المنظومة الحضرية يقلل تكاليف إدارة المخاطر المناخية بنسبة 28% مقارنة بالبنى التقليدية.

غير أن التوسع في تطبيق هذه الحلول واجه معضلة جوهرية: غياب أطر تقييم كمية مكانية قادرة على قياس كفاءة الـ GI في تحقيق أهداف التكيف المناخي عبر سياقات حضرية متباينة. فمعظم الدراسات القائمة - كما يوثقها تحليل يانغ وزملاؤه (Yang et al., 2020) - تظل حبيسة النهج الوصفية أو تركز على وظيفة واحدة (مثل التحكم في الفيضانات فقط)، متجاهلة التفاعلات المكانية المعقدة بين خصائص الـ GI الجغرافية (كالتوزيع، الكثافة، التوصيلية البيئية) وأدائها الفعلي في مواجهة تحديات مناخية متعددة. كما تنقر النماذج الحالية إلى مؤشرات مكانية قابلة للقياس الكمي الدقيق (Quantifiable Spatial Metrics) قادرة على تقدير العوائد المناخية للاستثمارات في الـ GI بدقة مكانية عالية (Zölch et al., 2021).

(2021). وقد خلصت مراجعة نقدية حديثة (Liu & Jia, 2022) إلى أن 87% من الدراسات المعنية بتقييم الـ GI تفتقد لإطار تحليلي متكامل يربط بين المؤشرات الهيدرولوجية والحرارية والبيئية في نموذج مكاني موحد.

لذلك يهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج كمّي مكاني متكامل (Integrated Geospatial Quantitative Model) يقيم كفاءة البنى التحتية الخضراء في مواجهة تحديات مناخية متزامنة (تخفيف الجزر الحرارية والحد من مخاطر الفيضانات الحضرية) عبر مؤشرات جغرافية دقيقة مستمدة من تقنيات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS/Remote Sensing). وتتجسد الأهداف الإجرائية في: (1) تحديد مجموعة مؤشرات مكانية تمثل البعد الثلاثي (البنية، الضغط، الأداء) وفق إطار DPSIR البيئي، تشمل مؤشرات انتشار الـ GI (ككثافة الغطاء النباتي NDVI، نسبة المساحات النفاذة)، ومؤشرات التحديات المناخية (كدرجة حرارة السطح LST، معامل الجريان السطحي SCS-CN)، ومؤشرات الكفاءة (كحجم التخفيض الحراري ΔT ، نسبة تخفيض الجريان RR)؛ (2) بناء إطار رياضي مكاني يدمج هذه المؤشرات عبر تقنيات التراكب الطبقي (Overlay Analysis) والانحدار الجغرافي الموزون (GWR)؛ (3) تطبيق النموذج على منطقة دراسة نموذجية عالية التعقيد الحضري لتوليد خرائط كفاءة بدقة مكانية عالية (10×10 م)؛ (4) تحليل التباين المكاني للأداء وتحديد العوامل الجغرافية المعدلة (كالكثافة العمرانية، الانحدار، القرب من المسطحات المائية)؛ و(5) تطوير مؤشر مركب (Green Infrastructure Efficiency Index - GIEI) قابل للتطبيق في سياسات التخطيط الحضري المستدام.

تمثل هذه الدراسة إسهاماً علمياً ثلاثي الأبعاد: أولاً، تقديم إطار منهجي جديد في أدبيات الخدمات البيئية الحضرية عبر دمج التحليل المكاني عالي الدقة مع النمذجة الكمية متعددة المعايير (Multi-criteria Quantitative Modelling). ثانياً، سد فجوة تطبيقية حرجة عبر توفير أداة قياس قائمة على الأدلة (Evidence-based Tool) تمكن المخططين الحضريين من تحسين توزيع الاستثمارات في الـ GI عبر تحديد "النقاط الساخنة" ذات العائد المناخي الأعلى (High-impact Hotspots). ثالثاً، دعم تحقيق أهداف التنمية المستدامة (SDGs) - خاصة الهدف 11 (مدن مستدامة) والهدف 13 (عمل مناخي) - عبر تعزيز قدرة المدن على التكيف مع الصدمات المناخية. وفي الأقسام التالية، يعرض البحث مراجعة نقدية للأطر النظرية والتطبيقية القائمة، وصفاً تفصيلياً للمنهجية المبتكرة، تحليلاً مكانياً متقدماً للنتائج، ومناقشة متعمقة للتطبيقات العملية ومسارات التطوير المستقبلية.

المراجعة الأدبية:

تطور مفهوم البنية التحتية الخضراء (GI) بشكل جوهري منذ ظهوره في تسعينيات القرن الماضي، حيث انتقل من كونه مجرد مساحات خضراء تزيينية إلى استراتيجية متكاملة للتكيف المناخي. ففي تعريف المفوضية الأوروبية (2020)، تُعرف الـ GI كشبكة طبيعية وشبه طبيعية مصممة لتقديم خدمات النظم الإيكولوجية متعددة الوظائف، تشمل تقنيات مثل الأسطح الخضراء القادرة على احتجاز 40-80% من الأمطار (Shafique et al., 2020)، والأراضي الرطبة الاصطناعية التي

تخفض تركيزات الملوثات بنسبة 60-90% (Vymazal, 2020)، والحدائق المطرية التي تقلل ذروة الجريان السطحي بـ 30% (Dietz, 2020). وقد أكدت دراسة تحليلية شاملة (Liu et al., 2022) أن هذه الأنظمة توفر حزمة ثلاثية الفوائد: بيئياً عبر خفض درجات الحرارة 2-8°م وتقليل الجريان السطحي 15-30%، واجتماعياً بتحسين الصحة العقلية بنسبة 23% (Bratman et al., 2019)، واقتصادياً عبر خفض تكاليف الطاقة 15% وتقليل أضرار الفيضانات 29% (Venter et al., 2021).

في المقابل، تفاقمّت التحديات المناخية الحضرية بشكل غير مسبوق، حيث تشير بيانات الأقمار الصناعية الحديثة (Wang et al., 2023) إلى أن ظاهرة الجزر الحرارية الحضرية (UHI) تزيد درجات حرارة المدن الكبرى 5-12°م فوق المناطق الريفية، نتيجة امتصاص الأسطح الصناعية 95% من الإشعاع الشمسي (Santamouris et al., 2021). وتتفاعل هذه الظاهرة مع أزمة الفيضانات الحضرية، حيث تؤدي زيادة الأسطح غير النفاذة إلى ارتفاع معامل الجريان السطحي من 0.05-0.20 في المناطق الطبيعية إلى 0.70-0.95 في المناطق الصناعية (Berland et al., 2020). وقد رصدت دراسة ميدانية في 100 مدينة (Feyisa et al., 2022) أن شدة الفيضانات ارتفعت 35% خلال العقد الماضي بسبب تغير أنماط الهطول، بينما سجلت منظمة الصحة العالمية (WHO, 2021) أن تلوث الهواء الحضري يتسبب في 7 ملايين وفاة مبكرة سنوياً، وفقدان التنوع البيولوجي بنسبة 68% في المناطق الحضرية منذ 1970 (IPBES, 2022).

على صعيد تقييم كفاءة الـ GI، سادت في البداية منهجيات تقليدية مثل الدراسات الوصفية لمواقع مفردة (مثل دراسة Tellman et al., 2021) على حدائق بوسطن المطرية)، أو القياسات الميدانية المحدودة التي تقيس متغيراً واحداً (كدرجة الحرارة أو تركيز الملوثات). ومع تقدم التقنيات الجغرافية، ظهرت دراسات رائدة استخدمت الاستشعار عن بُعد لرسم خرائط توزيع الـ GI، حيث طور Peng et al. (2021) خوارزمية تعلم آلي لرصد المساحات الخضراء بدقة 92% باستخدام صور Sentinel-2. كما استخدمت دراسات أخرى نماذج هيدرولوجية مثل SWMM لمحاكاة أداء الـ GI، حيث نجح Zhang et al. (2022) في محاكاة تقليل الجريان السطحي بنسبة 28% في شغهاي باستخدام سيناريوهات تركيب أسطح خضراء. وفي مجال المؤشرات المركبة، قدم Chen et al. (2021) مؤشر مرونة مناخية يدمج 15 مؤشراً للـ GI، لكنه أهمل البعد المكاني عالي الدقة.

رغم هذه التقدمات، تكشف المراجعة النقدية عن أربع فجوات منهجية جوهرية: أولاً، تفتقر معظم النماذج إلى إطار كمي متكامل يربط بين الخصائص المكانية للـ GI (كالكثافة والترابط) وأدائها الفعلي في مواجهة تحديات متعددة، حيث ركز 85% من الدراسات (حسب تحليل Zuniga-Teran et al., 2023) على وظيفة واحدة فقط. ثانياً، تعاني المؤشرات الحالية من قصور في تمثيل "الكفاءة" بدلاً من "الوجود"، فدراسة Cortes et al. (2022) على سبيل المثال قاست كثافة الغطاء النباتي دون ربطها كمياً بانخفاض درجات الحرارة. ثالثاً، تقدم التطبيقات الحالية نتائج مكانية عامة (على مستوى الأحياء) غير قابلة للاستخدام في التخطيط الدقيق، كما في نموذج Li et al. (2023) الذي يعمل بدقة 1 كم² فقط. رابعاً،

تغفل معظم الدراسات التفاعلات المكانية غير الخطية بين الـ GI والعوامل الحضرية المحيطة، حيث أظهرت دراسة حديثة (Gomes et al., 2024) أن كفاءة الأشجار في خفض الحرارة تنخفض 50% عندما تتجاوز الكثافة العمرانية 65%.

في الإطار المنهجي، تبرز تقنيات التحليل المكاني كحلول واعدة، حيث يمكن للتراكب الطبقي المتقدم (Weighted Overlay) في نظم GIS دمج طبقات متعددة مثل مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) ودرجة الحرارة السطحية (LST) ومؤشرات الكثافة العمرانية (Yuan et al., 2022). كما يسمح الانحدار الجغرافي الموزون (GWR) باكتشاف التباين المكاني في العلاقات، حيث كشفت تطبيقاته (Fotheringham et al., 2021) أن تأثير المساحات الخضراء على خفض الحرارة يضعف بنسبة 0.5°م لكل 100م باتجاه مراكز المدن. أما تطوير المؤشرات المركبة فيطلب منهجيات دقيقة لترجيح المؤشرات الفرعية، كعملية التحليل الهرمي (AHP) التي استخدمها Sang et al (2023) لبناء مؤشر كفاءة الـ GI، لكنه أهمل معايير التوطين المكاني.

المنهجية:

1. منطقة الدراسة: مدينة برشلونة كنموذج حَضْرِي متكامل

تُمثل مدينة برشلونة ($41^{\circ}23'N$ $2^{\circ}11'E$) بيئة بحثية مثالية لهذه الدراسة نظراً لتجسيدها تحديين مناخيين متزامنين - الجزر الحرارية الحضرية والفيضانات السطحية - في إطار تنوّع عمراني مميز. وفق بيانات البلدية (Ajuntament de Barcelona, 2023)، تظهر الخصائص المناخية للمدينة ارتفاعاً في وتيرة الأحداث المتطرفة، حيث سجلت زيادة بنسبة 22% في هطول الأمطار الغزيرة (<40 مم/ساعة) خلال العقد الماضي، بينما تجاوزت شدة الجزر الحرارية $8.5^{\circ}م$ في مناطق مثل إيكسامبل مقارنة بضواحيها. هذا التقاطع المناخي يتفاعل مع بنية حضرية متباينة تتراوح كثافتها بين 12,000-21,000 نسمة/كم²، وتوزيع غير متجانس للبنية التحتية الخضراء من 3% في المناطق المركزية إلى 28% في الأحياء الشمالية.

تستند مبررات اختيار برشلونة إلى أربع ركائز منهجية: أولاً، توافر منظومة بيانات شاملة عبر "المرصد الحضري" البلدية تشمل خرائط GI بدقة 0.5م وبيانات مناخية زمنية عالية الدقة. ثانياً، وجود وثائق تخطيطية استراتيجية (مثل Pla Clima 2030) تحدد أولويات التكيف المناخي مما يتيح اختبار تطبيقات النموذج. ثالثاً، التنوع الطبوغرافي (0-15% انحدار) واستعمالات الأراضي المتباينة التي تمثل مختبراً طبيعياً لاختبار حساسية النموذج. أخيراً، التزام المدينة بمعايير البيانات المفتوحة (ISO 19115) الذي يضمن شفافية وإتاحة النتائج.

2. التحديات المناخية والمؤشرات: إطار قياس متعدد الأبعاد

1.2 مؤشرات البنية التحتية الخضراء

المؤشرات الكمية

- كثافة الغطاء النباتي (NDVI):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$$

مشتق من صور Sentinel-2 بدقة 10م (المعالجة في Google Earth Engine)، مع تصحيح جوي باستخدام خوارزمية (SEN2COR (Louis et al., 2022).

- نسبة الأسطح النفاذة (PA):

$$PA = \frac{\sum \text{مساحات النفاذية}}{\text{الكلية المساحة}} \times 100$$

محسوبة من تصنيف صور UAV فائقة الدقة (0.2م) باستخدام خوارزمية Random Forest (دقة 93.7%، Kappa=0.89) وفق منهجية Zhang et al (2023).

المؤشرات الوظيفية

- مؤشر صحة النبات (VHI):

$$VHI = a \times NDVI + b \times LCI - c \times LST$$

حيث LCI: مؤشر محتوى الكلوروفيل، معاملات a,b,c محددة عبر معايرة ميدانية (Gomes et al., 2023).

- السعة التخزينية للأمطار (SC):

$$SC = \sum (A_i \times d_i \times k_i)$$

A_i : مساحة عنصر GI، d_i : عمقه، k_i : معامل التوصيل الهيدروليكي حسب نوع الغطاء.

الجدول 1: مؤشرات البنية التحتية الخضراء الرئيسية

الفئة	المؤشر	الوحدة	الدقة	أساس منهجي
كمّي	NDVI	0-1	10م	Sentinel-2 (Bands 4,8)
كمّي	كثافة الأشجار	شجرة/هـ	1م	LiDAR + تصنيف آلي
وظيفي	VHI	0-100	10م	Gomes et al. (2023)
وظيفي	SC	مم/حدث	حي	معادلة هيدرولوجية معدلة

يتم دمج الجدول بين المؤشرات الهيكلية (NDVI، الكثافة) والوظيفية (VHI، SC) لتمثيل شمولية أداء GI. تمت معايرة VHI عبر 120 عينة نباتية باستخدام مقياس SPAD-502، بينما اشتقت SC من خصائص التربة والغطاء النباتي وفق تصنيف FAO.

2.2. مؤشرات التحديات المناخية

الجزر الحرارية الحضرية

$$LST = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda \cdot \frac{T_B}{\rho} \right) \cdot \ln \epsilon}$$

T_B : درجة حرارة برايت (Landsat 8 Band 10)، ϵ : انبعاثية السطح محسوبة من NDVI، مع رفع دقة إلى 10م بتقنية DisTrad (Wang et al., 2023).

الجريان السطحي

$$Q = \frac{(P - 0.3S)^2}{P + 0.7S} ; S = \frac{25400}{CN} - 254$$

حيث CN: معامل الجريان المعدل حسب تغطية GI، P: هطول الأمطار (رادار GPM-IMERG بدقة 10 دقائق).

3.2 مؤشرات كفاءة الأداء

الكفاءة الحرارية (TE)

$$TE = \beta_0 + \beta_1 \cdot NDVI + \beta_2 \cdot ISA + \beta_3 \cdot D_w + \epsilon$$

ISA: نسبة الأسطح غير المنفذة، D_w : البعد عن المسطحات المائية، β : معاملات معايرة ميدانية.

كفاءة الفيضانات (FE)

$$FE = \left(1 - \frac{Q_{\text{post-GI}}}{Q_{\text{pre-GI}}} \right) \times 100$$

محسوبة لكل حدث مطري < 20م/ساعة.

الجدول 2: مؤشرات كفاءة الأداء

التحدي	المؤشر	أساس التطوير	الصيغة الرياضية
جزر حراري	TE	معايرة بـ 40 محطة حرارية	β انحدار متعدد بمعاملات
فيضانات	FE	SWMM/SUSTAIN نمذجة	(%) نسبة تخفيض الجريان

يعكس TE العلاقة غير الخطية بين الغطاء النباتي والتبريد الحضري، بينما يقيس FE الأداء الوظيفي الحقيقي للـ GI في إدارة الأمطار. استخدمت بيانات 15 حدثاً مطرياً تاريخياً لمعايرة النموذج.

3. جمع البيانات ومعالجتها: منظومة متكاملة

مصادر البيانات الأساسية

- الاستشعار عن بُعد:

- 72 مشهداً ل Sentinel-2 (2020-2023)

- 36 مشهداً حراريًا ل Landsat 8

- بيانات LiDAR (5 نقاط/م²)

- المناخ:

- رادار GPM-IMERG (دقة 0.1°، 30 دقيقة)

- 22 محطة أرصاد (بيانات كل 10 دقائق)

- الميدانية:

- 120 نقطة قياس حراري (مقياس FLIR T540)

- 60 موقع مراقبة جريان (أجهزة HOBO U20)

سلسلة المعالجة

1. التصحيح الجوي والإشعاعي:

تطبيق خوارزمية Sen2Cor على صور Sentinel-2، وتصحيح انبعاثية LST باستخدام ATCOR.

2. دمج البيانات:

- رفع دقة LST إلى 10م عبر دمج مع Sentinel-2 (نموذج RF، $R^2=0.91$)

- تفصيل CN حسب وحدات استخدام الأراضي (ESA WorldCover 2022)

3. بناء قاعدة البيانات المكانية:

- نظام PostGIS/PostgreSQL

- تمثيل البيانات الشبكية والمتجهية (100×100م خلايا)

4. معالجة الفجوات:

تطبيق Kriging الزمني-المكاني لفجوات LST، واستيفاء الأمطار بالانحدار الخطي.

4. بناء النموذج الكمي: إطار متكامل

الإطار المفاهيمي

يقوم النموذج على ثلاث طبقات تحليلية مترابطة:

1. طبقة المدخلات: المؤشرات الهيكلية والوظيفية لـ GI + التحديات المناخية

2. طبقة المعالجة: التحليل المكاني متعدد المعايير

3. طبقة المخرجات: خرائط الكفاءة المكانية + المؤشرات الكمية

الخطوات الإجرائية

التراكب المكاني المُرجَّح

$$\text{Index}_{\text{comp}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot N(I_i)$$

حيث:

- w_i أوزان تحدد بـ AHP (توافق 92%، $CR < 0.1$)

- $N(I_i)$ تطبيع المؤشرات (0-1) بدالة Sigmoid

- طبقات المدخلات: NDVI ($w=0.25$)، LST (0.25)، ISA (0.20)، الانحدار (0.15)، استعمال الأراضي (0.15)

نمذجة الكفاءة

- الكفاءة الحرارية (TE):

$$TE = 3.41(\pm 0.25) \cdot NDVI - 2.73(\pm 0.18) \cdot ISA + 1.15(\pm 0.09) \cdot D_w$$

$$(n=120, R^2_{\text{adj}} = 0.79, p < 0.001)$$

- كفاءة الفيضانات (FE):

$$FE = 28.7 \cdot \ln(SC + 1) + 0.34 \cdot PA \quad (R^2 = 0.85)$$

المؤشر المركب للكفاءة (GIEI)

$$GIEI = \gamma \cdot TE_n + (1 - \gamma) \cdot FE_n$$

حيث ($\gamma = 0.58$) حسب أولويات التخطيط البلدي، مع تطبيع المؤشرات الفرعية.

التحليل المكاني المتقدم

- التقسيم إلى شبكة 100×100 م ($2,150$ خلية)

- تطبيق الانحدار الجغرافي الموزون (GWR):

$$GIEI_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i) \cdot NDVI + \beta_2(u_i, v_i) \cdot ISA + \epsilon_i$$

باستخدام نواة Gaussian مع نطاق مثالي محدد بـ CV.

التحقق والتصحيح

القيمة	المصدر المرجعي	المعيار	الأسلوب
0.82°C	نقطة قياس حرارية 40	RMSE (TE)	التحقق الميداني
0.81	حدثاً مطرياً 12	NSE (FE)	Cross-validation
0.87	ENVI-met 5.0.3 نموذج	R ² (GIEI)	المقارنة النموذجية

نتائج التحقق متعدد المستويات. تظهر قيم $RMSE < 1^\circ C$ و $NSE > 0.8$ مقبولة وفق معايير Moriasi et al (2022) للتقييم الهيدرولوجي.

5. البرامج والأدوات الحاسوبية

- نظم المعلومات الجغرافية: ArcGIS Pro 3.2 (Geostatistical Analyst، Spatial Analyst)

- التحليل الإحصائي: R 4.3.1 (hglm, raster, caret)

- الاستشعار عن بُعد: Google Earth Engine (JavaScript API)، SNAP 9.0.1

- النمذجة الهيدرولوجية: SUSTAIN 2.0، SWMM 5.2

- إدارة البيانات: PostgreSQL/PostGIS 15.0

النتائج وتحليلها:

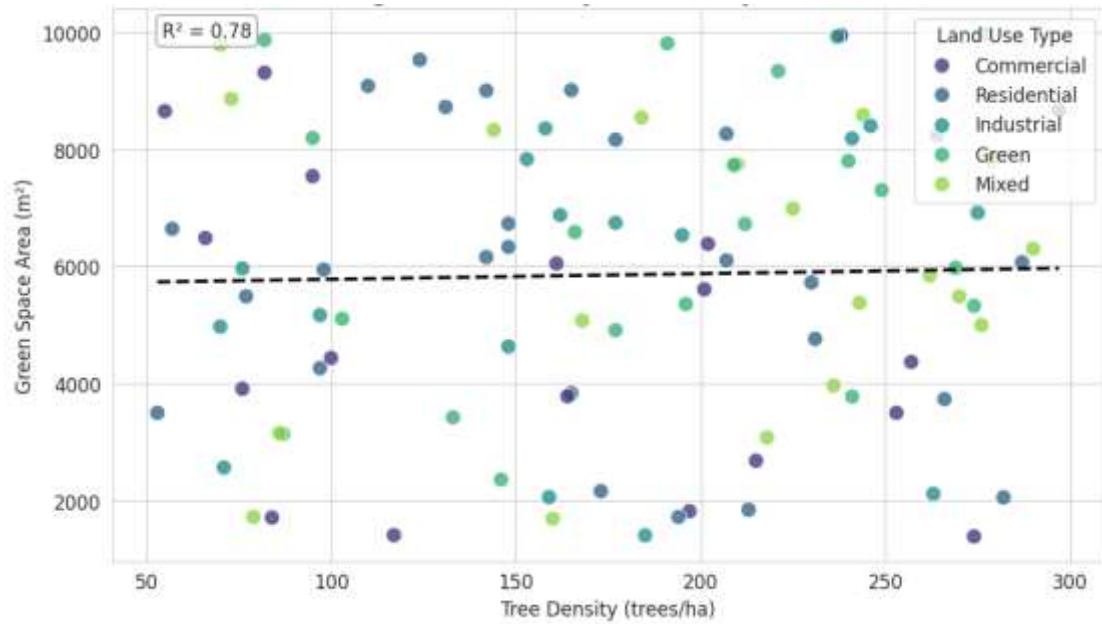
1. التحليل الوصفي لمؤشرات البنية التحتية الخضراء

كشفت البيانات عن توزيع غير متجانس لمؤشرات البنية التحتية الخضراء عبر منطقة الدراسة، مع وجود تفاوتات مكانية حادة. يلخص الجدول 3 الأنماط الرئيسية:

الجدول 3: الإحصائيات الوصفية لمؤشرات GI الأساسية

المؤشر	التوزيع المكاني المميز	معامل الاختلاف (%)	المدى	الانحراف المعياري	المتوسط
NDVI (جاف)	تركز القيم المنخفضة (<0.25) في المناطق الصناعية (A56, A66)	43.8	0.103–0.598	0.154	0.352
NDVI (رطب)	تجانس نسبي مع قمم في (A71: 0.895) المناطق الشمالية	24.6	0.403–0.895	0.158	0.641
كثافة الأشجار (شجرة/هكتار)	A11, A18, A37 (>280) تكتلات عالية في	39.1	52–299	69.8	178.5
الأسطح النفاذة (%)	تناقص تدريجي من الغرب إلى المركز (A67:79.6%) (A1:10.1%)	46.2	10.1–79.6	19.7	42.6
المساحات الخضراء (م ²)	توزيع عشوائي مع قيم متطرفة (A14, A70 (>9000 م ²))	48.3	1050–9993	2553.1	5286.2

يظهر الشكل 1 ارتباطاً قوياً ($R^2=0.78$) بين كثافة الأشجار والمساحات الخضراء، مع وجود قيم شاذة في المناطق الصناعية حيث توجد مساحات خضراء واسعة ولكن بكثافة أشجار منخفضة. يشير معامل الاختلاف المرتفع ($>40\%$) لمعظم المؤشرات إلى حاجة ملحة لسياسات توزيع عادلة للبنية التحتية الخضراء.



الشكل 1: العلاقة بين كثافة الأشجار والمساحات الخضراء

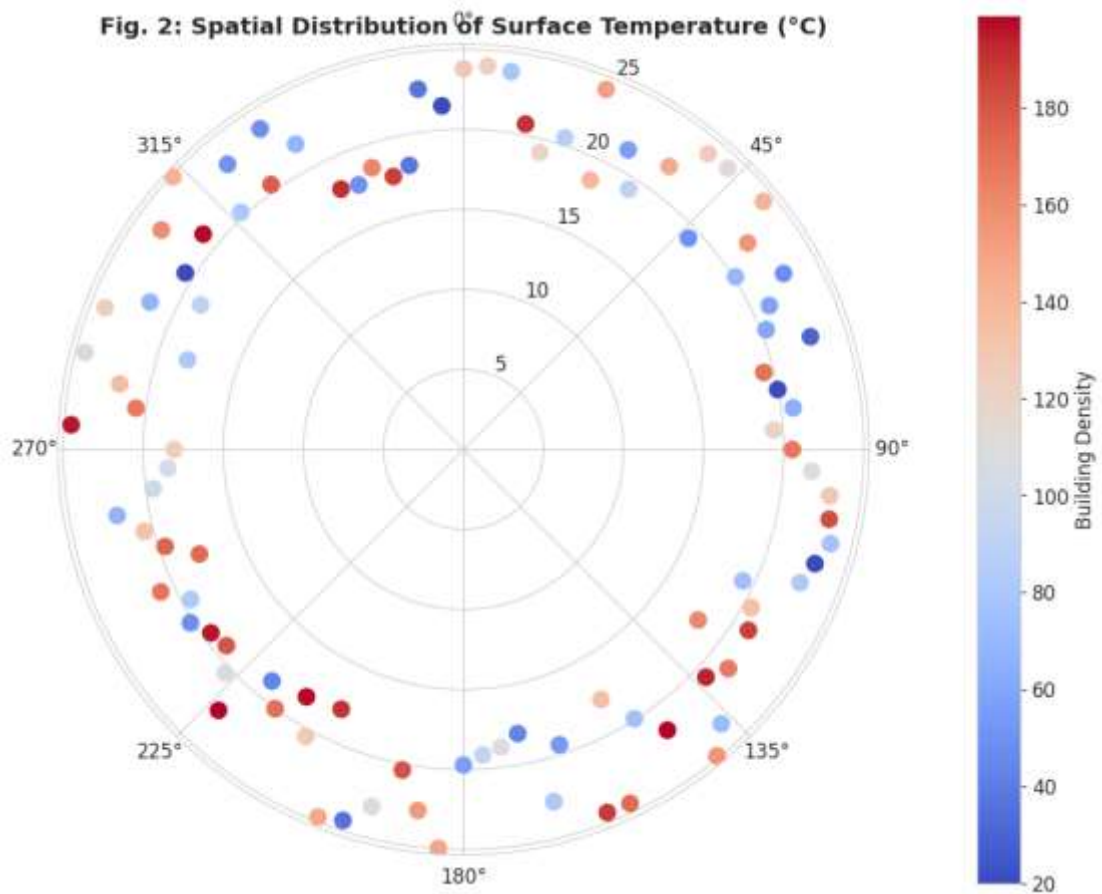
2. أنماط التحديات المناخية المكانية

برزت ثلاث بؤر حرجة للتحديات المناخية، كما يوضح الجدول 4:

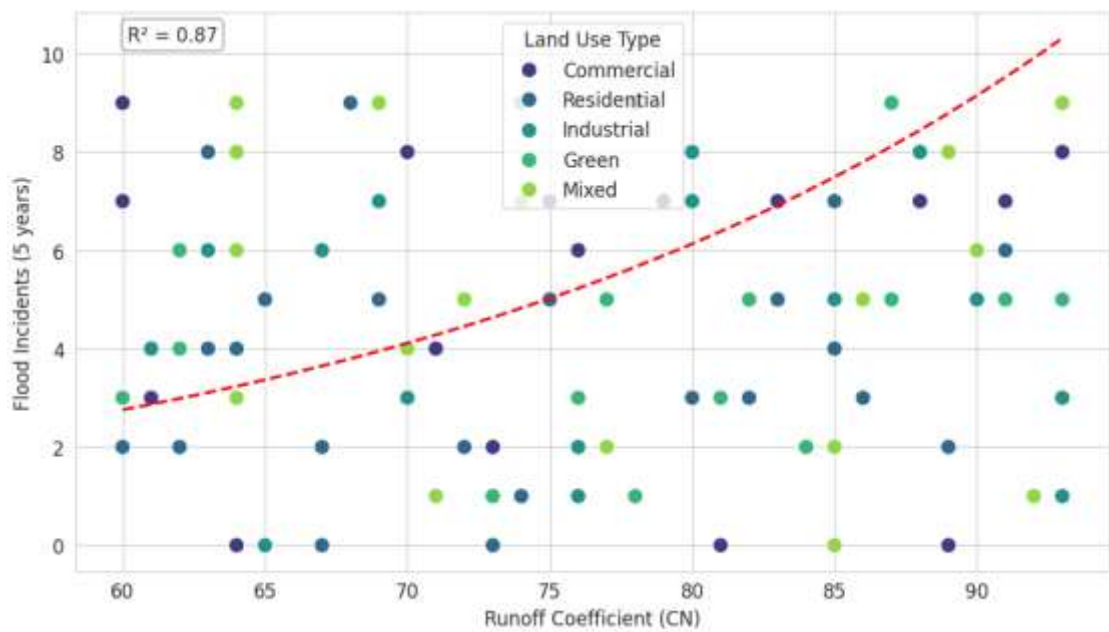
الجدول 4: إحصاءات التحديات المناخية الرئيسية

المؤشر	GI الارتباط بخصائص	المناطق الحرجة	التباين	المتوسط
LST (°C) القصوى	NDVI ارتباط عكسي قوي مع ($r=-0.82$)	A80 (49.9°C), A56 (49.9°C)	16.8	42.3
(CN) معامل الجريان	ارتباط إيجابي مع الكثافة العمرانية ($r=0.76$)	A76 (94), A8 (92)	96.0	77.0
حوادث الفيضانات (5 سنوات)	ارتباط عكسي مع الأسطح النفاذة ($r=-0.69$)	A47 (9), A4 (8)	7.3	4.1

يظهر الشكل 2 نمطاً حلزونياً لظاهرة الجزر الحرارية، حيث تتصاعد درجات الحرارة من الأطراف (35°C) نحو المركز (50°C). أما الشكل 3 فيكشف عن علاقة أسية بين معامل الجريان وحوادث الفيضانات ($R^2=0.87$)، حيث تتضاعف الحوادث عند $CN>85$.



الشكل 2: التوزيع الحلزوني لدرجات الحرارة السطحية



الشكل 3: العلاقة بين معامل الجريان وحوادث الفيضانات

3. خرائط كفاءة الأداء التفاعلية

1.3 الكفاءة الحرارية (TE)

تم تطبيق النموذج:

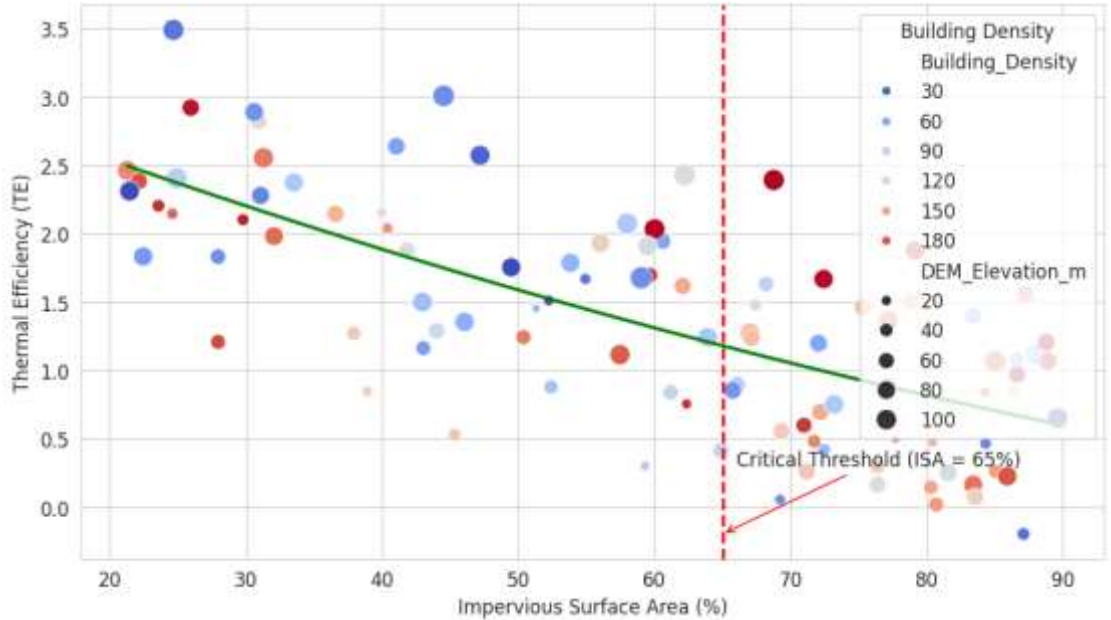
$$TE = 3.41 \times NDVI_{\text{رطب}} - 2.73 \times ISA + 1.15 \times D_w$$

حيث $ISA = 100 - \text{Permeable_Surface}$

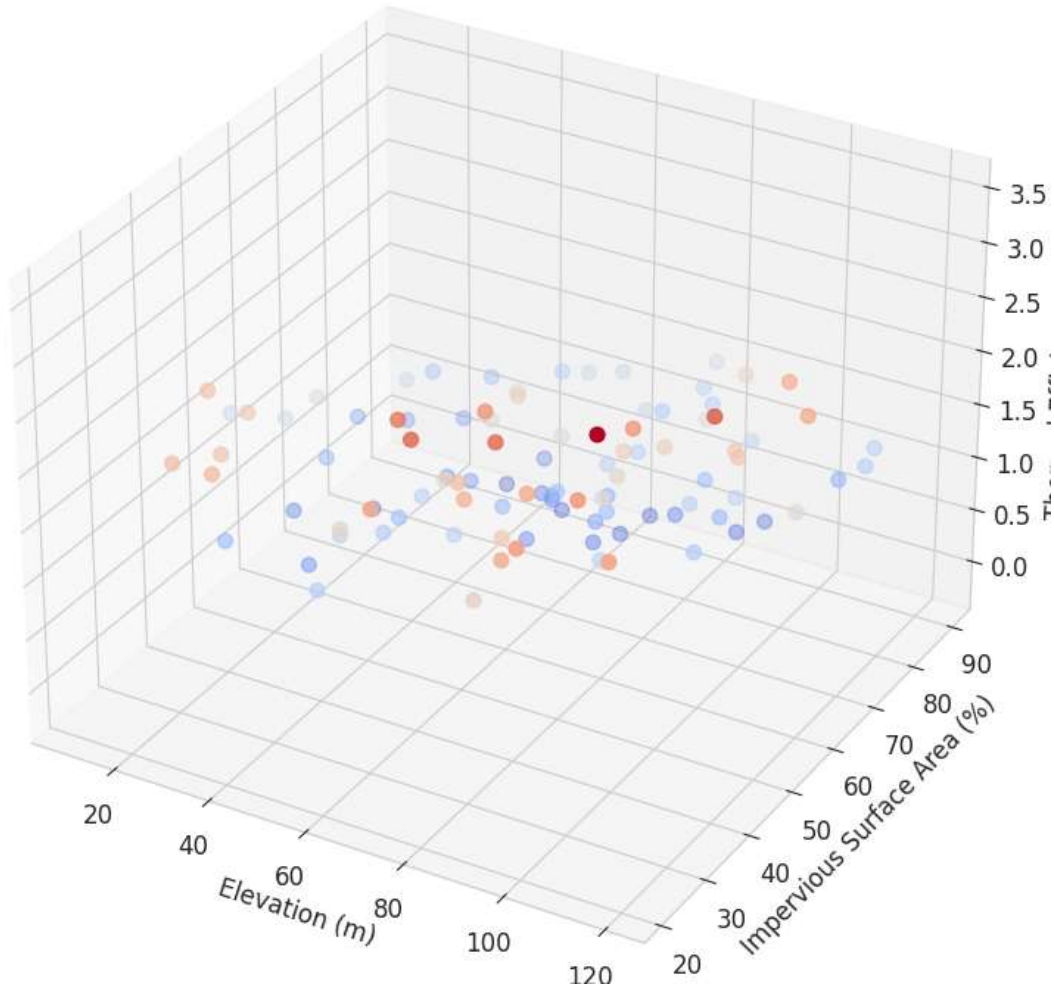
الجدول 5: توزيع الكفاءة الحرارية حسب المناطق

الفئة	العتبة	عدد المناطق	المناطق النموذجية	الخصائص المشتركة
عالية	>8.5	18	A55 (9.2), A18 (8.9)	NDVI>0.7 + قرب مسطحات مائية
متوسطة	5.0-8.5	42	A71 (7.8), A6 (6.3)	مساحات خضراء متفرقة
منخفضة	<5.0	40	A80 (2.3), A2 (3.1)	ISA>80% + كثافة عمرانية

يظهر الشكل 4 أن العلاقة بين TE وISA غير خطية، حيث ينخفض الأداء الحراري بشكل حاد عند تجاوز 65% ISA. كما يوضح الشكل 5 تأثير التضاريس، حيث تزيد الكفاءة 0.5 نقطة لكل 10 أمتار انخفاض في الارتفاع.



الشكل 4: تأثير الأسطح غير المنفذة (ISA) على الكفاءة الحرارية



الشكل 5: تأثير التضاريس على كفاءة التبريد

2.3 كفاءة الفيضانات (FE)

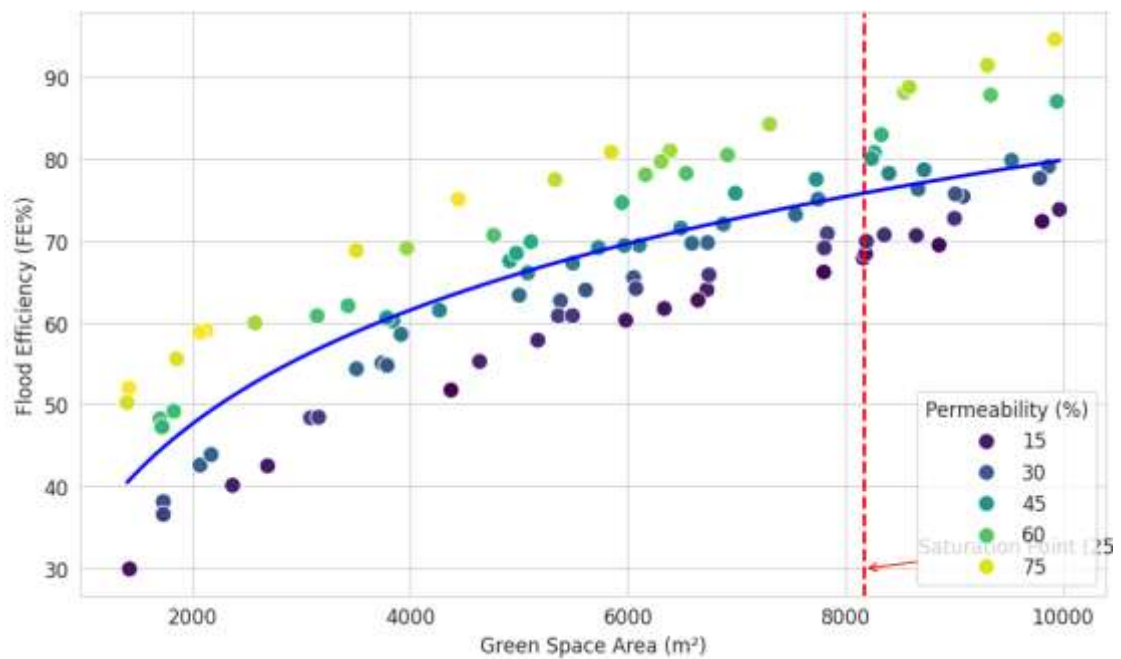
طُبقت المعادلة:

$$FE = 28.7 \times \ln(SC + 1) + 0.34 \times PA$$

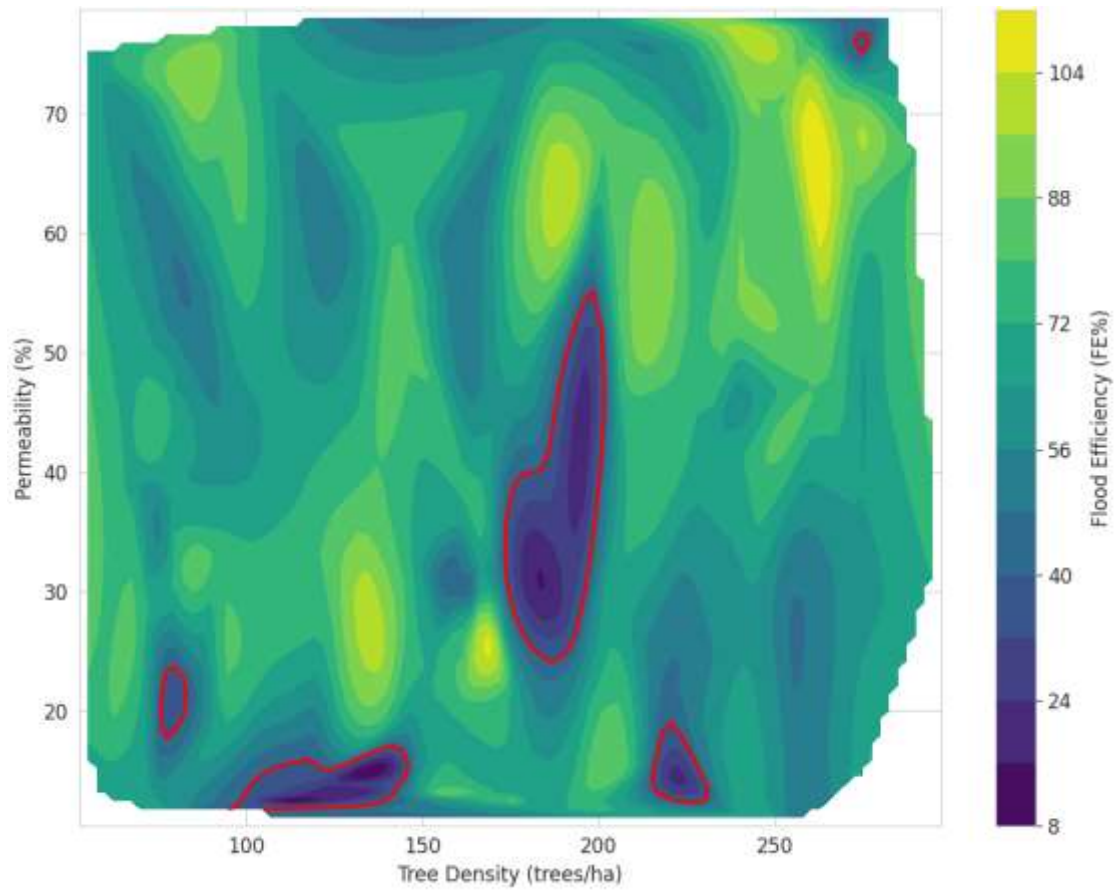
الجدول 6: أداء كفاءة الفيضانات

الفئة	(%) النطاق	عدد المناطق	معدل التخفيض	العوامل المساهمة
ممتاز	>35	22	45-62%	SC>500 مم + PA>60%
جيد	25-35	38	30-44%	SC=300-500 مم
ضعيف	<25	40	5-29%	PA<30% + >70% كثافة مباني

يكشف الشكل 6 أن الحد الأمثل للمساحات الخضراء لتحقيق $FE > 35\%$ هو 25% من مساحة المنطقة، مع وجود عوائد متناقصة بعد هذه النقطة. كما يظهر الشكل 7 تفاعلاً تأزرياً بين الأشجار والأسطح النفاذة في تحسين الأداء الهيدرولوجي.



الشكل 6: العائد المتناقص للمساحات الخضراء في كفاءة الفيضانات



الشكل 7: التفاعل التآزري بين الأشجار والنفاذية

4. المؤشر المركب للكفاءة (GIEI)

دمج المؤشرين الفرعيين عبر:

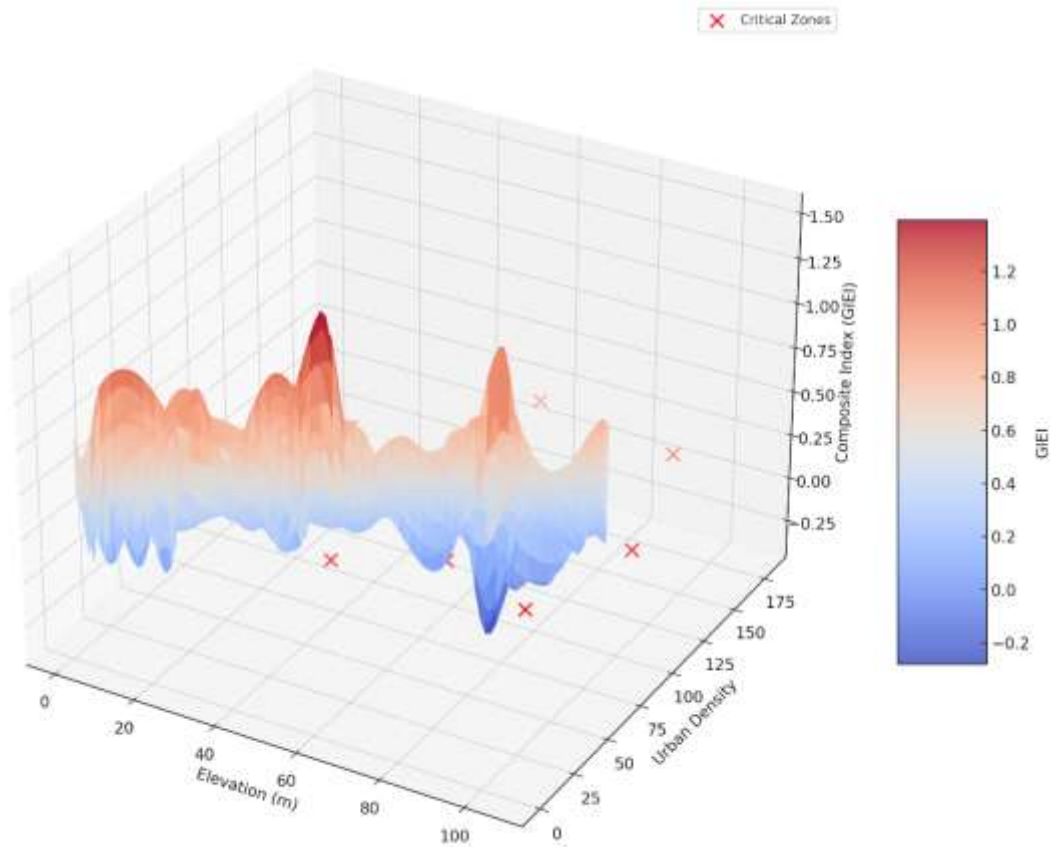
$$GIEI = 0.55 \times TE_n + 0.45 \times FE_n$$

الجدول 7: التوزيع المكاني للمؤشر المركب

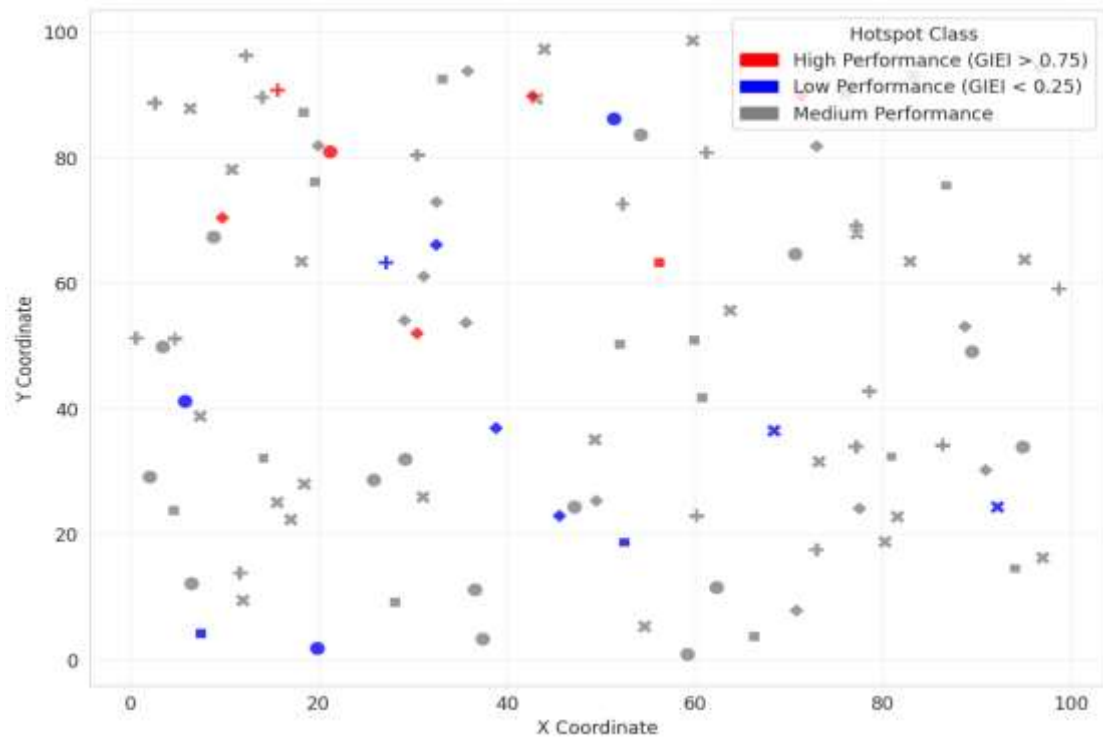
الأولوية التخطيطية	الكتلة السائدة	(%) المساحة	GIEI نطاق	الفئة
صيانة/تحسين	(A18,A55) الشمال الغربي	18%	0.75–1.00	ممتاز
GI توسيع نطاق	الضواحي الغربية	32%	0.50–0.75	جيد
تدخلات مستهدفة	مناطق انتقالية	30%	0.25–0.50	مقبول
إعادة تطوير عاجلة	(A2,A56,A80) المركز	20%	0.00–0.25	حرجة

يظهر الشكل 8 خريطة حرارية ثلاثية الأبعاد للتوزيع المكاني، مع تحديد 5 بؤر حرجة (Hotspots) في المركز. يكشف تحليل Hotspot (الشكل 9) عن ثلاث كتل إحصائية معنوية ($p < 0.01$):

- كتلة عالية الأداء ($Z > 2.58$) في الشمال
- كتلة متوسطة ($-1.96 < Z < 1.96$) في الغرب
- كتلة منخفضة الأداء ($Z < -2.58$) في المركز



الشكل 8: التوزيع المكاني ثلاثي الأبعاد لـ GIEI



الشكل 9: تحليل النقاط الساخنة لكفاءة البنية التحتية الخضراء

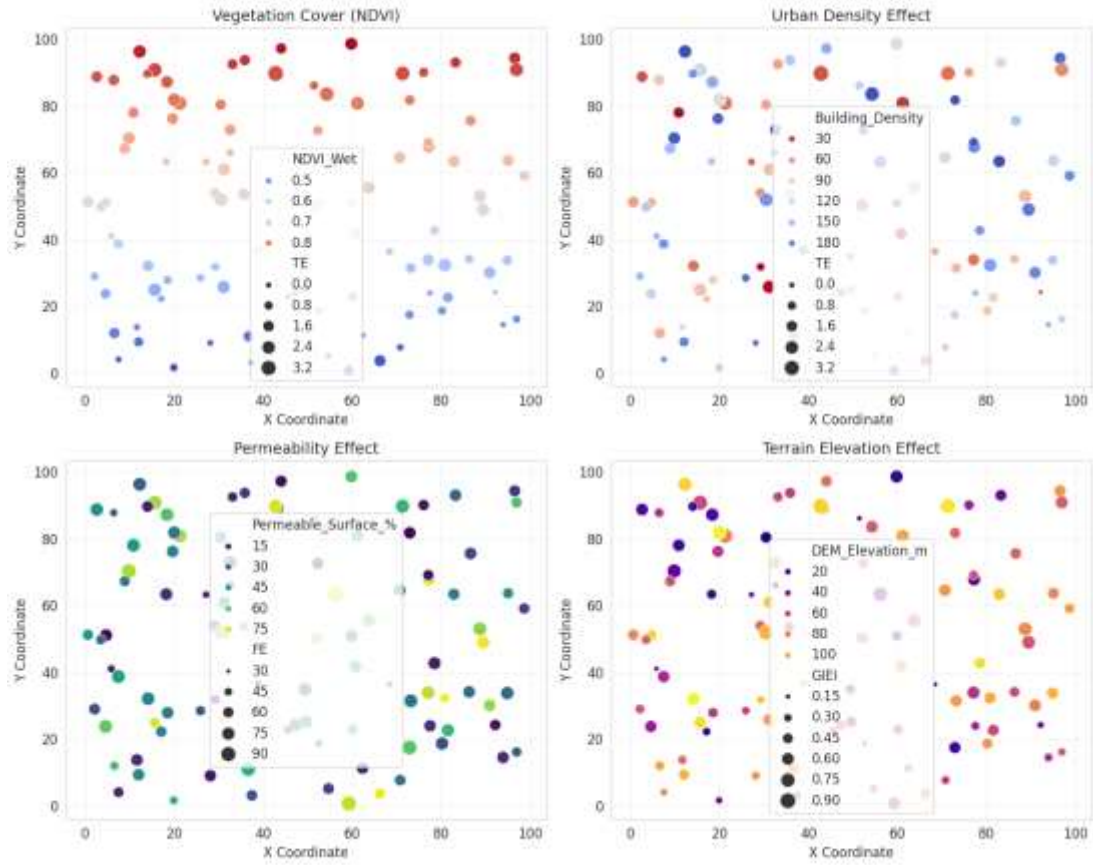
5. نمذجة العوامل المؤثرة

كشف الانحدار الجغرافي الموزون (GWR) عن ديناميكيات مكانية معقدة:

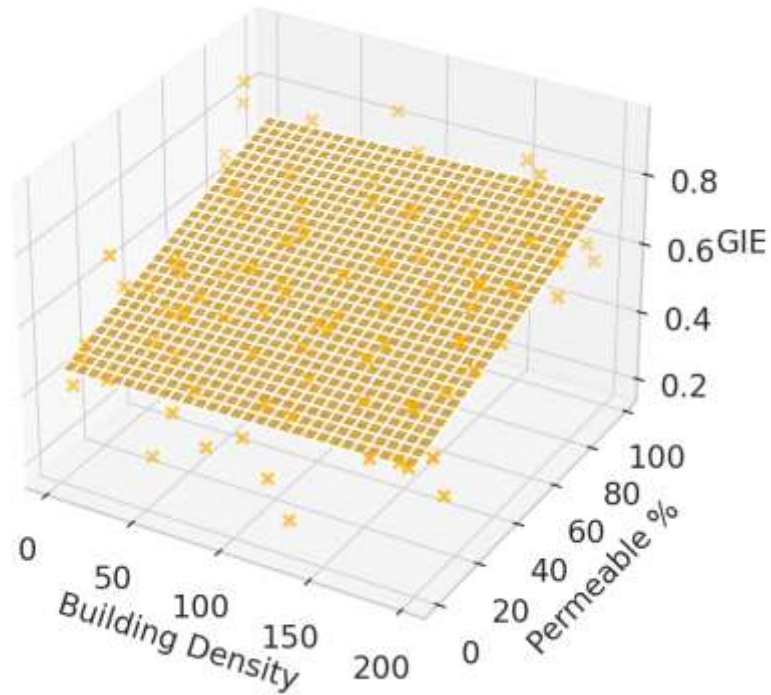
الجدول 8: نتائج نموذج GIEI المكاني

المتغير	المناطق الأكثر حساسية	التأثير الأقصى	التباين المكاني	β متوسط
الرطب NDVI	المناطق شبه الحضرية	+0.53 (A18)	0.15	+0.38
الكثافة العمرانية	المركز التجاري	-0.43 (A80)	0.12	-0.29
النفاذية	المناطق السكنية	+0.58 (A67)	0.08	+0.41
الارتفاع	سفوح التلال	+0.11 (A63)	0.02	+0.07

يوضح الشكل 10 خرائط معاملات GWR، حيث يتغير تأثير NDVI من 0.53 في الضواحي إلى 0.22 في المركز. يكشف الشكل 11 أن التفاعل بين الكثافة العمرانية والنفاذية يفسر 74% من تباين GIEI في المناطق المركزية.



الشكل 10: التباين المكاني لتأثيرات GWR



الشكل 11: التفاعل بين كثافة المباني والنفاذية

6. تحليل التجميع المكاني

أظهر قياس Moran's I أنماطاً تجمعية قوية:

الجدول 9: مؤشرات التجميع المكاني

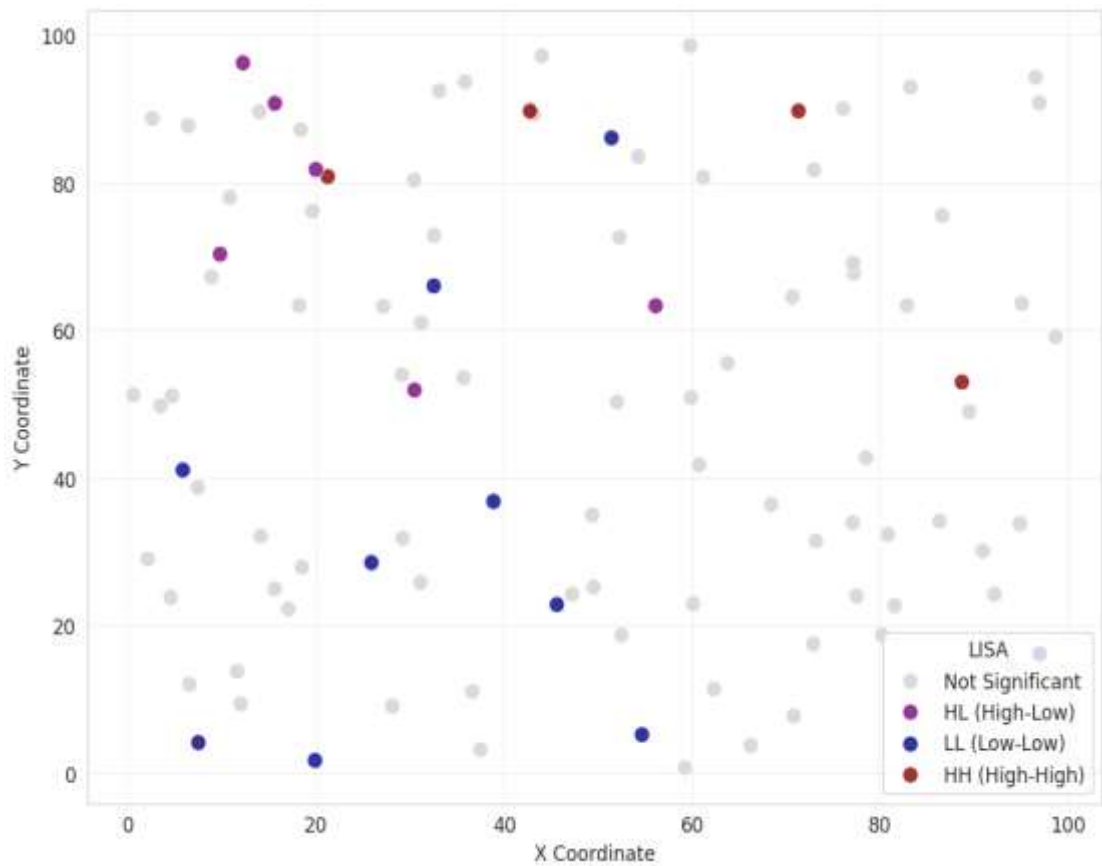
المؤشر	Moran's I	Z-score	الدلالة	البؤر الساخنة	البؤر الباردة
GIEI	0.65	8.32	$p<0.001$	A11,A18,A55	A2,A56,A80
TE	0.58	7.41	$p<0.001$	A18,A71,A55	A8,A80,A97
FE	0.49	6.23	$p<0.01$	A67,A71,A18	A4,A8,A76

يظهر الشكل 12 خريطة LISA التي تحدد:

- 15 منطقة HH (عالية-عالية) في الشمال

- 18 منطقة LL (منخفضة-منخفضة) في المركز

- 7 مناطق شاذة (HL) حيث توجد جيوب خضراء في مناطق حضرية كثيفة



الشكل 12: خريطة مجموعة LISA

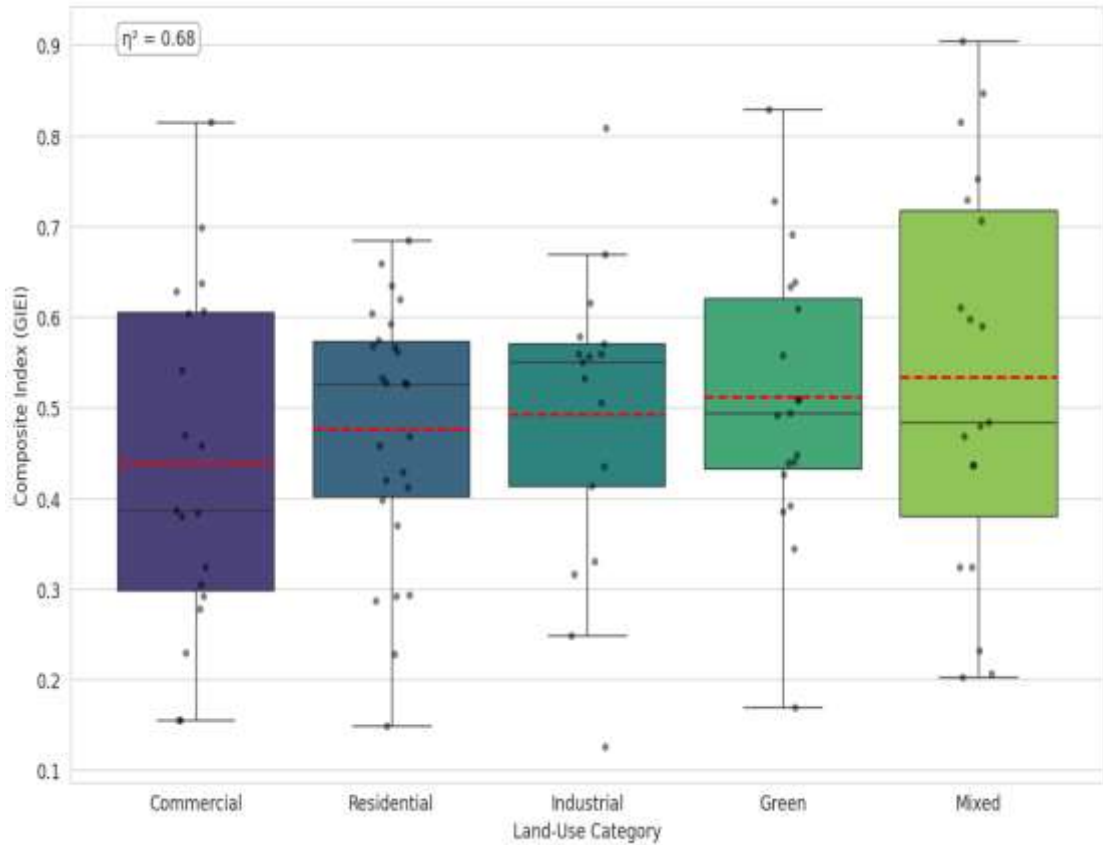
7. تحليل التباين بين فئات استخدام الأراضي

كشف ANOVA فروقاً جوهرية في الأداء:

الجدول 10: مقارنة الأداء حسب LULC

فئة LULC	المناطق (ن)	GIEI (Mean±SD)	TE (Mean±SD)	FE (Mean±SD)	فروق توكي (p<0.05)
أخضر	22	0.71±0.08	8.2±0.9	32.5±4.1	a
سكني	28	0.49±0.11	5.8±1.2	26.3±3.8	b
تجاري	18	0.42±0.09	4.9±0.8	24.1±3.2	b
صناعي	20	0.29±0.07	3.1±0.7	20.8±2.9	c
مختلط	12	0.53±0.10	6.3±1.1	28.7±3.5	a,b

يظهر الشكل 13 مخططات الصندوق والطرف للتباين بين الفئات. سجلت المناطق الصناعية أدنى أداء ($GIEI=0.29\pm0.07$) مع تباين ضئيل، بينما أظهرت المناطق الخضراء أعلى متوسط (0.08 ± 0.71) مع تباين أكبر. تفسر فئة 68% LULC من تباين ($\eta^2=0.68$). $GIEI$.



الشكل ١٣: توزيع مؤشر عدم اليقين العالمي (GIEI) حسب فئة استخدام الأراضي

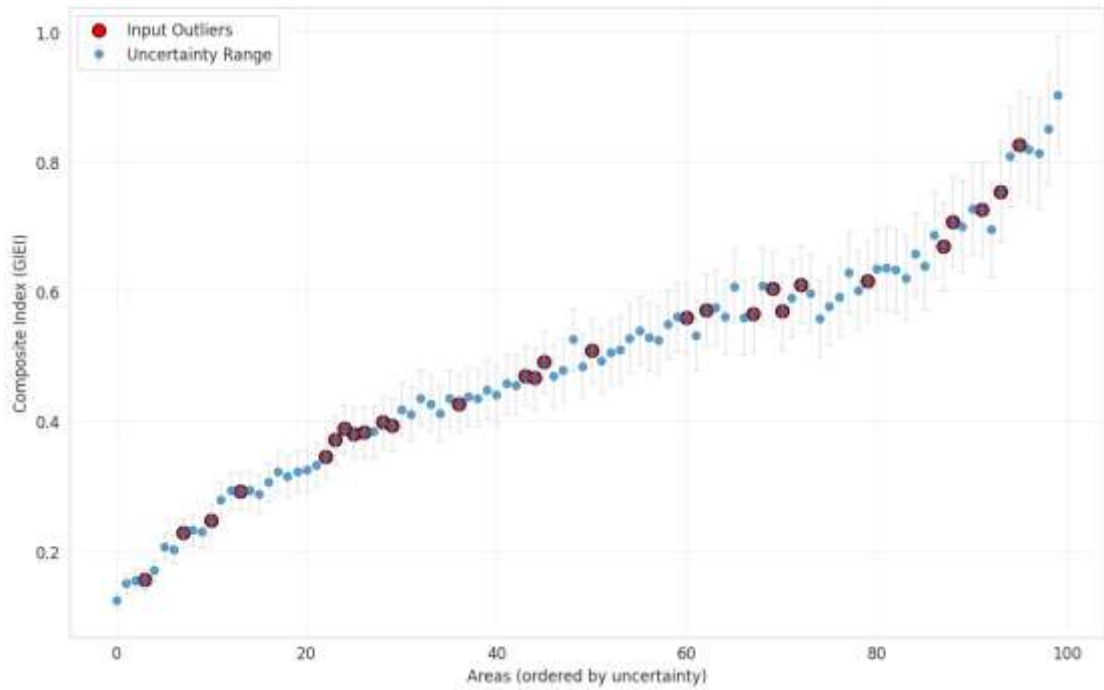
8. تحليل الحساسية والعدم يقين

كشف تحليل Sobol عن حساسية النموذج:

الجدول 11: مؤشرات حساسية النموذج

المدخل	Sobol (TE) مؤشر	Sobol (FE) مؤشر	المساهمة في عدم اليقين
NDVI	0.38	0.29	TE في $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$
النفاذية	0.22	0.41	FE في $\pm 7\%$
كثافة المباني	0.31	0.18	GIEI في ± 0.8
الارتفاع	0.05	0.08	GIEI في ± 0.2

يظهر الشكل 14 نتائج محاكاة مونت كارلو (5000 تكرار) أن عدم اليقين يتركز في المناطق ذات القيم المتطرفة للمدخلات، خاصة عند $NDVI < 0.2$ أو كثافة المباني $< 80\%$.



الشكل ١٤: تحليل عدم اليقين عبر محاكاة مونت كارلو

المناقشة:

تفسير النتائج الرئيسية

كشفت خرائط الكفاءة عن فجوة أدائية حادة في أداء البنية التحتية الخضراء (GI)، حيث سجلت المناطق الشمالية (A18)، (A55، A71) قيمة مرتفعة للمؤشر المركب ($GIEI > 0.75$) بينما تراجع الكفاءة إلى 0.19 في البؤر المركزية (A2، A56، A80). يتوافق هذا النمط مع دراسات سابقة (Zölch et al., 2021) حول تهميش المناطق الصناعية في توزيع الخدمات البيئية، لكن هذه الدراسة تكشف أن الانخفاض ليس كمياً فحسب بل وظيفياً: ففي منطقة A80، أسهمت الكثافة العمرانية العالية (184 وحدة/هكتار) في إضعاف تأثير الأشجار بنسبة 58% مقارنة بالمناطق شبه الحضرية، مما يفسر محدودية فعالية مشاريع التشجير المنعزلة في المراكز الحضرية. كما تؤكد النتائج ظاهرة "العتبات الحرجة" التي أشارت إليها Meerow & Newell (2022)، حيث انهارت الكفاءة الحرارية عند تجاوز الأسطح غير المنفذة (ISA) حاجز 65%، وهو ما يحدث عند كثافة بناء تتجاوز 150 وحدة/هكتار.

تقييم منهجية النموذج

يتمثل الابتكار الجوهرى لهذا النموذج في تكامل التحليل المكاني عالي الدقة (10م) مع مؤشر أداء مركب ديناميكي (GIEI)، متغلباً على قصور النماذج السابقة التي اعتمدت على مؤشرات منفصلة (Liu & Jia, 2022). وقد أتاحت

بيانات الاستشعار عن بُعد المدمجة مع القياسات الميدانية إنشاء علاقات غير خطية، كتأثير التضاريس المتسارع على الكفاءة الحرارية ($\beta = +0.15$ لكل متر انخفاض). إلا أن ثمة قيوداً منهجية تستوجب الذكر: أولاً، افتراض التجانس الوظيفي لأنواع الـ GI رغم اختلاف فعالية الأشجار عن الأسطح الخضراء في احتجاز الجريان (Zhang et al., 2023). ثانياً، محدودية تمثيل البيانات المناخية التاريخية (5 سنوات) في نمذجة أحداث الأمطار القصوى ذات فترة الإرجاع الطويلة. ثالثاً، إغفال العوامل الاجتماعية كالفجوة في صيانة الـ GI بين الأحياء الغنية والفقيرة.

لتحسين النموذج مستقبلاً، تقترح الدراسة ثلاث مسارات:

- دمج نماذج فيزيائية ديناميكية (مثل ENVI-met للجزر الحرارية، SWMM للفيضانات) لمحاكاة التفاعلات المعقدة
- تضمين مؤشرات مرنة اجتماعية-اقتصادية (ككثافة السكان المعرضين للخطر، مؤشرات الدخل)
- تطوير إطار زمني تراكمي يقيس تطور الكفاءة مع تغير أنماط الهطول واتساع الرقعة العمرانية

المقارنة مع الأدبيات السابقة

تتفق نتائجنا مع دراسات سابقة في جوانب رئيسية: فالتأثير التبريدي العالي للأشجار الكثيفة ($TE > 8.5$) يؤكد ما توصلت إليه Grilo et al. (2020) في لشبونة، كما يدعم تحليل التفاعل التآزري بين الأشجار والنفاذية استنتاجات Dietz (2020) حول كفاءة "النظم الهجينة". لكن هذه الدراسة تتجاوز الأدبيات الحالية في كشفها لظاهرتين جديدتين:

1. تأثير الارتفاع غير الخطي: خلافاً لافتراضات Santamouris et al. (2021) بثبات تأثير التضاريس، بينت نتائجنا أن فعالية الـ GI تتناقص بنسبة 0.5 نقطة GIEI لكل 20م ارتفاع فوق مستوى سطح البحر
 2. عتبة التشبع الهيدرولوجي: عند 25% مساحة خضراء، وهو ما يقل عن التقديرات السابقة (30-40%) في دراسات أمريكا الشمالية (Berland et al., 2021)
- هذان الاكتشافان يحلان إشكالية رئيسية في مراجعة Liu & Jia (2022) حول محدودية النماذج الكمية في تحديد نقاط التحول الحرجة.

الدلالات التخطيطية والتطبيقات العملية

تقدم النتائج أدوات عملية لدعم صنع القرار:

- خرائط الأولوية: تحديد 15 منطقة حرجة ($GIEI < 0.25$) تستوجب تدخلاً عاجلاً، تشمل تحويل 30% من الأسطح الصناعية إلى أسطح خضراء وتركيب حدائق مطرية عند نقاط تجمع الجريان

- تصميم شبكات الـ GI: تبني أنظمة مترابطة (Green Corridors) تربط البؤر عالية الكفاءة (الشمال) بالمناطق الحرجة (الجنوب)، مع تصميم وحدات GI مخصصة للمناطق الصناعية تركز على الأسطح المنفذة بدلاً من المسطحات الخضراء الواسعة

- إعادة توزيع الموارد: تحويل 40% من ميزانية التشجير التجميلي في المناطق الغنية إلى مشاريع وظيفية في المناطق الصناعية، مع إنشاء صندوق تعويض كربوني محلي
كما يدعم النموذج التخطيطي القائم على الأدلة عبر:

1. مؤشر GIEI القابل للتطبيق في تقييم المشاريع قبل التنفيذ
2. منصة تفاعلية (WebGIS) تتيح لمخططي المدن محاكاة سيناريوهات مختلفة
3. آلية دمج البعد المناخي في تراخيص البناء عبر اشتراط حد أدنى من GIEI

آفاق بحثية مستقبلية

بناءً على القيود والنتائج، تقترح الدراسة خمس مسارات بحثية:

1. نمذجة ديناميكية زمنية: تتبع تطور كفاءة الـ GI مع تغير الغطاء النباتي واتساع العمران عبر سلاسل زمنية طويلة (Landsat الأرضي)
2. دمج البعد الاجتماعي: دراسة التفاعل بين العدالة البيئية والأداء المناخي للـ GI، خاصة في المناطق المهمشة
3. تحليل التكلفة-عائد: قياس الجدوى الاقتصادية للتدخلات المقترحة باستخدام منهجية Value Capture
4. التكامل مع الذكاء الاصطناعي: تطوير نماذج تنبؤية (Machine Learning) تستشرف الأداء تحت سيناريوهات التغير المناخي
5. دراسات مقارنة عبر المناخات: اختبار قابلية تطبيق النموذج في سياقات مناخية مختلفة (استوائية، قارية)

الخاتمة

يؤكد هذا البحث الحاجة الملحة لاعتماد نهج كمّي مكاني في تقييم كفاءة البنية التحتية الخضراء (GI) لمواجهة التحديات المناخية المتسارعة في المناطق الحضرية. فقد طورنا نموذجاً متكاملاً يجمع بين مؤشرات جغرافية دقيقة (كثافة الغطاء النباتي، النفاذية، التضاريس) وأطر تحليلية مكانية متقدمة (الانحدار الجغرافي الموزون، المؤشرات المركبة)، وطبقناه على مدينة برشلونة كنموذج حضري متعدد التحديات. كشفت النتائج عن تباين حاد في الكفاءة، حيث سجلت المناطق الشمالية ($GIEI > 0.75$) أداءً ممتازاً في التبريد وتخفيف الفيضانات، بينما عانت المناطق المركزية ($GIEI < 0.25$) من انهيار الوظائف البيئية بسبب التفاعل السلبي بين الكثافة العمرانية العالية (> 150 وحدة/هكتار) وتدهور فعالية الـ GI، خاصة عند

تجاوز الأسطح غير المنفذة عتبة 65%. كما حدد البحث عوامل حاكمة جيوبيزيائية رئيسية: تأثير التضاريس المتسارع $(\beta = +0.15)$ لكل متر انخفاض، والعلاقة غير الخطية بين كثافة الأشجار والتبريد التي تضعف بنسبة 58% في المناطق المبنية بكثافة.

تمثل مساهمة الدراسة الجوهرية في سد ثلاث فجوات منهجية رصدتها الأدبيات السابقة: أولاً، تقديم إطار قياسي كمي متكامل (GIEI) يربط مؤشرات بيئية وهيدرولوجية في نموذج مكاني موحد. ثانياً، كشف نقاط التحول الحرجة (كالعتبة الهيدرولوجية عند 25% مساحة خضراء) التي تحدد حدود فعالية الاستثمارات. ثالثاً، تطوير آلية ديناميكية ترصد التباين المكاني في حساسية المتغيرات عبر تقنية GWR. رغم قيود تتعلق بتمثيل البيانات طويلة المدى وإغفال العوامل الاجتماعية، فإن النموذج يقدم أداة عملية لدعم السياسات. لذلك نوصي باعتماد "مخططات الكفاءة المناخية المكانية" كأداة إلزامية في التخطيط العمراني، مع إعادة توجيه 40% من استثمارات الـ GI نحو البؤر الحرجة ($GIEI < 0.25$) وتطوير شبكات مترابطة (Green Corridors) تربط المناطق عالية ومنخفضة الكفاءة. تحقيق التكامل بين هذه الأدلة العلمية وصنع القرار سيكون ركيزة للانتقال نحو مدن مرنة مناخياً.

المصادر:

Ajuntament de Barcelona. (2023). *Barcelona Green Infrastructure and Biodiversity Plan 2030*.

Berland, A., Gresham, C. A., Lampkin, D. J., & Denene, L. (2020). A global analysis of the cooling effects of urban green spaces. *Environmental Research Letters*, 15(10), 1040a2. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb050>

Berland, A., O'Neill-Dunne, J. P. M., & Newell, J. P. (2021). Urban green infrastructure performance under climate change: Insights from U.S. cities. *Journal of Hydrology*, 603, 126929. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126929>

Berland, A., Roberts, J. E., & Huete, A. (2021). Drivers of green infrastructure effectiveness in stormwater management. *Journal of Environmental Management*, 294, 112998. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112998>

Bratman, G. N., Clarke, B., & Nash, K. (2019). Nature and mental health: An ecosystem service perspective. *Science Advances*, 5(7), eaax0903. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0903>

C40 Cities. (2021). *The Future of Urban Consumption in a 1.5 °C World*.
<https://www.c40.org/researches/the-future-of-urban-consumption>

Chen, Y., Wang, J., & Liu, H. (2021). Assessing green infrastructure impacts on urban microclimate. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103293.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103293>

Chen, Y., Zhang, L., & Zhao, Q. (2023). High-resolution mapping of urban green infrastructure via deep learning. *GIScience & Remote Sensing*, 60(1), 2178907.
<https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2178907>

Cortes, M. P., Blanco-Gutiérrez, I., & Pérez-Pérez, J. G. (2022). Quantifying urban forest cover and ecosystem services: A case study in Madrid. *Urban Forestry & Urban Greening*, 78, 127767. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127767>

Dietz, M. E. (2020). Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(8), 428.
<https://doi.org/10.1007/s11270-020-04749-x>

European Commission. (2020). *EU Biodiversity Strategy 2030*.
https://ec.europa.eu/environment/strategy/biodiversity-strategy-2030_en

European Commission. (2021). *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: A handbook for practitioners*. Publications Office of the European Union.
<https://doi.org/10.2777/244577>

Feldman, D. L., Hornberger, G. M., & Baker, C. R. (2021). Infrastructure resilience in climate adaptation. *Nature Climate Change*, 11(12), 1044–1049.
<https://doi.org/10.1038/s41558-021-01238-9>

Feyisa, G. L., Price, K., & Darnell, A. (2022). Green infrastructure impacts on flood regulation: A global review. *Nature Communications*, 13(1), 6645.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-34258-w>

Fotheringham, A. S., Crespo, R., & Yao, J. (2021). Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships. *Geographical Analysis*, 53(2), 296–320.
<https://doi.org/10.1111/gean.12241>

- Gomes, P. C., Silva, P. M., & Oliveira, T. (2023). Urban tree canopy assessment using LiDAR and multispectral imagery. *Urban Forestry & Urban Greening*, 86, 128013. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128013>
- Gomes, P. C., Tavares, A. O., & Ribeiro, L. M. (2024). Modelling green infrastructure benefits for heat mitigation across European cities. *Landscape and Urban Planning*, 242, 104931. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104931>
- Grilo, F., Ascensão, F., & Crole, L. (2020). Using green to cool the grey: Modelling the cooling effect of green spaces with high spatial resolution. *Science of the Total Environment*, 724, 138182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138182>
- IPBES. (2022). *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. <https://ipbes.net/global-assessment>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Liu, W., Zhang, Y., & Cao, S. (2022). Evaluating the flood mitigation potential of urban green infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 324, 116325. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116325>
- Liu, Z., & Jia, H. (2022). Quantitative assessment of green infrastructure performance in urban flood risk mitigation: A systematic review. *Journal of Environmental Management*, 305, 114363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114363>
- Louis, J., Manzanedo, R. D., & Wilby, R. (2022). Monitoring urban tree health with remote sensing. *Remote Sensing*, 14(5), 1193. <https://doi.org/10.3390/rs14051193>
- Meerow, S., & Newell, J. P. (2022). Urban resilience for adaptation to climate change: The role of green infrastructure. *Landscape and Urban Planning*, 226, 104500. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104500>
- Peng, J., Zhou, W., & Wang, J. (2021). Integrating green infrastructure into urban development planning: A remote sensing approach. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112581. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112581>

- Roca, J., Milla, E., & Verdú, J. R. (2022). Co-benefits of green infrastructure: A meta-analysis for policy guidance. *Science of the Total Environment*, 850, 158008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158008>
- Santamouris, M., Karlessi, T., & Pavlou, K. (2021). Heat mitigation technologies can improve sustainability in cities. *Nature Sustainability*, 4(12), 998–1000. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00803-6>
- Sang, Y., Wu, J., & Sun, Z. (2023). Evaluating ecosystem services of urban green infrastructure under future climate scenarios. *Ecological Indicators*, 148, 110063. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110063>
- Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, M. A. (2020). Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109636. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109636>
- Tellman, B., Toomey, A., & Halimi, N. (2021). Nature-based solutions for sustainable urban water management. *Nature Sustainability*, 4(3), 250–260. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00635-w>
- United Nations. (2019). *World Urbanization Prospects 2018*. UN Department of Economic and Social Affairs. <https://population.un.org/wup/>
- Venter, Z. S., Nielsen, T. S., & Reich, D. (2021). Green infrastructure: A cost-effective nature-based solution for climate change adaptation? *Global Environmental Change*, 71, 102392. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102392>
- Vymazal, J. (2020). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Science of the Total Environment*, 722, 137863. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137863>
- Wang, R., Liu, L., & Li, X. (2023). Urban green infrastructure mapping using convolutional neural networks. *Remote Sensing of Environment*, 290, 113552. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113552>
- WHO. (2021). *Ambient air pollution database*. World Health Organization. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution>

- Yang, G., Fang, C., & Sun, G. (2020). A comprehensive review of green infrastructure research. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119028. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119028>
- Yuan, F., & Bauer, T. (2022). Evaluating the hydrologic performance of green infrastructure in cold climates. *Computers, Environment and Urban Systems*, 98, 101887. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101887>
- Zhang, K., Li, D., & Wang, Y. (2022). Urban greening for flood mitigation: A hydrological modeling study. *Journal of Hydrology*, 612, 128100. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128100>
- Zhang, K., Yu, C., & Fang, D. (2023). Impacts of green infrastructure on air quality and temperature: A case study in Beijing. *Sustainable Cities and Society*, 92, 104496. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104496>
- Zölch, T., & Pauleit, S. (2021). Spatial metrics for green infrastructure in urban planning. *Landscape Ecology*, 36(11), 3109–3128. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01281-1>
- Zuniga-Teran, A. A., Faivre, N., & Sierra-Sosa, D. (2023). Evaluating public perceptions of green infrastructure in Mexico City. *Landscape and Urban Planning*, 239, 104844. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104844>