

**النهذجة المكانية للبنية التحتية الخضراء الحضرية؛
لتعزيز وظيفة الاتصال بالطبيعة في المدينة المنورة**

د. أروى عبدالعزيز سالم الصاعدي

دكتوراه من قسم الجغرافيا بجامعة الملك سعود

د. محمد سعد المقرري

قسم الجغرافيا جامعة الملك سعود

Abstract

Planning urban green infrastructure (UGI) with a focus on connecting to nature is of utmost importance for enhancing biodiversity, urban climate resilience, improving air quality, and overall quality of life in urban areas. This study aimed to analyze the spatial variation of nature connection and the spatial planning of urban green infrastructure (UGI) in AL Madinah AL Munawarah based on the function of nature connection and to illustrate the priority level of (UGI) according to 5 levels. This was achieved using big data in remote sensing in the Google Earth Engine (GEE) platform to extract indicators that were relied upon as planning criteria, namely (NDVI), (EVI), and (VHI). Integrated with Geographic Information Systems (GIS) through the application of models (MGWR), (GISP), and (MCDA).

The study concluded a general decrease in the quality of green surfaces in AL Madinah AL Munawarah, where neighborhoods with high-quality green surfaces are few and do not exceed 5% of the total neighborhoods. Additionally, sites with the highest priority level for (UGI) constitute 52% of the city's area. The study recommended conducting scenario-based spatial modeling to assess the potential impacts of various development scenarios on the distribution of green infrastructure and ecosystem services. It also advised implementing The Green Infrastructure Spatial Planning Model (GISP) techniques through Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) modeling to determine intervention priorities for (UGI) based on multiple criteria. **Keywords:** Urban Green Infrastructure, Enhancing the function of connecting with nature, Green Roofs, AL Madinah AL Munawarah.

النمذجة المكانية للبنية التحتية الخضراء الحضرية؛ لتعزيز وظيفة الاتصال بالطبيعة في المدينة المنورة

د. أروى عبدالعزيز سالم الصاعدي

دكتوراه من قسم الجغرافيا بجامعة الملك سعود

د. محمد سعد المقرري

قسم الجغرافيا جامعة الملك سعود

المستخلص

يعد تخطيط البنية التحتية الخضراء الحضرية Urban Green Infrastructure (UGI) مع التركيز على الاتصال بالطبيعة أمراً بالغ الأهمية لتعزيز التنوع البيولوجي ومرونة المناخ الحضري وتحسين جودة الهواء ونوعية الحياة بشكل عام في المدن الحضرية. هدفت هذه الدراسة إلى تحليل التباين المكاني للاتصال بالطبيعة، والتخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء الحضرية في المدينة المنورة بحسب وظيفة الاتصال بالطبيعة وتوضيح مستوى الأولوية بـ (UGI) وفق 5 مستويات. وذلك من خلال البيانات الضخمة في الاستشعار عن بعد في الخدمة السحابية Google Earth Engine (GEE) باستخراج المؤشرات التي تم الاعتماد عليها كمعايير تخطيطية وهي (NDVI) و (EVI) و (VHI). وبالتكامل مع (GIS) بتطبيق النموذج (MGWR) ونموذج التخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء Green Infrastructure Spatial Planning (GISP) و (MCDA).

وخلصت الدراسة إلى انخفاض جودة الأسطح الخضراء في المدينة المنورة بشكل عام؛ حيث أن الأحياء ذات الجودة المرتفعة بهذه الأسطح قليلة ولا تتجاوز 5% من إجمالي الأحياء، كما أن المواقع ذات أعلى مستوى من الأولوية بـ (UGI) تُشكل 52% من مساحة المدينة. وأوصت الدراسة بإجراء النمذجة المكانية لتقييم التأثيرات المحتملة لسيناريوهات التنمية المختلفة على توزيع البنية التحتية الخضراء وخدمات النظام البيئي. وتنفيذ تقنيات نموذج التخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء من خلال نموذج تحليل القرار متعدد المعايير لتحديد أولويات تدخلات (UGI) بناءً على معايير متعددة.

الكلمات المفتاحية: البنية التحتية الخضراء الحضرية، تعزيز وظيفة الاتصال بالطبيعة، الأسطح الخضراء، المدينة المنورة.

إ- مدخل الدراسة

إ-أ المقدمة

يعد التحضر إحدى العمليات المجتمعية الرئيسية في القرن الحادي والعشرين (Veerkamp et al, 2023, P. 1)، ويفرض هذا التحضر بصمة بيئية كبيرة على الأرض، تتسبب في تغييرات أساسية في استخدام الأراضي؛ ونمط المناظر الطبيعية؛ وهيكلة ووظيفة النظام البيئي. مما يؤدي إلى اندثار المناظر الطبيعية؛ وتدهور الأراضي؛ وفقدان التنوع البيولوجي؛ وإنشاء جزر حرارية حضرية؛ وزيادة انبعاث غازات الاحتباس الحراري؛ وتدهور التربة (Pakzad & Osmond, 2015, P.1). ومن المتوقع أن يؤدي كل من التحضر وتغير المناخ إلى تفاقم العديد من المشاكل الصحية البشرية الرئيسية (Osterbrock, 2023, P. 1). ونتيجة لذلك ظهر مفهوم البنية التحتية الخضراء الحضرية، وهي تختلف عن التخطيط التقليدي للمساحات المفتوحة من حيث أنها تتناول قضايا مثل الشبكات الإيكولوجية والاستدامة؛ والتكيف مع تغير المناخ والتخفيف من آثاره؛ وكذلك تخطيط المناظر الطبيعية والمساحات المفتوحة؛ بطريقة استراتيجية وتكاملية. فهي بالأساس تركز على الحفاظ على الطبيعة وتطوير الإسكان وسياسة النمو الحضري والبنية التحتية الرمادية بمنظومة متكاملة (Hansen et al, 2017, P. 13). وبالتالي تتعدد وظائفها ومكوناتها بناءً على الدور الذي ينبغي أن تقوم به.

وبالتالي تهدف الدراسة إلى وضع منهجية مناسبة لاحتياجات المخططين لتحديد المواقع ذات الأولوية بالبنية التحتية الخضراء بحسب جودة الأسطح الخضراء وترتيب درجات هذه الأولوية على مستوى منطقة الدراسة. وذلك من خلال نموذج الانحدار متعدد النطاقات الجغرافي الموزون Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR) ونموذج التخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء

Model Green Infrastructure Spatial Planning (GISP) والذي يوفر أداة مرنة لتسهيل العملية من خلال تفعيل نهج البنية التحتية الخضراء الذي يسعى إلى توجيه التخطيط المكاني نحو الإدارة المتكاملة لاستخدام الأراضي. حيث يتم تحقيق إمكانات خدمات النظام البيئي متعددة الوظائف من خلال تعزيز التكامل بين النظام الإيكولوجي والنظم

الاجتماعية. (Lennon & Scott, 2014, p.574) وذلك باستخدام تحليل القرار متعدد المعايير Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). فتمودج (GISP) يعتمد على تحليل القرار متعدد المعايير بالاعتماد على نظم المعلومات الجغرافية بواسطة (3) معايير تحقق جودة الأسطح الخضراء هي المؤشرات: الغطاء النباتي (NDVI) والغطاء النباتي المحسن (EVI) وصحة الغطاء النباتي (الجفاف) (VHI) ومن ثم تحديد أولويات مواقع البنية الخضراء كنتيجة لدمج هذه الوظائف.

إ-ب مشكلة الدراسة

رغم الترويج للبنية التحتية الخضراء بناءً على تعدد وظائفها لأنها تُوصف بتعددية الوظائف نظراً للخدمات العديدة التي توفرها، إلا أنه غالباً ما يتم بحثها وتنفيذها من منظور فائدة واحدة؛ كسهولة الوصول مثلاً. فنحن نفتقر إلى نماذج التخطيط المتكاملة التي تعمل على تقييم أوجه التكامل بين الفوائد الاجتماعية والبيئية للبنية التحتية الخضراء. (Meerow & Newell, 2017, P.63) وهذا يمثل مشكلة لأن فوائد البنية التحتية الخضراء محلية للغاية، وبالتالي فإن اتخاذ القرارات بتحديد المواقع لها تأثير على العدالة البيئية والاجتماعية المحلية.

ورغم أهمية تخطيط (UGI) بناءً على وظائفها لتحقيق المرونة الحضرية والتي تشير إلى قدرة المدن على التكيف والتعامل مع التحديات والمتغيرات المختلفة التي تواجهها، مثل النمو السكاني، والتغيرات البيئية. إلا أن هذا الأمر لا يتم التركيز عليه من أصحاب القرار أو الباحثين والدراسات العلمية سواءً محلياً أو إقليمياً في المملكة العربية السعودية أو المدينة المنورة وحتى على مستوى الوطن العربي. إذ كثيراً ما يتم التركيز على الجوانب الترفيهية من قبل أصحاب القرار. وتحليل التوزيع المكاني ووظيفة سهولة الوصول من قبل الباحثين والدراسات العلمية. وهنا تبرز الحاجة الملحة لتخطيط (UGI) وفقاً لوظائفها المتعددة، والتي تضمن تقديم أفضل جودة وظيفية لها للجيل الحالي والأجيال القادمة بالشكل الذي يُسهم في تعزيز النظام البيئي الحضري.

١-٣ أهداف الدراسة

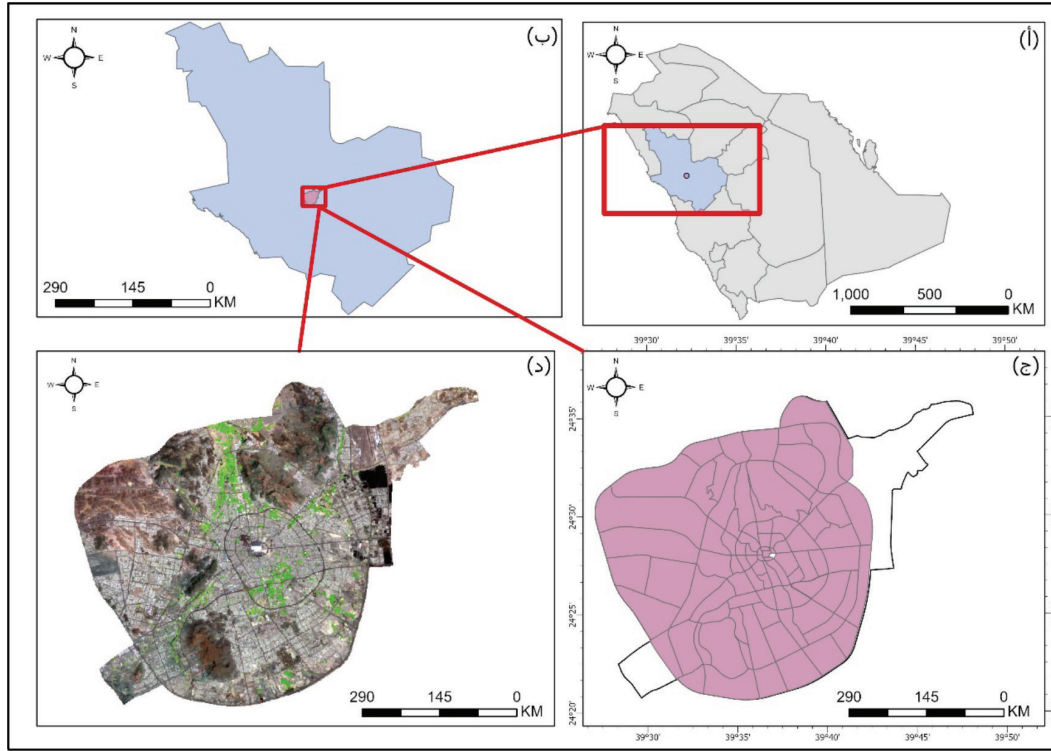
- ١- تحليل التباين المكاني لجودة الأسطح الخضراء على مستوى الأحياء في المدينة المنورة.
- ٢- التخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء الحضرية (UGI) بحسب وظيفة الاتصال بالطبيعة.
- ٣- تحديد أولويات تخطيط مواقع البنية التحتية الخضراء الحضرية حسب جودة الأسطح الخضراء.

١-٤ حدود الدراسة وأهميتها

يعد تخطيط البنية التحتية الخضراء الحضرية مع التركيز على الاتصال بالطبيعة وجودة الأسطح الخضراء من الأمور الهامة للاتصال الحيوي، حيث يؤدي دمج المساحات الخضراء والعناصر الطبيعية في البيئات الحضرية إلى تعزيز شعور السكان بالارتباط بالطبيعة. وتحقيق فوائد عديدة للصحة العقلية والرفاهية ونوعية الحياة بشكل عام. إلى جانب دعم التنوع البيولوجي حيث تعمل البنية التحتية الخضراء الحضرية جيدة التصميم على تعزيز التنوع البيولوجي داخل المناطق الحضرية من خلال توفير موائل لمختلف الأنواع النباتية والحيوانية. وهذا أمر بالغ الأهمية للحفاظ على التوازن البيئي والقدرة على الصمود في المدن، خاصة مع استمرار التوسع الحضري في التعدي على الموائل الطبيعية. وتحقيق المرونة المناخية إذ تساعد (UGI) بما في ذلك الأسطح الخضراء على تخفيف تأثير جزيرة الحرارة الحضرية عن طريق امتصاص حرارة أقل من مواد البناء التقليدية والاحتفاظ بها. ويمكن أن يساهم ذلك في خفض تكاليف الطاقة للمباني وتقليل الإجهاد الحراري الإجمالي في المناطق الحضرية، وبالتالي تعزيز القدرة على التكيف مع المناخ. إلى جانب إدارة مياه الأمطار حيث تلعب الأسطح الخضراء وعناصر البنية التحتية الخضراء الأخرى دوراً مهماً في جريان مياه الأمطار من خلال امتصاص تدفق مياه الأمطار وإبطائه. ويساعد ذلك على منع الفيضانات، ويقلل الضغط على أنظمة الصرف الصحي البلدية، ويحسن جودة المياه عن طريق تصفية الملوثات. كذلك تحسين جودة الهواء حيث يمتص الغطاء النباتي في البنية التحتية الخضراء الملوثات مثل ثاني أكسيد الكربون وأكاسيد النيتروجين والمواد الجسيمية، وبالتالي يحسن جودة الهواء في المناطق الحضرية. ويمكن أن يكون لهذا فوائد كبيرة على الصحة

العامة عن طريق الحد من أمراض الجهاز التنفسي وغيرها من المشاكل الصحية المرتبطة بسوء نوعية الهواء. وتعزيز القيمة الجمالية والترفيهية حيث تساهم البنية التحتية الخضراء في تعزيز المظهر الجمالي للمناطق الحضرية، مما يجعلها أكثر جاذبية للأفراد كما يمكن للمساحات الخضراء المصممة جيداً أن توفر فرصاً للأنشطة الترفيهية وممارسة الرياضة والتفاعل الاجتماعي، مما يعزز تماسك المجتمع وقابلية العيش بشكل عام.

وتتمثل حدود الدراسة المكانية في المدينة المنورة والتي تقع بين دائرتي عرض (20° 24' و 24° 40' شمالاً وخطي طول (25° 39' و 39° 50' شرقاً، في منطقة تتوسط الإقليم الغربي من المملكة العربية السعودية، ويبلغ ارتفاعها عن سطح البحر ٦٢٠م (أمانة المدينة المنورة، ٢٠١٧، ص١). كما يبين الشكل (١) والذي يوضح موقع المدينة المنورة بالنسبة للمملكة العربية السعودية. وإجمالي مساحة معمورة تبلغ ٤٤,٥٣٠ كم^٢ (أمانة المدينة المنورة، ٢٠٢٢). من إجمالي مساحة المدينة المنورة التي تبلغ ٦٠٦ كم^٢. كما يبلغ عدد أحياء المدينة المنورة ٨٨ كما يبينها الشكل (٢).



شكل رقم (١) موقع المدينة المنورة بالنسبة للمملكة العربية السعودية.

- (أ) المملكة العربية السعودية
(ب) منطقة المدينة المنورة
(ج) النطاق الحضري
(د) المدينة المنورة

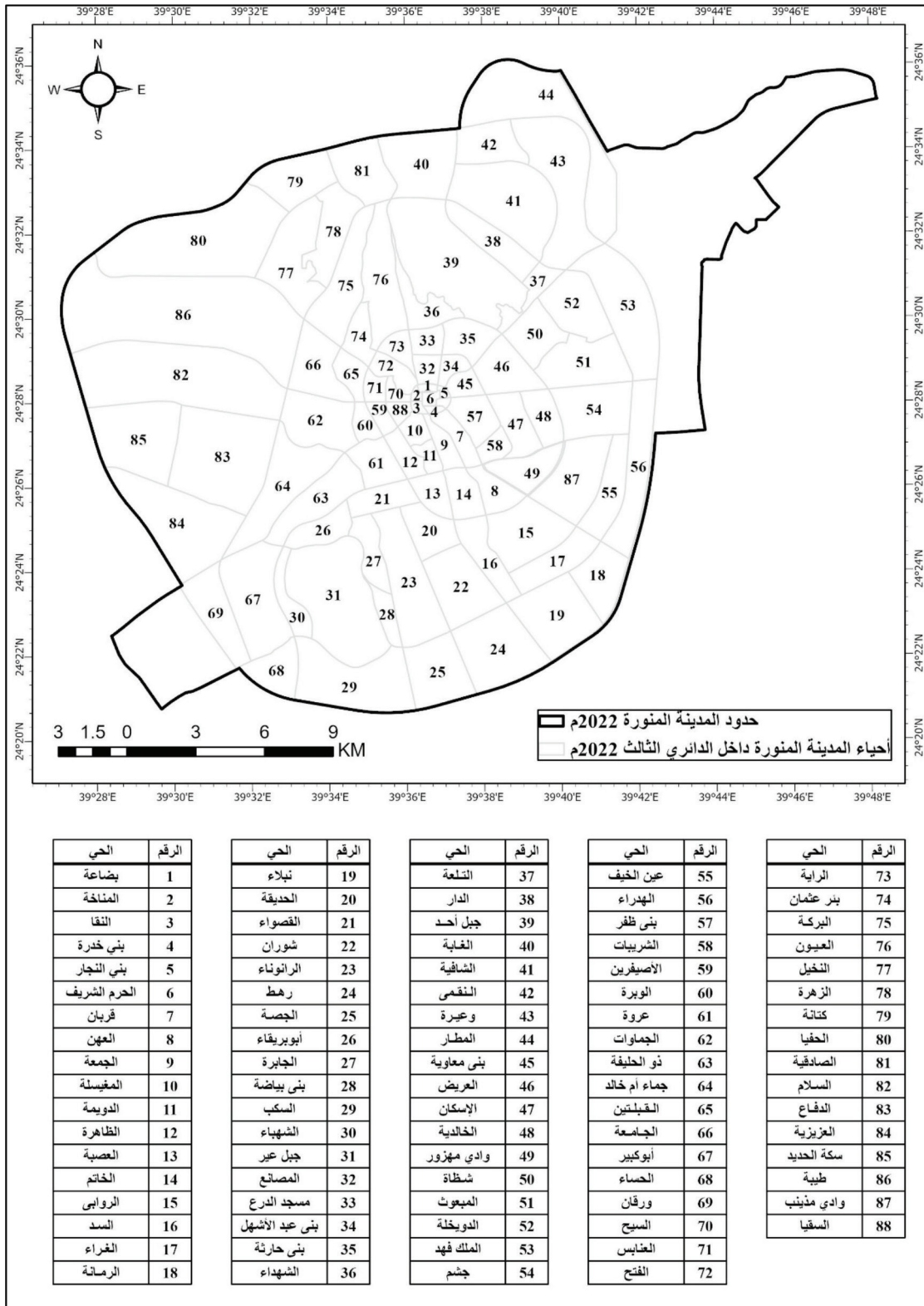
المصدر: من إعداد الباحثين بالاعتماد على بيانات أمانة المدينة المنورة، ٢٠٢٢م.
الرئية الفضائية: من إعداد الباحثين بالاعتماد على Landsat 8 بواسطة (GEE).

٠-١ مصطلحات الدراسة

تتضح مصطلحات الدراسة من خلال الجدول (١).

جدول رقم (١) مصطلحات الدراسة

المصطلح باللغة العربية	المصطلح باللغة الإنجليزية	اختصار المصطلح
البنية التحتية الخضراء الحضرية	Urban green infrastructure	UGI
منصة جوجل إيرث لمعالجة البيانات الضخمة	Google Earth Engine	GEE
نظم المعلومات الجغرافية	Geographic information systems	GIS
الانحدار متعدد النطاقات الجغرافي الموزون	Multiscale Geographically Weighted Regression	MGWR
نموذج التخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء	Green Infrastructure Spatial Planning	GISP
تحليل القرار متعدد المعايير	Multi-criteria decision analysis	MCDA
مؤشر الاختلاف الطبيعي (المعياري) للغطاء النباتي	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI
مؤشر الغطاء النباتي المحسن	Enhanced Vegetation Index	EVI
مؤشر صحة الغطاء النباتي	Vegetation health index	VHI
مؤشر حالة الغطاء النباتي	Vegetation Condition Index	VCI
مؤشر حالة درجة الحرارة	Temperature Condition Index	TCI



شكل رقم (٢) أحياء المدينة المنورة داخل الطريق الدائري الثالث (٢٠٢٢م).
المصدر: من إعداد الباحثين بالاعتماد على أمانة المدينة المنورة، بيانات غير منشورة، ٢٠٢٢م.

٢- أدبيات الدراسة

والتي تتعلق بالتخطيط الحضري للمناطق الخضراء في حاضرة الدمام بالمملكة العربية السعودية اعتماداً على نماذج إمكانية الوصول وتخصيص الموقع في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية. وكشفت النتائج عن سوء توزيع المناطق الخضراء وتدني المعادلات التخطيطية لنصيب الفرد من المناطق الخضراء في منطقة الدراسة. ودراسة " تشانغ وراميريز" (Zhang & Ramirez, 2019) عن تقييم ورسم خرائط خدمات النظام البيئي لدعم البنية التحتية الخضراء الحضرية في برشلونة بإسبانيا. إلى جانب دراسة الصافي (٢٠٢٢) والتي رصدت تغير المسطحات الخضراء باستخدام التقنيات الجيومكانية في محافظة العلا خلال الفترة الزمنية ٢٠١٣-٢٠٢١م؛ وتوصلت الدراسة إلى أن المسطحات الخضراء شهدت زيادة بمتوسط سنوي يعادل ٣١٪؛ وأوصت بضرورة التوسع في عمليات التشجير في إطار مبادرة السعودية الخضراء.

بالإضافة إلى دراسة عبد المالك (٢٠٢٢) عن تقييم المناخ التفصيلي للمساحات الخضراء في مدينة أسيوط الجديدة في مصر؛ والتي اهتمت بمعرفة الواقع التبريدي للمساحات الخضراء من خلال الاستشعار عن بعد، واقترحت نموذج تخطيط مكاني داخل نظم المعلومات الجغرافية وفقاً لمجموعة معايير وقسمت المناطق وفق الأولوية بالمساحات الخضراء حسب المعايير إلى ٥ مراتب. كما اقترحت دراسة "جودسبيد وآخرون" (Goodspeed et al, 2022) نموذج تخطيط مكاني إقليمي للبنية التحتية الخضراء متعددة الوظائف. وبينت دراسة " حنا وآخرون" (Hanna et al, 2023) أن خدمات النظام البيئي الحضري التي توفرها (UGI) تعتمد على طبيعتها ووظيفتها ومدى اتصالها بخدمات النظام البيئي. بالإضافة إلى دراسة عبد الأمير وطالب (٢٠٢٣) باستخدام المنهج التحليلي الوصفي والاستبيان عن تطور البنية التحتية الخضراء في جانب الكرخ من مدينة بغداد؛ حيث استعرضت الدراسة مراحل تطور المناطق الخضراء؛ وأوصت بوضع قوانين وتشريعات لمنع التجاوز على المساحات الخضراء وزيادة الوعي بأهميتها.

من الدراسات التي تطرقت للتخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء الحضرية بناءً على وظائفها دراسة "ميل" (Mell, 2009) والتي ناقشت البنية التحتية الخضراء كموفر لعدد من الفوائد البيئية والاقتصادية والاجتماعية في المملكة المتحدة؛ من خلال تقييم كيف يمكن للبنية التحتية الخضراء أن تلبي اعتبارات السياسات المكانية والتخطيطية باستخدام المنهج الذي يدعم السياق التاريخي للمساحة. وكذلك دراسة "مازا وآخرون" (Mazza et al, 2011) والتي هدفت إلى دعم وتطوير استراتيجيات البنية التحتية الخضراء على مستوى الاتحاد الأوروبي؛ من خلال تقييم فعالية وكفاءة تدابير البنية التحتية الخضراء في جميع أنحاء الاتحاد الأوروبي؛ من حيث التنوع البيولوجي وفوائد خدمة النظام البيئي الأوسع. إلى جانب دراسة " بوليت وآخرون" (Pauleit et al, 2011) عن تخطيط البنية التحتية الخضراء متعددة الوظائف لتعزيز الخدمات البيئية في المدينة؛ حيث ناقشت تعدد الوظائف والاتصال واعتماد التخطيط الاستراتيجي المتكامل وطويل الأجل كمبادئ رئيسية للبنية التحتية الخضراء الحضرية وتم استخدام دراسة الحالة في سياتل بالولايات المتحدة. وكذلك نمذجة ورسم خرائط خدمات النظام البيئي للتخطيط والإدارة المستدامة في المدن وما حولها وذلك في أطروحة الدكتوراه لـ "بارون" (Baró, 2016) التي ناقشت بشكل نقدي مساهمة البنية التحتية الخضراء للتعامل مع التحديات الحضرية المتنوعة؛ مع التركيز على تلوث الهواء وانبعاثات الدفيئة والاجهاد الحراري وفرص الترفيه في الهواء الطلق.

بالإضافة إلى دراسة "ميرو ونيويل" (Meerow & Newell, 2017) عن التخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء متعددة الوظائف والتي تحقق النمو والمرونة في ديترويت بالولايات المتحدة. وقام الكناني ونجم (٢٠١٧) بتقييم توزيع المناطق الخضراء في مدينة الديوانية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، حيث ركز البحث في وصف واقع التوزيع المكاني للمناطق الخضراء في منطقة الدراسة وتقييم كفاءتها عن طريق معياري المساحة وسهولة الوصول. وذلك بالاعتماد على الدراسة الميدانية؛ وأظهرت النتائج أن كفاءة التوزيع المكاني للمناطق الخضراء ناقصة وتحتاج إلى إعادة التخطيط. كذلك دراسة عبد الكريم (٢٠١٩)

٣- الإجراءات المنهجية

٣-١ منهج الدراسة اعتمدت الدراسة على المناهج العلمية

التي تسعى لتحقيق أهدافها وذلك من خلال المنهج الوصفي بكشف خصائص البنية التحتية الخضراء وتصنيفها وتبايناتها. إلى جانب المنهج الاستدلالي التحليلي من خلال ملاحظة ورصد الواقع لوظيفة الاتصال بالطبيعة وتمحيصها بهدف توضيح الصورة النمطية لها وتوزيعها وتقديم وصف علمي للمعطيات والمتغيرات والحقائق الجغرافية المرتبطة بها.

٣-٢ البيانات ومعالجتها

تم الاعتماد على بعض البيانات الضخمة في الاستشعار عن بعد كما يوضحها الجدول (٢) وباستخدام البيانات الضخمة بالاستشعار عن بعد وخوارزميات التعلم الآلي و التعلم العميق المتمثل في التقنيات الحديثة المستخدمة في تشخيص وتقييم مؤشرات النظام البيئي الحضري ومن خلال الحوسبة السحابية لخوارزميات (GEE) بالاعتماد على البرمجة بلغتي البايثون Python والجافا سكريبت JavaS- cript ، حيث أصبح Google Earth Engine (GEE) أداة المعالجة السحابية الأكثر انتشاراً في الوقت الحاضر فهو يوفر دوراً حاسماً لتحليل البيانات الجغرافية الضخمة في الاستشعار عن بعد (Tamiminia et al, 2020, P.154) إلى جانب التكامل مع نظم المعلومات الجغرافية من خلال برنامج (ArcGIS Pro) الإصدار (١, ٠, ٢). تم استخراج المؤشرات التالية والتي اعتمد عليها كمعايير تخطيطية :

جدول رقم (٢) بيانات الدراسة

درجة الدقة / م	المستشعر/ الباند	البيانات
30	QA_PIXEL	USGS Landsat 9 Collection 2 Tier 1 Raw Scenes
	B2	
	B3	
	B4	
	B5	
	B6	
	B7	
	B10	
250	NDVI	MOD13Q1.006 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m
	EVI	
1000	LST_Day_1km	MOD11A2.006 Terra Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day Global 1km

٣-٢-١ مؤشر الاختلاف الطبيعي للغطاء النباتي

تم الاعتماد على مؤشر الاختلاف الطبيعي للغطاء النباتي Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) كمؤشر على تحديد إذا كانت هناك نباتات أم لا وقياس كثافة الغطاء النباتي في منطقة الدراسة. وتختلف قيمة (NDVI) من -١ إلى ١؛ وكلما زادت القيمة تعكس الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) مما يعني المساحات الخضراء الكثيفة. كما أن القيم الموجبة تمثل المناطق النباتية والقيم السالبة تمثل المناطق غير النباتية (Rouse et al, 1973, P.311). ولاستخراج المؤشر تم الاعتماد على مجموعة البيانات (Landsat 9) وذلك بتطبيق المعادلة:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

حيث أن:

NDVI = مؤشر الاختلاف الطبيعي للغطاء النباتي

NIR = انعكاس الضوء في منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة

RED = انعكاس الضوء في منطقة الأشعة الحمراء

وتم تعويض هذه القيم بحسب بيانات (Landsat 9)

كالتالي: $(B5 - B4) / (B5 + B4)$

حيث أن: RED = B4 , NIR = B5

٣-٢-٢ مؤشر الغطاء النباتي المحسن

مؤشر الغطاء النباتي المحسن Enhanced Vegetation Index (EVI) من ضمن المؤشرات التي تم الاعتماد عليها لقياس جودة الأسطح الخضراء في المدينة المنورة؛ وهو مؤشر معدل للغطاء النباتي (NDVI) مع تحسين الحساسية للمناطق ذات الكتلة الحيوية العالية وتحسين القدرة على مراقبة الغطاء النباتي من خلال تقليل التأثيرات الضارة للعوامل البيئية مثل الظروف الجوية وخلفية التربة ويمكن حسابه من خلال المعادلة التالية (Liu & Huete, 1995):

$$EVI = G * (NIR - RED) / (NIR + C1 * RED - C2 * BLUE + L) \quad (2)$$

حيث أن:

$EVI =$ مؤشر الغطاء النباتي المحسن

$G =$ هو عامل الكسب (يتم ضبطه عادةً على 2.5)

$NIR =$ انعكاس الضوء في منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة

$RED =$ انعكاس الضوء في منطقة الأشعة الحمراء

$C1$ و $C2 =$ المعاملان المستخدمان لتصحيح تباثر الهباء

الجوي في النطاق الأحمر عن طريق استخدام النطاق

الأزرق، ويتم ضبطهما عادةً (C1) إلى 6 و (C2) إلى 5.7

$Blue =$ انعكاس الضوء في منطقة الأشعة الزرقاء

$L =$ هو عامل تعديل خلفية الظل (يتم عادةً ضبطه إلى 1)

ولاستخراج المؤشر تم الاعتماد على مجموعة البيانات

(Landsat 9) وتطبيق معادلة (2) من خلال التعويض

بالقيم التالية:

$$G=(5.2), NIR=(B5), RED=(B4), C1=(6),$$

$$(1) = C2=(5.7), Blue=(B2), L$$

٣-٢-٣ مؤشر صحة الغطاء النباتي

مؤشر صحة الغطاء النباتي (VHI) Vegetation Health Index

هو مؤشر يوضح صحة الغطاء النباتي أو تقدير مشترك

للرطوبة والظروف الحرارية (NOAA Star). وتم

استخراج مؤشر (VHI) باستخدام البيانات

(MOD13Q1.006:Terra Vegetation Indices)

(MOD11A2.006:Terra Land Surface Temperature)

فمؤشر (VHI) عبارة عن مزيج من مؤشر حالة الغطاء النباتي

Vegetation Condition Index (VCI) ومؤشر حالة درجة

الحرارة Temperature Condition Index (TCI) كما

يتضح من الشكل (2). ويمكن حساب هذه المؤشرات من

خلال الصيغ التالية: (Kogan, 1997, P.627)

$$VHI = \alpha \times VCI + (1 - \alpha) \times TCI \quad (3)$$

حيث أن:

$VHI =$ مؤشر صحة الغطاء النباتي

$VCI =$ حالة الغطاء النباتي

$TCI =$ مؤشر حالة درجة الحرارة

α هو الوزن المستخدم لقياس مساهمة (VCI) و (TCI)

في تقييم حالة الجفاف. إذ يتم تعيين α على (0, 0.5) لأنه من

الصعب التمييز بين مساهمة درجة حرارة السطح (LST)

ومؤشر الغطاء النباتي (NDVI) عند قياس إجهاد

الجفاف.

مؤشر حالة الغطاء النباتي: يعد مؤشر حالة الغطاء

النباتي (Vegetation Condition Index (VCI) مؤشراً

لحالة الغطاء النباتي بالاعتماد على قيم مؤشر (NDVI)

الأدنى والأعلى التي تمت مواجعتها في نظام بيئي معين على

مدار سنوات عديدة ويتم حسابه بالصيغة التالية:

$$VCI = (NDVI - NDVIMIN) / (NDVIMAX - NDVIMIN) * 100 \quad (4)$$

حيث أن:

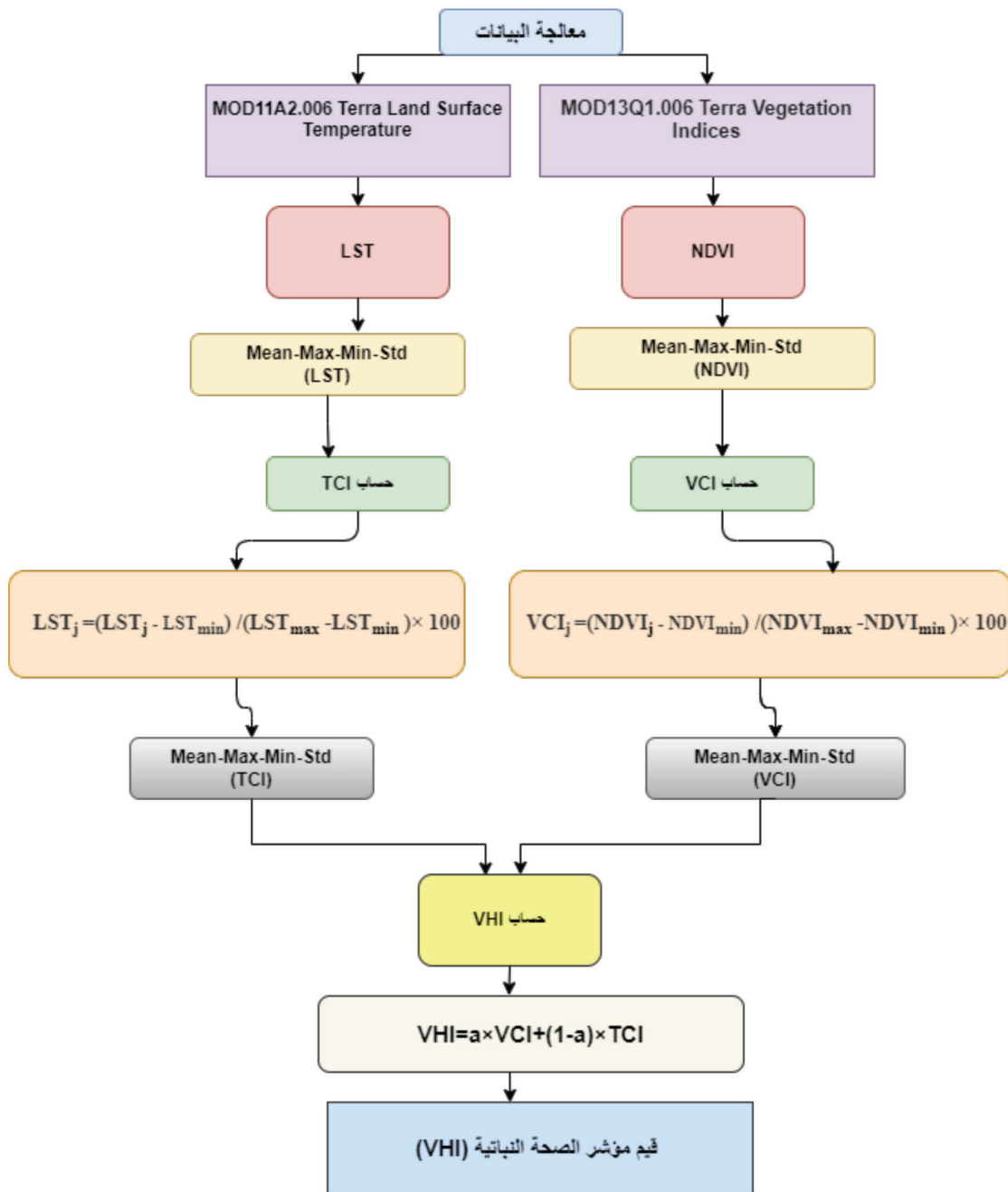
$$VCI =$$

$$VCI =$$

$$VCI =$$

NDVIMAX و NDVIMIN تشير إلى الحد الأدنى

والأعلى لجميع السنوات.



شكل رقم (٣) خطوات استخراج مؤشر الصحة النباتية

LST_{min} و LST_{max} هي الحد الأدنى والأعلى لجميع السنوات في النطاق الحراري (١٠، ٤٠-١٢.٥٠ ميكرومتر). ويمتد المدى الدينامي لتلك المؤشرات بين ٠-١٠٠ ويشكل ٤٠٪ حداً فاصلاً بين الجفاف والرطوبة (Bhuiyan, 2008, P.908). ويمكن تصنيف قيم المؤشرات إلى خمس فئات لتقييم حالة الإجهاد فأقل من ١٠٪ جفاف متطرف؛ وأقل من ٢٠٪ جفاف حاد؛ وأقل من ٣٠٪ جفاف متوسط؛ وأقل من ٤٠٪ جفاف خفيف؛ بينما أكثر من ٤٠٪ لا يوجد جفاف. (Kogan, 2001, P. 1953).

مؤشر حالة درجة الحرارة: يعتمد مؤشر حالة درجة الحرارة (TCI) على درجة حرارة سطح الأرض (LST) التي تقوم بتقييم الإجهاد الحراري (Benton, 2018, P.4). وذلك من خلال الصيغة: (Kogan, 1997, P.627)

$$TCI = \frac{(LST - LST_{min})}{(LST_{max} - LST_{min})} * 100 \quad (٥)$$

حيث أن:

TCI = مؤشر حالة درجة الحرارة

٣-٢-٤ الانحدار متعدد النطاقات الجغرافي الموزون

الانحدار متعدد النطاقات الجغرافي الموزون Multi-scale Geographically Weighted Regression (MGWR) من أدوات التحليل الإحصائي المكاني وهو شكل محلي من الانحدار الخطي لتمثيل العلاقات المكانية وإظهار الارتباط بين المتغيرات. يعتمد (MGWR) على الانحدار الجغرافي الموزون Geographically weighted regression (GWR). وهو نموذج انحدار محلي يسمح لمعاملات المتغيرات التوضيحية بالتباين عبر المساحة. حيث يعمل كل متغير توضيحي على نطاق مكاني مختلف ولا يأخذ (GWR) ذلك بعين الاعتبار لكن (MGWR) يفعل ذلك من خلال السماح بجوار مختلف (نطاق ترددي) لكل متغير توضيحي. يحدد الجوار (عرض النطاق الترددي) للمتغير التوضيحي المعالم المستخدمة لتقدير معامل ذلك المتغير التوضيحي في نموذج الانحدار الخطي الملائم للمعلم أو الميزة المستهدفة مما يمنح صورة أفضل للبيانات بشكل عام ويقدم غالباً نتيجة أكثر دقة. (Oshan et al, 2019, P2) وتم الاعتماد عليه لتوضيح نسبة مساهمة كل متغير تفسيري في التباين المكاني للمتغير التابع. وتمثلت خطوات التطبيق للنموذج في الشكل (٤) كما جاءت على النحو التالي (Fotheringham, 1998, P.1910):

١- بناء النموذج والذي تم اعداده كما يلي:

$$\mu Y = \beta_0 + \beta_1 NDVI + \beta_2 EVI + \beta_3 VHI + \varepsilon \quad (٦)$$

حيث أن:

μY = جودة الأسطح الخضراء.

β_0 = Coefficients Intercept (معامل القطع).

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = معاملات الميل أو قيمة بيتا (Beta)

(أي قيمة تأثير المتغيرات التفسيرية على المتغير التابع).

NDVI = الغطاء النباتي بناءً على مؤشر (NDVI) في المدينة المنورة.

EVI = الغطاء النباتي بناءً على مؤشر (EVI) في المدينة المنورة.

VHI = الجفاف (VHI) في المدينة المنورة.

ε = الخطأ، أو الفرق بين القيمة الحقيقية والمقدرة.

٢- معايرة النموذج وفحصه للتأكد من صلاحيته من حيث عدم وجود ارتباط ذاتي مكاني بين أخطاء النموذج، وذلك من خلال:

١- استخراج الخطأ أو المتبقيات (هي الفرق بين القيمة الحقيقية وقيم التنبؤ للمتغير التابع من خلال النموذج) باستخدام المربعات الصغرى العادية Ordinary Least Square error (OLSe) وذلك من أجل فحص النموذج.

٢- التأكد من عدم ارتباط أخطاء النموذج ارتباط ذاتي مكاني؛ حيث أن ارتباطها يؤدي إلى عدم صحة التحليل وعدم واقعيته وقيامه على افتراضات خاطئة. وتم ذلك بتطبيق الأسلوب الإحصائي Global Moran's؛ وذلك لنسبة الخطأ التي تم استخراجها بتطبيق الأسلوب الإحصائي المكاني المربعات الصغرى العادية Ordinary Least Squares (OLS).

٣- التأكد من عدم وجود مشكلة البيانات الخطية (تكرار البيانات).

٤- تطبيق الانحدار متعدد النطاقات الموزون جغرافياً (MGWR) والذي تم استخدامه لمعرفة العلاقة بين المتغير التابع والمتغيرات التفسيرية المستقلة.

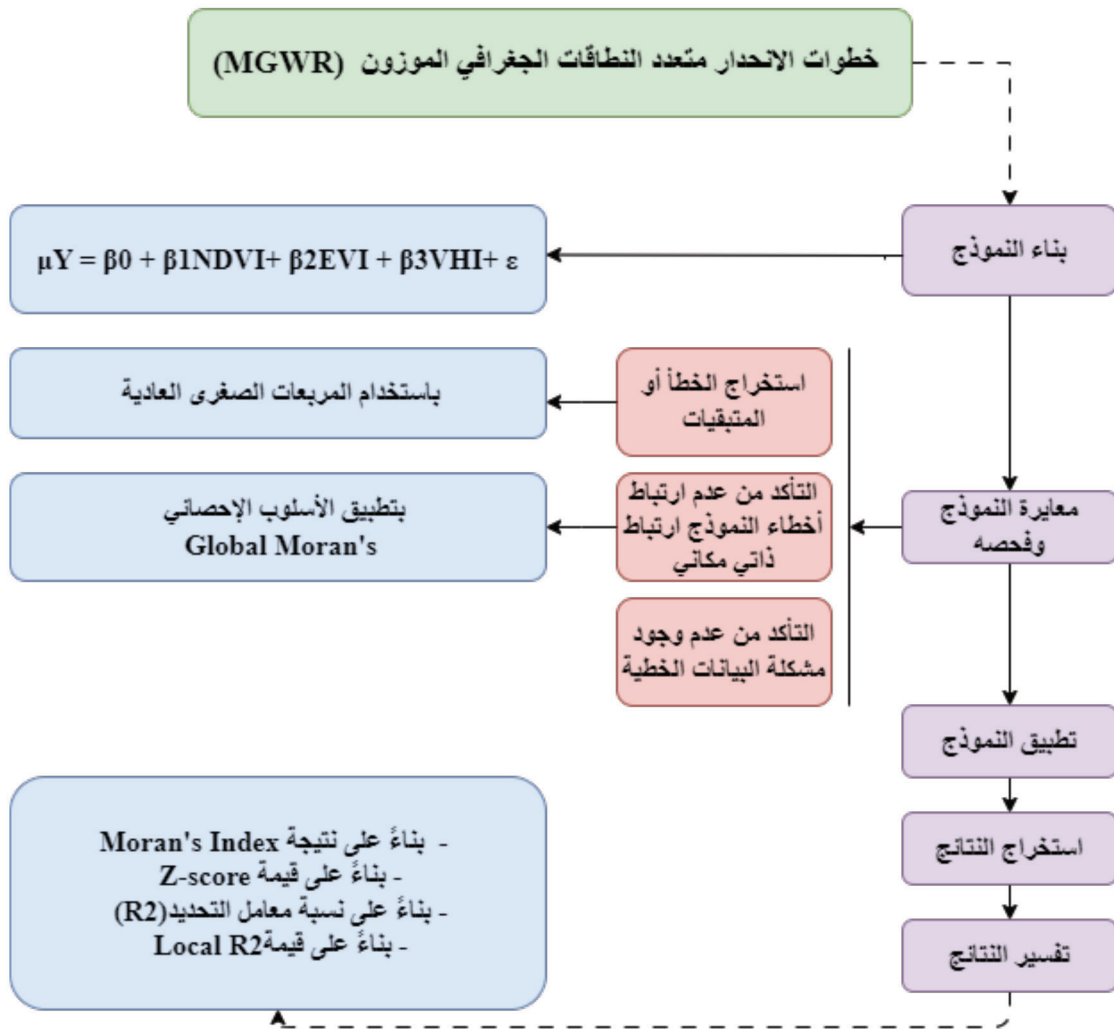
وبعد القيام بالخطوات السابقة تظهر النتائج ويتم تفسيرها كالتالي:-

١- بناءً على نتيجة Moran's Index يتم الحكم على النموذج هل يمكن الوثوق في تقديراته من حيث استيفاء شرط عدم ارتباط أخطاء النموذج ارتباط ذاتي مكاني أم لا.

٢- تتص فرضية العدم على أن نمط توزيع الظواهر هو نمط عشوائي، وبالتالي تقبل فرضية العدم بناءً على نتائج التحليل إذا جاء نمط التوزيع Random بناءً على قيمة Z-score.

٣- بناءً على ما سبق يتم تحديد صلاحية النموذج لاستخدامه في تطبيق الانحدار متعدد النطاقات الموزون جغرافياً (MGWR) أم لا.

٤- نتائج تحليل (MGWR) من خلال نسبة معامل التحديد (R^2) والحكم على نسبة تفسير النتائج للتباين المكاني للمتغير التابع. وقيمة Local R^2 والتي توضح قدرة المتغيرات التفسيرية على تفسير المتغير التابع في كل حي من أحياء المدينة المنورة. وكذلك علاقة المتغيرات التفسيرية بالتباين المكاني للمتغير التابع.



شكل رقم (٤) خطوات الانحدار متعدد النطاقات الجغرافي الموزون

كما يساعد تحليل القرار متعدد المعايير صنع القرار في تحليل الإجراءات أو البدائل المحتملة بناءً على معايير متعددة غير قابلة للقياس، وذلك باستخدام قواعد القرار لتجميع تلك المعايير لتقييم البدائل أو تصنيفها (Eastman, 2009, P. 249).

ويعتبر تحليل القرار متعدد المعايير (MCDA) طريقة راسخة لاتخاذ القرار ضمن بحوث العمليات لاتخاذ القرارات من خلال التقييم الواضح لمعايير متعددة. ورغم ذلك معظم الدراسات التي استخدمت نموذج (MCDA) للبنية التحتية الخضراء قامت بتحليل المواقع لتحقيق فائدة واحدة مثل العدالة الاجتماعية (Christmane et al, 2018)؛ أو جودة الهواء (Morani et al, 2011)؛ أو استكشفت العقبات المكانية لأولويات التخطيط المختلفة (Kremer et al, 2016). حيث تم استخدام طرق (MCDA) لحل المشكلات المكانية عن

٣-٢-٥ نموذج التخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء

يعتمد نموذج التخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء Green Infrastructure Spatial Planning (GISP) على نظم المعلومات الجغرافية (GIS) ويستخدم إطار تقييم مكاني متعدد المعايير يتضمن أولويات أصحاب المصلحة بحيث تكون النتائج بمثابة أدوات تعاونية لدعم القرار (Jankowski & Nyerges, 2001, P.30). فتحليل القرار متعدد المعايير Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) هو منهج منظم يستخدم في عمليات صنع القرار لتقييم ومقارنة البدائل بناءً على معايير أو أهداف متعددة. وفي سياق نماذج التخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء يساعد (MCDA) في تقييم واختيار المواقع أو التصميمات الأكثر ملاءمة لمشاريع البنية التحتية الخضراء، مع مراعاة المعايير البيئية والاجتماعية والاقتصادية المختلفة (Huang et al, 2016).

الغطاء النباتي المُحسن الأعلى قيم منخفضة؛ والمناطق ذات الغطاء المنخفض قيم أعلى كما يبين الشكل (٧). وذلك حتى تكون المناطق الفقيرة بالغطاء النباتي المُحسن من الأولويات عند تحديد مواقع البنية التحتية الخضراء. أما فيما يتعلق بمعيار الجفاف فقد تم إعادة التصنيف؛ بإعطاء المناطق المرتفعة بالجفاف قيم أعلى والمنخفضة قيم أقل كما يظهر من الشكل (٨). حتى يتم إدراج المناطق المرتفعة بالجفاف كمواقع ذات أولوية لإنشاء البنية التحتية الخضراء الحضرية من أجل تعزيز الاتصال بالطبيعة في المدينة المنورة.

مرحلة جمع وزن البيانات حيث تمت هذه المرحلة وفق التالي:

أ- عملية التحليل الهرمي هي إحدى أساليب تقييم القرار متعدد المعايير ففي منهجية التحليل الهرمي يتم تحديد أهمية كل معيار بطريقة Analytic Hierarchy Process (AHP) والذي يتضمن العلاقة بين مجموعة من المعايير مع مجموعة من البدائل في شكل هرمي. إذ أن كل معيار (طبقة خلوية) له مجموعة بدائل قابلة للمقارنة الزوجية بينه وبين المعيار الآخر (Saaty, 1987, P.163). وتُقاس هذه البدائل بمقياس خاص يتراوح من ١ إلى ٩ كما يتضح من الجدول (٣).

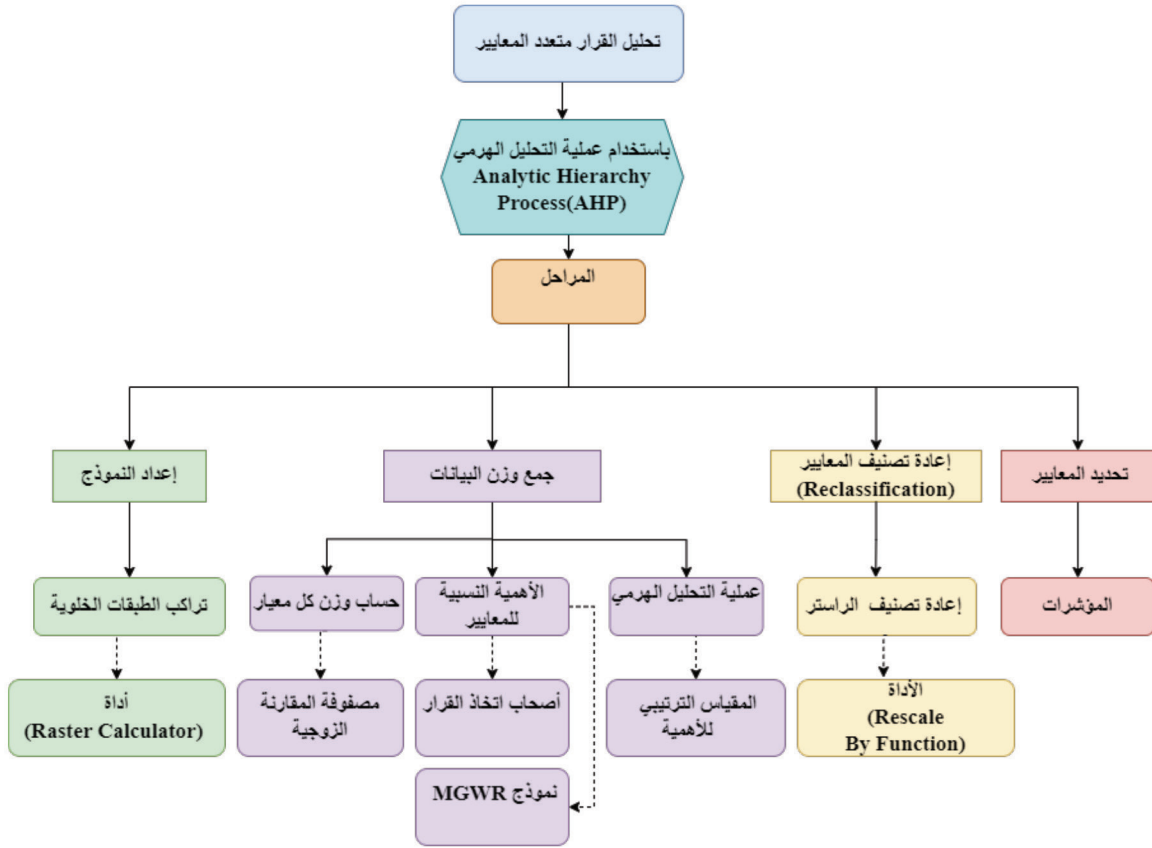
ب- تقييم الأهمية النسبية لكل معيار تم تحديد الأهمية لكل معيار بتحديد البدائل بناءً على نسبة مساهمة كل متغير في تفسير التباين المكاني للمؤشر العام الذي يمثله وفق نموذج (MGWR). وللمعايير الـ (٢) التي اعتمدت عليها الدراسة بناءً على الترتيب المُعتمد في منهجية عملية التحليل الهرمي Analytic Hierarchy Process (AHP) وهي: أهمية قليلة؛ وأهمية متوسطة؛ وأهمية كبيرة؛ وأهمية كبيرة جداً؛ وأهمية مُطلقة.

طريق اقتربانها بنظم المعلومات الجغرافية (GIS)، وذلك من خلال عدة خطوات يتم من خلالها اختيار مجموعة من المعايير والتي قد تكون نوعية أو كمية؛ ثم يتم تطبيق الأوزان على كل معيار لتحديد أهميته النسبية. وأخيراً يتم تسجيل كل خيار يتم النظر فيه مقابل المعايير والأوزان المطبقة لتؤدي إلى توصية نهائية. والتي يمكن أن تأخذ شكل قائمة من الخيارات التي تلي الحدود الدنيا للمعايير، أو يتم استخدام الدرجات لتصنيف جميع الخيارات. يطبق (MCDA) المكاني هذا المنطق داخل نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لرسم خريطة لكل معيار، وتطبيق الأوزان، وتطبيق جبر الخريطة لإنتاج خريطة توضح الأولويات المكانية وفقاً لتلك المعايير (Malczewski, 2006, P.707). وباستخدام تحليل القرار متعدد المعايير باستعمال طريقة التحليل الهرمي Analytic Hierarchy Process (AHP). تم تطبيق نموذج (MCDA) وتمثلت خطوات تطبيق النموذج لكل المعايير والتي يوضحها الشكل (٥) وفق التالي:

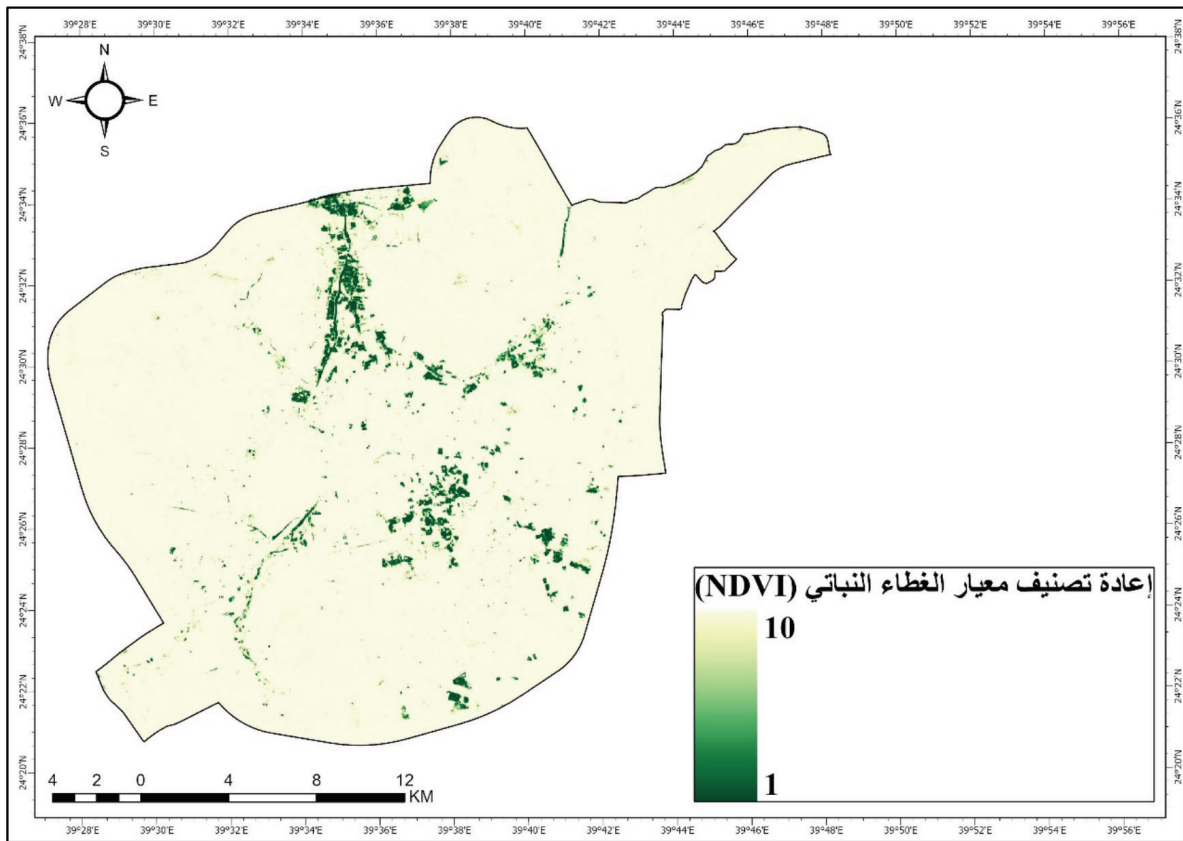
مرحلة تحديد المعايير وهي المؤشرات (٣) التي تم الاعتماد عليها لقياس جودة الأسطح الخضراء؛ وهي: NDVI؛ و EVI؛ و VHI. حيث تم استخراجها بواسطة برنامج (GEE).

مرحلة إعادة تصنيف المعايير وهي الطبقات الخلوية (Raster Layers) التي تُمثل المؤشرات والتي تم استخراجها. وتم إعادة تصنيفها بالاعتماد على الأداة التحليلية (Rescale By Function) ببرنامج ArcGis (Pro 3.1.0). وذلك من أجل إعادة ترتيب قيم البكسل الخلوية ترتيباً يتسق مع الهدف المنشود. حيث يتم إعطاء المناطق الأقل جودة قيم مرتفعة؛ والعكس تم إعطاء المناطق الأعلى جودة قيم منخفضة حتى يتسنى عند تطبيق نموذج (MCDA) أن تظهر المناطق ذات الجودة المنخفضة كمناطق ذات أولوية مرتفعة بالبنية التحتية الخضراء.

فتم إعادة التصنيف لمعيار الغطاء النباتي بناءً على مؤشر (NDVI) بحيث تكون المناطق الكثيفة بالغطاء النباتي ذات قيم منخفضة؛ والمناطق المنخفضة الكثافة ذات قيم أعلى كما يتضح من الشكل (٦). وذلك حتى يتسنى للمناطق المنخفضة بالغطاء النباتي بأن تكون ذات أولوية عند تطبيق النموذج. وكذلك الحال بالنسبة لمعيار الغطاء النباتي المُحسن بناءً على مؤشر (EVI)؛ فقد تم إعطاء المناطق ذات

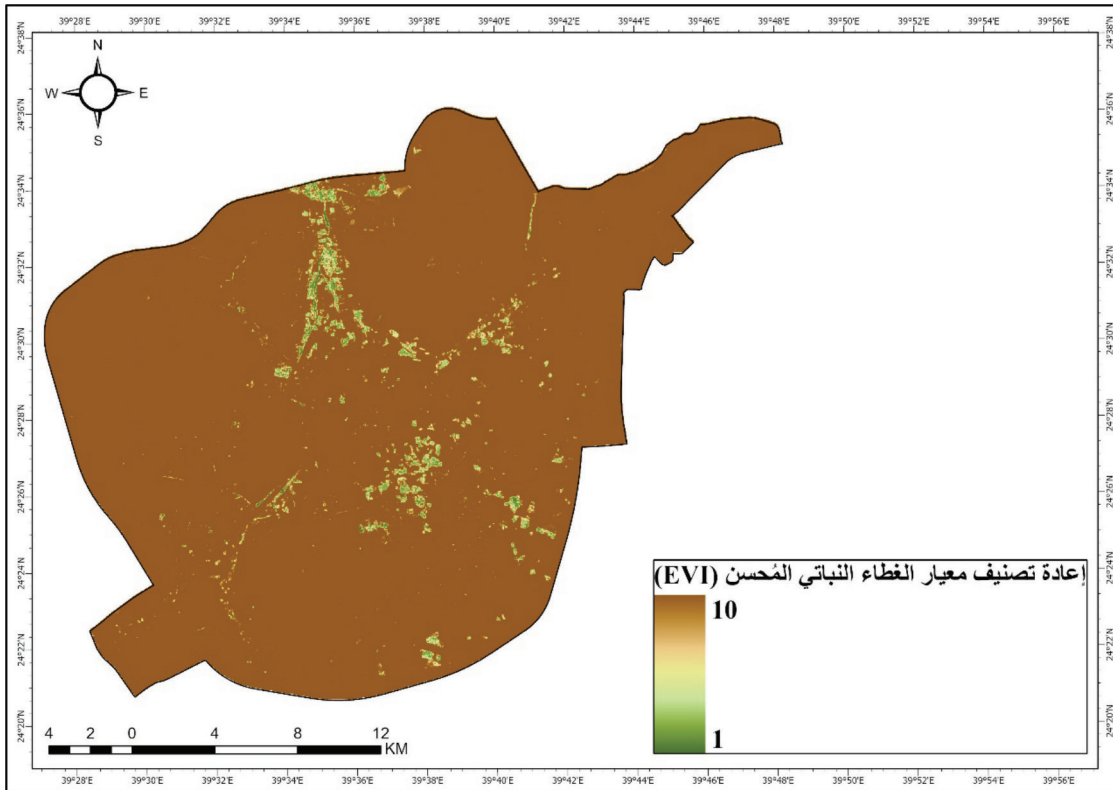


شكل رقم (٥) خطوات تحليل القرار متعدد المعايير



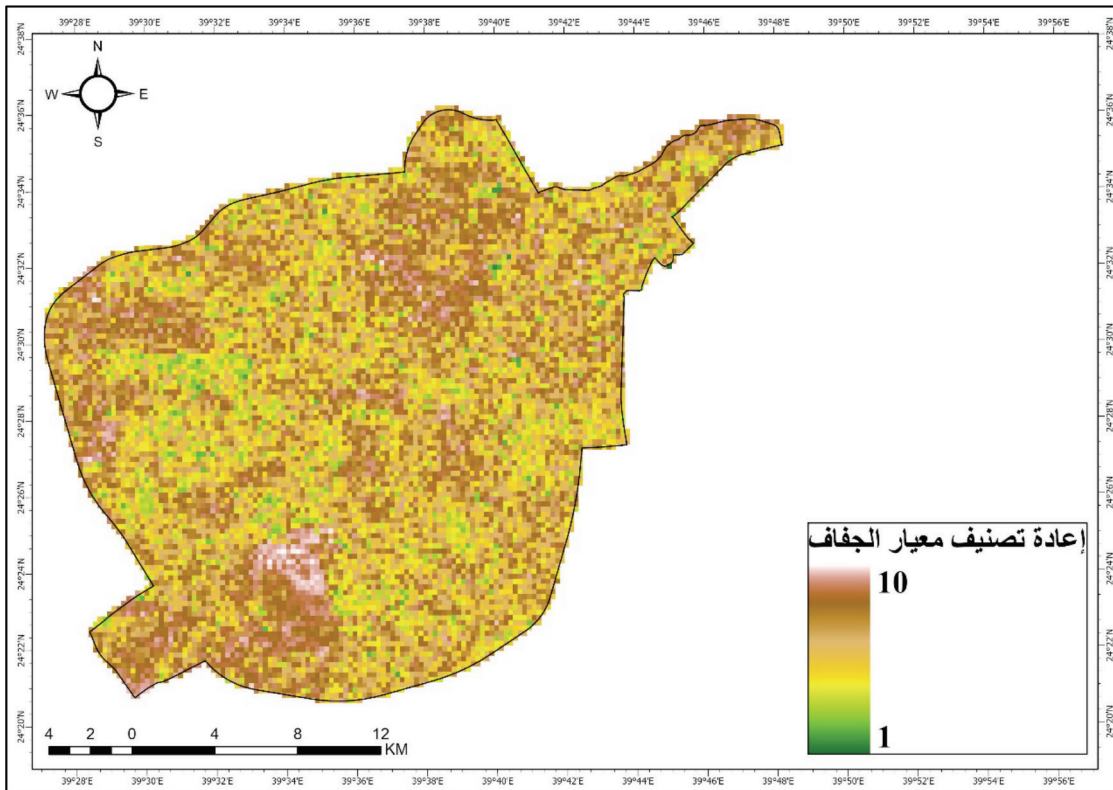
شكل رقم (٦) إعادة تصنيف معيار الغطاء النباتي (NDVI).

المصدر: من إعداد الباحثين بواسطة الأداة (Small Rescale By Function).



شكل رقم (٧) إعادة تصنيف معيار الغطاء النباتي المُحسن (EVI).

المصدر: من إعداد الباحثين بواسطة الأداة (Small Rescale By Function الدالة).



شكل رقم (٨) إعادة تصنيف معيار الجفاف (VHI).

المصدر: من إعداد الباحثين بواسطة الأداة (Small Rescale By Function الدالة).

جدول رقم (٣) المقياس الترتيبي للأهمية النسبية بطريقة (AHP)

البدائل	درجة الأهمية
أهمية قليلة	١
أهمية متوسطة	٣
أهمية كبيرة	٥
أهمية كبيرة جداً	٧
أهمية مطلقة	٩
درجات بينية للأحكام	(٨، ٦، ٤، ٢)

المصدر: (Saaty, 1987, P.163).

ج- حساب وزن كل معيار (بناء مصفوفة المقارنة الزوجية) مصفوفة المقارنة الزوجية تستخدم لاستقراء الأوزان التي يمكن استخدامها في ترتيب الأولويات حيث تضمن التوافق ومنطقية تحديد أهمية المعايير. فهناك نسبة تناسق قيمتها ١٠٪ كحكم للحكم على مستوى ثبات الأحكام. فإذا كانت قيمة التناسق أقل دل ذلك على اقتراب الأحكام في المصفوفة من الثبات وعدم التناقض؛ أما عندما تكون القيمة أعلى من ١٠٪ ترفض الأحكام وينبغي إعادة التقييم (Saaty, 1987, p.165).

مرحلة إعداد النموذج وهي عملية تراكم الطبقات الخلوية المصنفة لكل معيار مضروب في الوزن المرجح له باستخدام الأداة (Raster Calculator) ببرنامج (ArcGIS Pro 3.0.1) وذلك وفق ما يلي:

$$(٧) (\text{المعيار} \times \text{الوزن} ١) + (\text{المعيار} \times \text{الوزن} ٢) + (\text{المعيار} \times \text{الوزن} ٣)$$

٤- النتائج والمناقشة

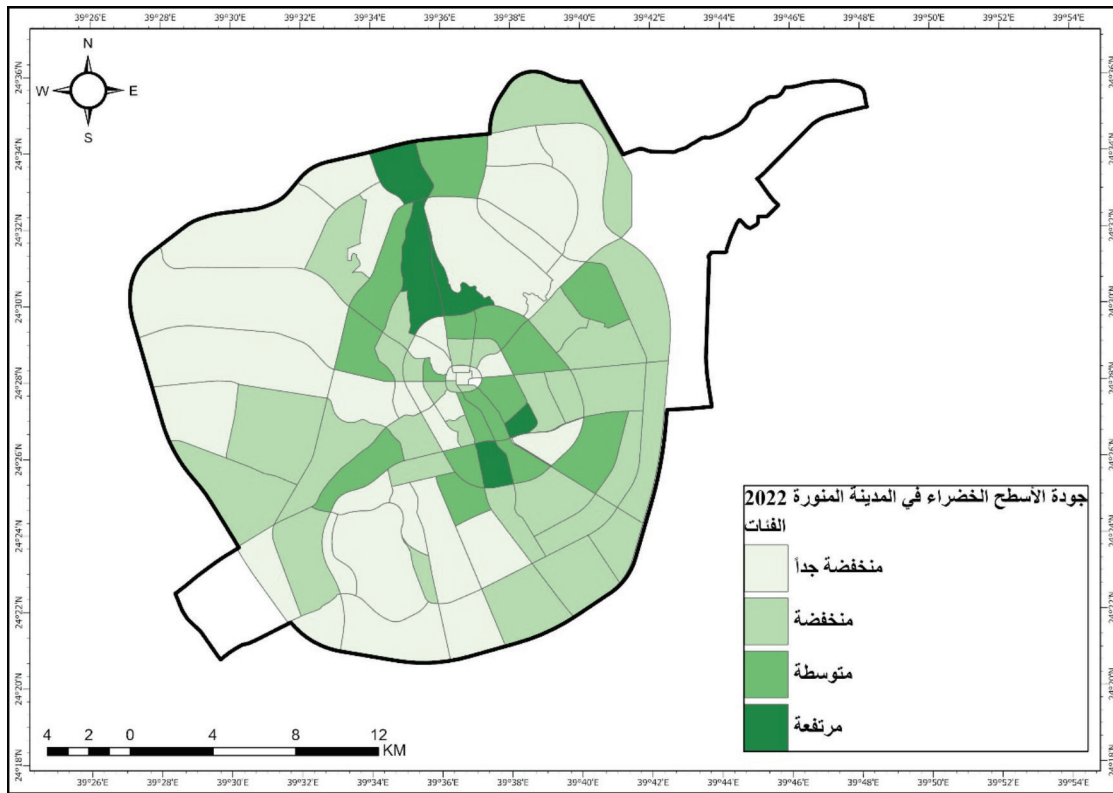
٤-١ التباين المكاني لجودة الأسطح الخضراء

لتحديد التباين المكاني لجودة الأسطح الخضراء على مستوى أحياء المدينة المنورة؛ تم الاعتماد على تصنيف المؤشرات الخاصة بجودة الأسطح الخضراء الغطاء النباتي اعتماداً على مؤشري (NDVI) و (EVI)؛ والصحة النباتية اعتماداً على تقييم الجفاف بواسطة مؤشر (VHI). ومن ثم تم جمع قيم هذه المتغيرات من خلال قيم متوسط المؤشر بكل حي للوصول إلى القيمة العامة لمتغير جودة الأسطح الخضراء وذلك في كل حي من أحياء منطقة الدراسة. وبالتالي تصنيف هذه الأحياء إلى مستويات بناءً على قيم

هذا المتغير؛ وتوضيح ذلك بالشكل (٩) والذي يبين فئات أحياء منطقة الدراسة بناءً على جودة الأسطح الخضراء. ويتضح من خلال الشكل أن الأحياء ذات الجودة المرتفعة في الأسطح الخضراء قليلة حيث لا تتجاوز ٧,٥٪ من أحياء المدينة وهي ٥ أحياء: الخاتم والشريبات؛ والبقية تتركز في شمال المدينة بالشهداء والعيون والصادقية.

وكذلك الحال بالنسبة للأحياء ذات الجودة المتوسطة إذ لا تتجاوز ١٨,٢٪ من إجمالي أحياء المنطقة بعدد ١٦ حي؛ وذلك في حي مسجد الدرع وبنى حارثة والعريض وبنى ظفر وقربان إلى جانب الجمعة والسيح والعهن وحي العصابة. والبقية بشمال المدينة في حي الغابة؛ وشمالها الغربي بحي البركة. وبغرب المدينة في حي الجامعة؛ وبشرقها بحيي الدويخلة ووادي مدين. بالإضافة إلى الجنوب الغربي بحي ذو الحليفة؛ وبالجانب الجنوبي بحي الحديقة. وتبلغ نسبة الأحياء المنخفضة بجودة الأسطح الخضراء في المدينة المنورة ٣٦,٣٪ بعدد ٣٢ حي؛ وذلك بحيي بني خدره والنقا. والأحياء السقيا والعنابس والمصانع وبنى عبد الأشهل والإسكان والخالدية والدويمة. وبالشمال الشرقي حي المطار؛ وفي الشمال الغربي حيي بئر عثمان والنخيل. وفي غرب المدينة المنورة تعتبر الأحياء القبليتين وجماء أم خالد والدفاع والعريزية ممثلة لهذه الفئة؛ والأحياء الهدراء وعين الخيف وجشم والملك فهد والمبعوث وشظاة بشرقها. وفي الجنوب الغربي الأحياء عروة والقصواء وأبو كبير؛ وبالجانب الشرقي الروابي والغراء والرمانة؛ وبالجانب الجنوبي الأحياء بني بياضة والسد ونبلاء ورهط. وترتفع نسبة الأحياء المنخفضة جداً بجودة الأسطح الخضراء حيث تبلغ ٣٩,٨٪ من أحياء المدينة بعدد ٣٥ حياً؛ حيث تمثل هذه الفئة مع الفئة السابقة أكثر من ٧٥٪ من إجمالي أحياء المدينة المنورة. وتمثل الأحياء الحرم الشريف وبنى النجار وبضاعة والمناخة هذه الفئة.

والأحياء بني معاوية والراية والفتح والأصيفرين وحي المغيسلة والظاهرة ووادي مهزور. وتتوزع البقية بحي جبل أحد بشمال المدينة؛ والأحياء التلعة والدار والشافية ووعيرة والنقمة بالشمال الشرقي؛ إلى جانب الأحياء الزهرة وكتانة والحفيا بالشمال الغربي. وتمثل الأحياء الجموات وطيبة والسلام وسكة الحديد والويرة هذه الفئة بغرب المدينة. بينما الشهباء والحساء وورقان وأبوبريقاء تمثلها بالجنوب



شكل رقم (٩) التباين المكاني لجودة الأسطح الخضراء الحضرية في المدينة المنورة (٢٠٢٢م).

المصدر: من إعداد الباحثين بالاعتماد على قيم المتغيرات التفسيرية.

شرط عدم ارتباط أخطاء النموذج ارتباط ذاتي مكاني. كما تنص فرضية العدم على أن نمط توزيع الظواهر هو نمط عشوائي، وبالتالي تُقبل فرضية العدم بناءً على نتائج التحليل حيث جاء نمط التوزيع Random بناءً على قيمة $Z\text{-score} = -1,472516$ ، مع احتمالية خطأ لهذه النتيجة $P\text{-value} = 0,140882$.

ويبين جدول (٥) نتائج تحليل (MGWR) حيث جاءت نسبة معامل التحديد $R^2 = 0,90$ وهذا يعني أن النموذج فسر ما نسبته ٩٠٪ من التباين المكاني لجودة الأسطح الخضراء في المدينة المنورة، كما جاءت نسبة معامل التحديد المصحح $\text{adjusted } R^2 = 0,89$.

الغربي؛ والأحياء الجابرة والرانوناء وشوران والسكب والجصة وجبل عير جنوب المدينة المنورة.

وبالتالي تعتبر أحياء المدينة المنورة ذات جودة متدنية جداً بالأسطح الخضراء؛ إذ أن حوالي ٧٦٪ من أحياء المدينة ذات جودة منخفضة إلى منخفضة جداً بهذه الأسطح؛ في مقابل ٢٣، ٩٪ من الأحياء ذات جودة متوسطة إلى مرتفعة بها. ولتحديد نسبة مساهمة كل متغير من المتغيرات الفرعية السابقة بالتباين المكاني لجودة الأسطح الخضراء في المدينة المنورة؛ تم الاعتماد على (MGWR).

وبتطبيق المعادلة (٦) تم معايرة النموذج وفحصه للتأكد من صلاحيته من حيث عدم وجود ارتباط ذاتي مكاني بين أخطاء النموذج، وذلك باستخراج الخطأ أو البواقي؛ والتأكد من عدم ارتباط أخطاء النموذج ارتباط ذاتي مكاني؛ والتأكد من عدم وجود مشكلة البيانات الخطية (تكرار البيانات). كما يظهر من الجدول (٤) الظواهر المتجاورة (وهي الخطأ في هذه الحالة) غير متشابهة وذلك بناءً على قيمة $\text{Moran's Index} = -0,113228$ حيث أثبت هذا النموذج بأنه يمكن الوثوق في تقديراته من حيث استيفاء

والمتغير التابع جودة الأسطح الخضراء علاقة دالة إحصائياً موجبة للمتغيرين الأول والثاني؛ وذات دلالة إحصائية سلبية للمتغير الثالث.

٤-٢ أولويات مواقع البنية التحتية الخضراء الحضرية حسب جودة الأسطح الخضراء

تم بناء نموذج تحليل القرار متعدد المعايير لتحديد المناطق الأكثر أولوية بالبنية التحتية الخضراء الحضرية حسب جودة الأسطح الخضراء في المدينة المنورة وذلك من خلال المعايير: الغطاء النباتي اعتماداً على مؤشري (NDVI) و (EVI)؛ والجفاف (الصحة النباتية) بواسطة مؤشر (VHI). وبالاعتماد على نموذج (MGWR)؛ تم ترتيب الأهمية لهذه المعايير كما يتضح من الجدول (٧). ومن ثم تم بناء مصفوفة المقارنة الزوجية بدلالة مقياس الأهمية لكل معيار من المعايير السابقة بالجدول (٨)؛ للوصول إلى الأوزان وتحديد درجة ثبات الحكم على ترتيب أهمية هذه المعايير.

جدول رقم (٥) نتائج تحليل الانحدار متعدد النطاقات الموزون جغرافياً (MGWR) لعلاقة جودة الأسطح الخضراء بالمتغيرات التفسيرية

GWR	MGWR	Statistic
٠,٩٠٥٤	٠,٩٠٥٢	R-Squared
٠,٨٩٤٦	٠,٨٩٧٢	Adjusted R-Squared
٦٠,٠١٦٩	٥٩,٧٢٩٨	AICc
٠,١٠٥٢	٠,١٠٢٧	Sigma-Squared
٠,٠٩٤٦	٠,٠٩٤٨	Sigma-Squared MLE
٧٩,١٥٢١	٨١,١٨٨٥	Effective Degrees of Freedom

المصدر: من إعداد الباحثين بالاعتماد على أدوات التحليل ببرنامج (ArcGIS Pro 3.0.1).

جدول رقم (٦) العلاقة بين المتغيرات التفسيرية والتباين المكاني لجودة الأسطح الخضراء

Mean	Standard Deviation	Minimum	Median	Maximum	Explanatory Variables
٠,٠١٠٩	٠,٠٠٥٨	٠,٠٠٠٤	٠,٠١٠٧	٠,٠٢٣١	Intercept
٠,٥٥٣٦	٠,٠١٩٤	٠,٥١٥٥	٠,٥٥٥٣	٠,٥٨٤٨	(NDVI)
٠,٣٠٤٥	٠,٠١٣٧	٠,٢٧٦٧	٠,٣٠٥٥	٠,٣٢٧٩	(EVI) الغطاء النباتي المحسن
٠,٢٥٩٠-	٠,٠٢٥٠	٠,٣٠٠١-	٠,٢٦٢٧-	٠,٢٠٢٧-	الجفاف (VHI)

المصدر: من إعداد الباحثين بالاعتماد على أدوات التحليل ببرنامج (ArcGIS Pro 3.0.1).

جدول رقم (٤) نتيجة I s ' (Global Moran) لنموذج (MGWR) لعلاقة جودة الأسطح الخضراء بالمتغيرات التفسيرية

Moran's Index	٠,١١٣٢٢٨-
Expected Index	٠,٠١٤٩٤-
Variance	٠,٠٠٤٧٧٣
Z-score	١,٤٧٢٥١٦-
P-value	٠,١٤٠٨٨٢

المصدر: من إعداد الباحثين بالاعتماد على أدوات التحليل ببرنامج (ArcGIS Pro 3.0.1).

وبالنسبة للمتغيرات التفسيرية وعلاقتها بالتباين المكاني للمتغير التابع وهو جودة الأسطح الخضراء في المدينة المنورة؛ فيوضحها الجدول (٦) والذي يشير إلى أن متغير الغطاء النباتي بناءً على مؤشر (NDVI) يحتل المرتبة الأولى بنسبة تفسير تبلغ ٥٥٪. يليه متغير الغطاء النباتي بناءً على مؤشر (EVI) بنسبة ٣٠٪. وبالمرتبة الثالثة الجفاف بنسبة ٢٦٪. حيث جاءت العلاقة بين هذه المتغيرات التفسيرية

جدول رقم (٩) نتائج عملية (AHP) لمعايير جودة الأسطح الخضراء

الوزن*	الأفضلية%	الرتبة	
٥٧١,٠	١,٥٧	١	الغطاء النباتي (NDVI)
٢٨٦,٠	٦,٢٨	٢	الغطاء النباتي المحسن (EVI)
١٤٣,٠	٣,١٤	٣	الجفاف (VHI)

المصدر: من إعداد الباحثين بالاعتماد على الموقع الإلكتروني (AHP Online System).

* من حساب الباحثان بناءً على قسمة الأفضلية على ١٠٠. واستخراج النتيجة النهائية والتي يوضحها الشكل (١٠): حيث يبين أولويات البنية التحتية الخضراء في المدينة المنورة حسب جودة الأسطح الخضراء والناطقة عن المجموعة الموزونة للمعايير الثلاثة التي تمثل جودة هذه الأسطح. ويتضح من خلال الشكل أن المواقع ذات أعلى مستوى من الأولوية تظهر باللون الأحمر والتي تتمثل في معظم أنحاء المدينة وخصوصاً الأطراف وهي المناطق الأقل جودةً بالأسطح الخضراء والأكثر أولوية أو احتياجاً من غيرها بالبنية التحتية الخضراء. والمناطق باللون البرتقالي مرتفعة الأولوية. في حين أن المناطق باللون الأصفر متوسطة الأولوية. وصولاً للمناطق باللون الأخضر الفاتح والتي توضح المواقع ذات الأولوية المنخفضة؛ في حين أن المناطق باللون الأخضر الغامق تدل على مستوى الأولوية المنخفض جداً بالبنية التحتية الخضراء بناءً على جودة الأسطح الخضراء. إذ تعتبر ٥٢% من مساحة المدينة المنورة ذات أولوية قصوى بالبنية التحتية الخضراء بناءً على جودة الأسطح الخضراء وذلك بإجمالي مساحة ٤,٣١٥ كم^٢. بينما ٢٦٧ كم^٢ ذات أولوية مرتفعة بهذه البنية إذ تمثل ٤٤,١% من إجمالي المساحة. بمعنى أن أكثر من ٩٦% من مساحة المدينة المنورة ذات أولوية قصوى ومرتفعة بالبنية التحتية الخضراء الحضرية بناءً على جودة الأسطح الخضراء. وتبلغ مساحة المناطق ذات الأولوية المتوسطة ٣,٨ كم^٢ بنسبة ٤,١%؛ في مقابل ١,٦ كم^٢ من المناطق ذات الأولوية المنخفضة والتي لا تتجاوز ١% من إجمالي المساحة؛ وكذلك الحال بالنسبة

جدول رقم (٧) ترتيب الأهمية لمعايير جودة الأسطح الخضراء بناءً على المقياس الترتيبي للأهمية النسبية بطريقة (AHP)

المعايير	ترتيب الأهمية
الغطاء النباتي (NDVI)	٩
الغطاء النباتي المحسن (EVI)	٧
الجفاف (VHI)	٥

المصدر: من إعداد الباحثين بالاعتماد على الجدول (٦).

جدول رقم (٨) مصفوفة المقارنة الزوجية لمعايير جودة الأسطح الخضراء

الجفاف (VHI)	الغطاء النباتي المحسن (EVI)	الغطاء النباتي (NDVI)	
٤	٢	١	الغطاء النباتي (NDVI)
٢	١	٢/١	الغطاء النباتي المحسن (EVI)
١	٢/١	٤/١	الجفاف (VHI)

المصدر: من إعداد الباحثين بالاعتماد على ترتيب الأهمية في الجدول (٧).

وقد تم إعطاء كل طبقة من الطبقات الخلوية وزناً تبعاً لأهمية هذه الطبقة في تحديد المواقع الأكثر أولوية بالبنية التحتية الخضراء من خلال عملية (AHP) كما في الجدول (٩)؛ وقد بلغت نسبة الاتساق لمنع التحيز للمعايير الموزونة 0.0% Consistency Ratio (CR) وبالتالي تعتبر المعايير المستخدمة ثابتة وذات اتساق ممتاز فيما بينها وتوزيع الوزن بين هذه المعايير مثالي. ومن ثم تم القيام بعملية جبر الخرائط من خلال الأداة (Raster Calculator) وتطبيق المعادلة (٧):

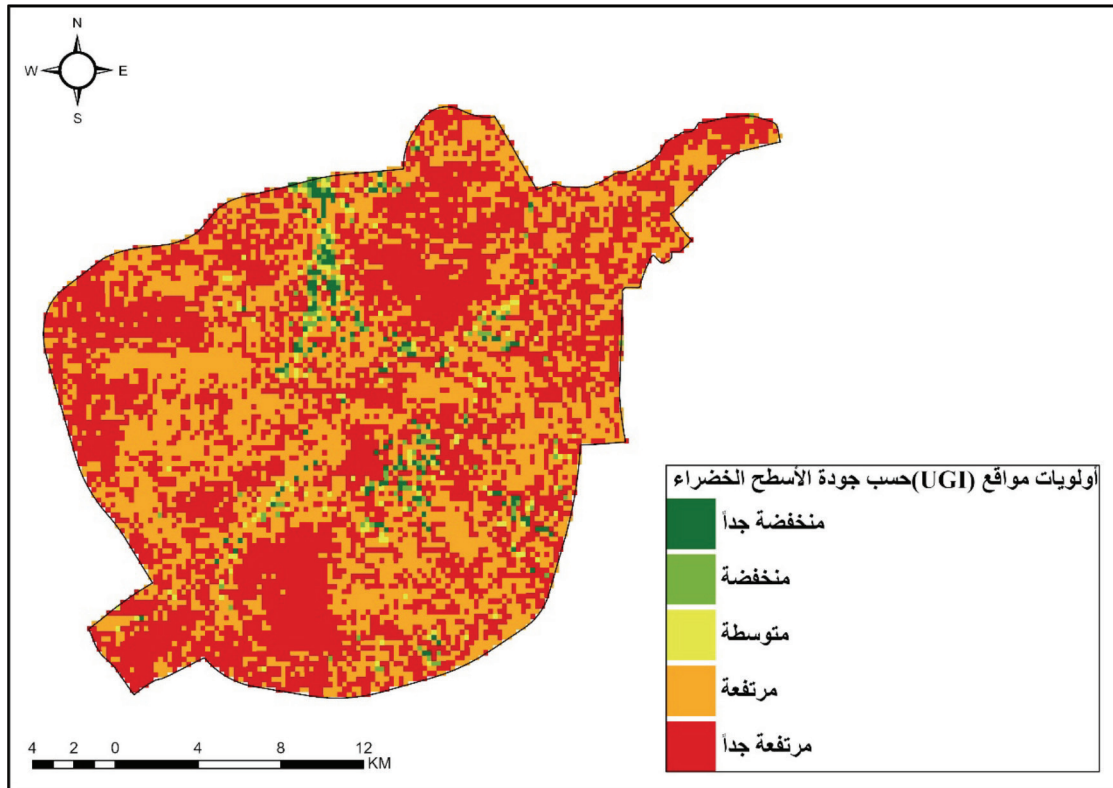
$$\text{(المعيار ١} \times \text{الوزن ١)} = (٥٧١,٠ \times \text{NDVI})$$

$$\text{(المعيار ٢} \times \text{الوزن ٢)} = (٢٨٦,٠ \times \text{EVI})$$

$$\text{(المعيار ٣} \times \text{الوزن ٣)} = (١٤٣,٠ \times \text{VHI})$$

حيث أن:

للمناطق المنخفضة جداً بأولوية (UGI) حسب جودة
الأسطح الخضراء حيث لا تتجاوز ١,٥% بمساحة ٢,٩ كم^٢
وذلك كما يشير الجدول (١٠).



شكل رقم (١٠) أولويات مواقع البنية التحتية الخضراء الحضرية حسب جودة الأسطح الخضراء في المدينة المنورة (٢٠٢٢م).

المصدر: من إعداد الباحثين بالاعتماد على الأداة (Raster Calculator) ببرنامج (ArcGIS Pro 3.0.1).

٥- الخاتمة

تناولت هذه الدراسة التخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء الحضرية (UGI) بحسب وظيفة الاتصال بالطبيعة والتي تم الاعتماد على جودة الأسطح الخضراء كمقياس لها، فمن خلال البيانات الضخمة في الاستشعار عن بعد بالخدمة السحابية Google Earth Engine (GEE) باستخراج المؤشرات التي تم الاعتماد عليها كمعايير تخطيطية وهي (NDVI) و (EVI) و (VHI)، وبالتكامل مع نظم المعلومات الجغرافية بتطبيق النماذج (MGWR) و (GISP) و (MCDA) تم تحليل التباين المكاني لجودة الأسطح الخضراء على مستوى الأحياء في المدينة المنورة. وكذلك تم تحديد أولويات مواقع البنية التحتية الخضراء الحضرية (UGI) حسب جودة الأسطح الخضراء المعايير التي تم اشتقاقها ومن خلال ٥ مستويات تمثل هذا الأولويات.

جدول رقم (١٠) أولويات مواقع البنية التحتية الخضراء الحضرية حسب جودة الأسطح الخضراء

الأولوية	المساحة / كم ^٢	%
منخفضة جداً	٢,٩	٥,١
منخفضة	١,٦	١
متوسطة	٣,٨	٤,١
مرتفعة	٢٦٧	١,٤٤
مرتفعة جداً	٤,٣١٥	٥٢
الإجمالي	٦٠٦	١٠٠

المصدر: من إعداد الباحثين بالاعتماد على الشكل (١١) ببرنامج (ArcGIS Pro 3.0.1).

المراجع العربية

- * أمانة المدينة المنورة. (٢٠١٧). التقرير الأول: تقييم المخطط الإرشادي للمدينة المنورة المعد ١٤١٣. المدينة المنورة.
- * الصافي، سلافة صلاح الدين. (٢٠٢٢). " رصد تغير المسطحات الخضراء باستخدام التقنيات الجيومكانية في محافظة العلا- المملكة العربية السعودية". مجلة الدراسات الإنسانية والأدبية. جامعة كفر الشيخ. كلية الآداب. (٢٦). ص ص ٨٤٩-٨٣٣.
- * عبد الكريم، أشرف أحمد. (٢٠١٩). التخطيط الحضري للمناطق الخضراء في حاضرة الدمام بالمملكة العربية السعودية اعتماداً على نماذج إمكانية الوصول وتخصيص الموقع في نظم المعلومات الجغرافية. المؤتمر الدولي للمعلومات الجغرافية، ٧-٢/٥/١٤٤٠، الرياض، المملكة العربية السعودية.
- * عبدالامير، دنيا وحيد. طالب، رفل إبراهيم. (٢٠٢٣). "تطور خدمات البنية التحتية الخضراء في ريف جانب الكرخ من مدينة بغداد". مجلة الجامعة العراقية. (٦٠). ص ص ٧٤٣-٧٥٢.
- * عبدالملك، محمد هاني سعيد. (٢٠٢٢). "تقييم المناخ التفصيلي للمساحات الخضراء في مدينة أسيوط الجديدة". المجلة العلمية لكلية الآداب. جامعة أسيوط. كلية الآداب. (٨١). ص ص ٩١٣-٩٨٨.
- * الكناني، عامر. نجم، حيدر. (٢٠١٧). "تقييم توزيع المناطق الخضراء في مدينة الديوانية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية". مجلة المخطط والتنمية. (٣٦): ١-٣٨.

المراجع غير العربية

- * Baró, F. (2016). " Urban Green Infrastructure: Modeling and mapping ecosystem services for sustainable planning and management in and around cities". Ph.D. Dissertation. Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).
- * Bento, V. Trigo, I. Gouveia, C. Da-Camara, C. (2018). "Contribution of Land Surface Temperature (TCI) to Vegetation

ومن أهم النتائج التي توصلت إليها الدراسة:

- ١- انخفاض جودة الأسطح الخضراء في المدينة المنورة بشكل عام؛ حيث أن الأحياء ذات الجودة المرتفعة بهذه الأسطح قليلة ولا تتجاوز ٥٪ من إجمالي الأحياء، بينما الأحياء المنخفضة جداً والمنخفضة بجودة هذه الأسطح تتجاوز ٧٥٪.
- ٢- لا يوجد تجانس في التوزيع المكاني للأسطح الخضراء على مستوى الأحياء.
- ٣- ساهم مؤشر (NDVI) بنسبة ٥٥٪ في تفسير التباين المكاني لجودة الأسطح الخضراء في المدينة المنورة؛ في حين ساهم مؤشر (EVI) بنسبة ٣٠٪؛ في مقابل نسبة مساهمة ٢٦٪ لمؤشر (VHI).
- ٤- المواقع ذات أعلى مستوى من الأولوية بالبنية التحتية الخضراء الحضرية (UGI) تتمثل في معظم أنحاء المدينة خصوصاً في الأطراف، وأن ٥٢٪ من مساحة المدينة ذات أولوية قصوى بـ(UGI)؛ في مقابل ٥,١٪ ذات أولوية منخفضة جداً.

وتوصي الدراسة بما يلي:

- ١- الاستفادة من البيانات الضخمة مفتوحة المصدر وجمع البيانات المحلية وإدارتها من خلال إنشاء قاعدة بيانات مكانية شاملة تحتوي على طبقات البيانات ذات الصلة.
- ٢- إجراء النمذجة المكانية القائمة على السيناريوهات لتقييم التأثيرات المحتملة لسيناريوهات التنمية المختلفة على توزيع البنية التحتية الخضراء وخدمات النظام البيئي.
- ٣- تنفيذ تقنيات نموذج التخطيط المكاني للبنية التحتية الخضراء (GISP) من خلال نموذج تحليل القرار متعدد المعايير (MCDA) لتحديد أولويات تدخلات (UGI) بناءً على معايير متعددة.
- ٤- تطوير خطة شبكة البنية التحتية الخضراء التي تحدد المجالات ذات الأولوية لتنفيذ (UGI) بناءً على نتائج النمذجة المكانية وتقييم خدمة النظام البيئي.
- ٥- الاعتماد على المؤشرات لمراقبة وتقييم فعالية تدخلات (UGI) من خلال دمج تقنيات الاستشعار عن بعد المتقدمة مع المنصات الوطنية المتخصصة لتعزيز كفاءة ودقة جهود مراقبة (UGI).

"Multi-Criteria Decision Analysis in Environmental Sciences: Ten Years of Applications and Trends". *Science of The Total Environment*. (19). 3578-3594.

* Jankowski, P. Nyerges, T. (2001). "GIS for group decision making". New York, NY: Taylor & Francis. 1-25.

* Kogan, F. (1997). "Global droughts watch from space". *Bulletin of the American Meteorological Society* (78). 621–636.

* Kogan, F. (2001). "Operational space technology for global assessment". *Bulletin of the American Meteorological Society*. (82). 1949-1964.

* Kremer, P. Hamstead, ZA. McPhearson, T. (2016). "The value of urban ecosystem services in New York City: A spatially explicit multicriteria analysis of landscape scale valuation scenarios". *Environmental Science and Policy*. (62).57–68.

* Lennon, M. Scott, M. (2014). "Delivering ecosystems services via spatial planning: Reviewing the possibilities and implications of a green infrastructure approach". *Town Planning Review*. (85). 563-587.

* Liu, H. Huete, A. (1995). "A feedback-based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. (33). 457–465.

* Malczewski, J. (2006). "GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature". *International Journal of Geographical Information Science*. (20). 703–726.

* Mazza, L. Bennett, G. De Nocker, L. Gantioler, S. Losarcos, L. Margerison, C.

Health Index: A Comparative Study Using Clear Sky and All-Weather Climate Data Records". *remote sensing*. (10). 1-20.

* Bhuiyan, C. (2008). "Desert Vegetation During Droughts: Response and Sensitivity". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. (8). 907-912.

* Christman, Z. Meenar, M. Mandarano, L. Hearing, K. (2018). "Prioritizing suitable locations for green stormwater infrastructure based on social factors in Philadelphia". *Land*. (7).1-17.

* Eastman, J. (2009). "IDRISI Taiga: guide to GIS and image processing". Worcester, MA: Clark Labs.

* Fotheringham, A. Charlton, M. Brunson, C. (1998). "Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis". *Environment and Planning*. (30). 1905–1927.

* Goodspeed, R. Liu, R. Gounaridis, D. Lizundia, C. Newell, J. (2022). "A regional spatial planning model for multifunctional green infrastructure". *Urban Analytics and City Science*. (29). 815–833.

* Hanna, E. Bruno, D. Comín, F. (2023). "The ecosystem services supplied by urban green infrastructure depend on their naturalness, functionality, and imperviousness". *Urban Ecosystems*. (22). 187-202.

* Hansen, R. Rolf, W. Pauleit, s. (2017). "Urban Green Infrastructure A foundation of attractive and sustainable cities Pointers for municipal practice". federal agency for nature conservation. Germany.

* Huang, I. Keisler, J. Linkov, I. (2011).

* Pauleit, S. Liu, LAhern, J. Kazmierczak, A. (2011). "Multifunctional green infrastructure planning to promote ecological services in the city". In Urban ecology. Patterns, processes, and applications, ed. J. Niemela, 272–285. Oxford: Oxford University Press.

* Rouse, J. Haas, R. Schell, J. Deering, D. (1973). "Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS". 3rd ERTS Symposium. NASA SP-351, Washington DC. 10-14 December. 309-317.

* Saaty, R. (1987). "The Analytic Hierarchy Process-What It Is and How It Used". Math Modelling. (9). 161-176.

* Tamiminia, H. Salehi, B. Mahdianpari, M. Quackenbush, L. Adeli, S. Brisco, B. (2020). "Google Earth Engine for geo-big data applications: a meta-analysis and systematic review". ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens. (164). 152–170.

* Veerkamp, C. Loreti, M. Benavidez, R. Jackson, B. Schipper, A. (2023). "Comparing three spatial modeling tools for assessing urban ecosystem services". Ecosystem Services. (59). 1-12.

* Zhang, S. Ramírez, F. (2019). "Assessing and mapping ecosystem services to support urban green infrastructure: The case of Barcelona, Spain". Cities. (92). 59–70.

المواقع الإلكترونية:

AHP Online System

<https://bpmmsg.com/ahp/>

Earth Engine Data Catalog

<https://developers.google.com/earth-engine/datasets>

Kaphengst, T. McConville, A. Rayment, M. ten Brink, P. Tucker, G. van Diggelen, R. (2011). "Green Infrastructure Implementation and Efficiency". Final report for the European Commission. DG Environment on Contract ENV. Institute for European Environmental Policy. Brussels and London.

* Meel, I. (2009). "Can green infrastructure promote urban sustainability?". Engineering Sustainability. (26). 23-34.

* Meerow, S. Newell, JP. (2017). "Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit". Landscape and Urban Planning (159). 62–75.

* Morani, A. Nowak, DJ. Hirabayashi, S. Calfapietra, C. (2011). "How to select the best tree planting locations to enhance air pollution removal in the Million Trees NYC initiative". Environmental Pollution. (159). 1040-1047.

* Oosterbroek, B. de Kraker, J. Huynen, M. Martens, P. (2023). "Assessment of green space benefits and burdens for urban health with spatial modeling". Urban Forestry & Urban Greening. (86). 1-18.

* Oshan, T. Li, W. Kang, L. Wolf, J. Fotheringham, A. (2019). "mgwr: A Python implementation of multiscale geographically weighted regression for investigating process spatial heterogeneity and scale". ISPRS International Journal of Geo-Information (8). 1-31.

* Pakzad, P. Osmond, P. (2015). "A Conceptual Framework for Assessing Green Infrastructure Sustainability Performance in Australia". The State of Australian Cities Conference. 1-14.

NOAA Star, Center For Satellite application and research, STAR - Global Vegetation Health Products: Browse Archived Image of selected administrative region, accessed on date 3\3\2022 From:

https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browseVH.php

د. أروى عبدالعزيز سالم الصاعدي
د. محمد سعد المقرئ

النهضة المكانية للبنية التحتية الخضراء الحضرية:
لتعزيز وظيفة الاتصال بالطبيعة في المدينة المنورة

