



ديناميكيات النمو العمراني ومحاكاة تغيراته في مدينة الدمام باستخدام نموذج تقييم تغيير استخدام الأرض (MOLUSCE)

ملیحة حامد العبدلی

أستاذ مشارك قسم الجغرافیا، كلية العلوم الاجتماعية، جامعة أم القرى، مكة المكرمة، المملكة العربية السعودية
البريد الإلكتروني: mhabdaly@uqu.edu.sa

المخلص

يهدف البحث إلى تحليل ديناميكيات أغطية واستعمالات الأرض (LULC) بمدينة الدمام (2016-2026م)، واستشراف التحولات المكانية للنمو العمراني حتى عام 2056م. اعتمدت المنهجية على التصنيف الموجه لمرئيات (Sentinel-2) لإنتاج خرائط الأساس، وتوظيف نموذج (MOLUSCE) في بيئة (QGIS)، مدعوماً بالشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) والخلايا التلقائية. واستند التنبؤ إلى دمج الطبقات التاريخية مع محددات بيئية (الارتفاع، والأودية) ومعايير وصولية وتنمية (المباني، والطرق ونوعيتها، والخدمات). كشفت النتائج أنه في عام 2016م تصدرت الرواسب الرملية المساحة بنسبة 48.36% (162.92 كم²)، تلتها المباني بنسبة 23.92%، ثم الطرق (14.63%)، والمياه (9.3%)، والغطاء النباتي (3.99%). وبحلول عام 2026م، حدث تحول جذري؛ إذ قفزت المباني للمرتبة الأولى بنسبة 40.6% (136.8 كم²)، وتراجعت الرواسب إلى 29.25%، بينما نمت الطرق والغطاء النباتي إلى 18.66% و6.18%، وانكمشت المياه إلى 5.31%. وتؤكد مخرجات النمذجة (2036-2056م) استمرار التوسع الحضري تصاعدياً على حساب الأغطية الطبيعية؛ حيث تُشير دالة التنبؤ لعام 2056م إلى هيمنة الكتلة المبنية بنسبة 60.33% (203.27 كم²) والطرق بنسبة 23.1%، في حين ينحسر تمثيل الرواسب الرملية، والغطاء النباتي، والأسطح المائية إلى (10.8%)، (3.1%، 2.67%) على التوالي من إجمالي مساحة المدينة.

الكلمات المفتاحية: النمو العمراني، الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN)، وحدات محاكاة تغير استخدام الأرض ((MOLUSCE))، مدينة الدمام، مرئيات سينتال (Sentinel-2).



Urban Growth Dynamics and Simulation of Changes in Dammam City Using the Land Use Change Assessment Model (MOLUSCE)

Maliha Hamed Al-Abdali

Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Umm Al-Qura University, Makkah, Saudi Arabia

Email: mhabdaly@uqu.edu.sa

ABSTRACT

This research analyzes land use/land cover (LULC) dynamics in Dammam (2016–2026) and projects urban growth spatial transformations until 2056. The methodology applied supervised classification to Sentinel-2 imagery for baseline maps, utilizing the MOLUSCE model in QGIS, supported by Artificial Neural Networks (ANN) and Cellular Automata. Spatial forecasting integrated historical layers with environmental determinants (elevation, wadis) and accessibility/development criteria (buildings, services, road network and quality).

Results revealed that in 2016, sand deposits dominated at 48.36% (162.92 km²), followed by buildings (23.92%), roads (14.63%), water (9.3%), and vegetation (3.99%). By 2026, a radical shift occurred; buildings climbed to the first rank at 40.6% (136.8 km²), sand deposits dropped to 29.25%, while roads and vegetation grew to 18.66% and 6.18%, and water contracted to 5.31%. Modeling outputs (2036–2056) confirm continuous upward urban expansion at the expense of natural covers. The 2056 projection indicates the dominance of built-up areas at 60.33% (203.27 km²) and roads at 23.1%, whereas sand deposits, vegetation, and water surfaces will recede to 10.8%, 3.1%, and 2.67%, respectively, of the city's total area.

Keywords: Urban growth, Artificial Neural Network (ANN), Modules for Land Use Change Evaluation (MOLUSCE), Dammam City, Sentinel-2 satellite.

مقدمة:

يشير "غطاء الأرض" (LC) إلى السمات الطبيعية لسطح الأرض كالغطاء النباتي والأرض الزراعية، بينما يشير "استخدام الأرض" (LU) إلى أنماط استغلال الإنسان للأرض مثل الإسكان والزراعة والبنية التحتية (Ahmad et al., 2022, p. 32986). وتُعد دراسة تغيرات الأغشية والاستعمالات الأرضية مهمة في التخطيط الحضري والإدارة البيئية وإدارة الموارد الطبيعية، لما لها من دور في التنبؤ بالتغيرات المستقبلية وتقليل المخاطر المحتملة (Wang et al., 2023, p. 13؛ Beroho et al., 2023, p. 3). كما أسهمت خوارزميات النمذجة الحديثة في تحليل الغطاء الأرضي عبر الزمن والتنبؤ باتجاهاته المستقبلية (Ramadan and Hidayati, 2022, p. 345).

يُعد نموذج (MOLUSCE) اختصاراً لـ (Modules for Land Use Change Evaluation)، وهو إضافة برمجية تُستخدم داخل بيئة (QGIS) لأغراض متعددة، منها: تحليل تغيرات الغطاء الأرضي، ومحاكاة التوسع العمراني، والتنبؤ باستخدامات الأرض المستقبلية، وتقييم العوامل المؤثرة في النمو الحضري. تعتمد آلية عملها على دمج خرائط استخدام الأرض لسنوات مختلفة، مع طبقات العوامل المؤثرة كشبكة الطرق، والارتفاع، والقرب من المراكز الحضرية. يوظف النموذج خوارزميات تعلم آلي متقدمة، مثل الشبكات العصبية الاصطناعية، والانحدار اللوجستي، والأتمتة الخلوية، والغابات العشوائية، وذلك لمحاكاة أنماط التوسع العمراني المتوقعة في المستقبل (Kumari and Roy, 2024, p. 83).

أصبح نموذج (QGIS MOLUSCE) أداة فعالة لمحاكاة سيناريوهات استخدامات الأرض المستقبلية عبر إنشاء مصفوفات احتمالية التغير بالاعتماد على منهجية (CA-ANN) وأساليب مثل الانحدار اللوجستي والشبكات العصبية الاصطناعية وأوزان الأدلة (Baghel, et al, 2024, p. 3). كما يوفر النموذج خوارزميات متعددة للتنبؤ بالغطاء الأرضي المستقبلي، وتُعد خوارزميات الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) والأتمتة الخلوية (CA) من أكثرها شيوعاً في المحاكاة والتنبؤ المكاني (Osman, et al, 2023, p. 2؛ Boakye, et al, 2020, p. 85).

شهدت المدن السعودية، ومنها الدمام، توسعاً عمرانياً متسارعاً بفعل النمو السكاني والتنمية الاقتصادية المرتبطة برؤية 2030، مما أدى إلى تغيرات في استخدامات الأرض، وضغوط متزايدة على البنية التحتية والموارد البيئية، وتراجع المساحات المفتوحة. لذا تبرز أهمية دراسة ديناميكيات النمو العمراني باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بُعد والنماذج المكانية الحديثة، ويُعد نموذج (MOLUSCE) من أبرز الأدوات المستخدمة لمحاكاة هذه التغيرات والتنبؤ بالنمو العمراني المستقبلي.

تشهد الدمام توسعاً عمرانياً متسارعاً أدى إلى تغيرات واضحة في بنيتها الجغرافية وخصائصها البيئية، تمثلت في إحلال الأنشطة الحضرية الحديثة محل الأغشية الطبيعية، بما فيها الرواسب الرملية والغطاء النباتي والسبخات الساحلية. وقد نتج عن ذلك تحديات بيئية متزايدة، أبرزها تراجع التنوع الحيوي وارتفاع التأثيرات الحرارية للمساحات العمرانية، مما أسهم في تفاقم تغير استعمالات الأرض وزيادة الضغوط على الاستدامة البيئية (Baig, et al., 2022, p. 3).

تُعد نماذج محاكاة تغير استعمالات الأرض، خاصة عند دمجها بخوارزميات الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، أدوات تحليلية فعالة لفهم التحولات المكانية والتنبؤ باتجاهاتها المستقبلية بدقة علمية (Mandal, et al., 2023, p. 2). كما تسهم التنبؤات المستقبلية في دعم استراتيجيات تخطيط وإدارة استخدامات الأرض، فيما تمثل الحوسبة الآلية أداة مهمة لفهم ديناميكيات أنظمة استخدام الأرض (Khwarahm, et al, 2021, p. 5)؛ Tewabe (and Fentahun, 2020).

تسعى هذه الدراسة إلى فهم آليات وديناميكيات التوسع الحضري في مدينة الدمام، من خلال نمذجة واستشراق تغير أغشية واستعمالات الأرض (LULC) بنموذج MOLUSCE في بيئة QGIS. وتبرز الأهمية المنهجية لهذا النموذج في قدرته على دمج خوارزميات "سلاسل ماركوف" لتحديد احتمالات الانتقال الكمي، والأتمتة الخلوية لتحديد التوزيع المكاني للنمو. وتنتج هذه المنظومة الرياضية معالجة التفاعل الديناميكي بين البيانات التاريخية (2016-2026م) والمتغيرات التفسيرية كالمحددات البيئية، وسهولة الوصول، والمؤشرات الاقتصادية والاجتماعية؛ مما يوفر أداة رصينة لتشخيص الاتجاهات العمرانية، وفهم محرركاتها، ورسم ملامح التوسع الحضري المستقبلي بحلول عام 2036م، بما يدعم خطط التنمية المستدامة.

مشكلة البحث:

تشهد مدينة الدمام توسعاً عمرانياً متسارعاً أدى إلى تحولات مستمرة في استخدامات الأرض، غير أن هذه التحولات تفتقر إلى دراسات كافية تتناول ديناميكياتها المكانية والزمنية وأثارها المستقبلية. وتكمن مشكلة البحث في غياب نموذج تنبؤي مكاني دقيق يحدد اتجاهات النمو العمراني المستقبلية وتغير استخدامات الأرض في المدينة، مما يسهم في دعم متخذي القرار لتحقيق التخطيط الحضري المستدام.

تساؤلات البحث

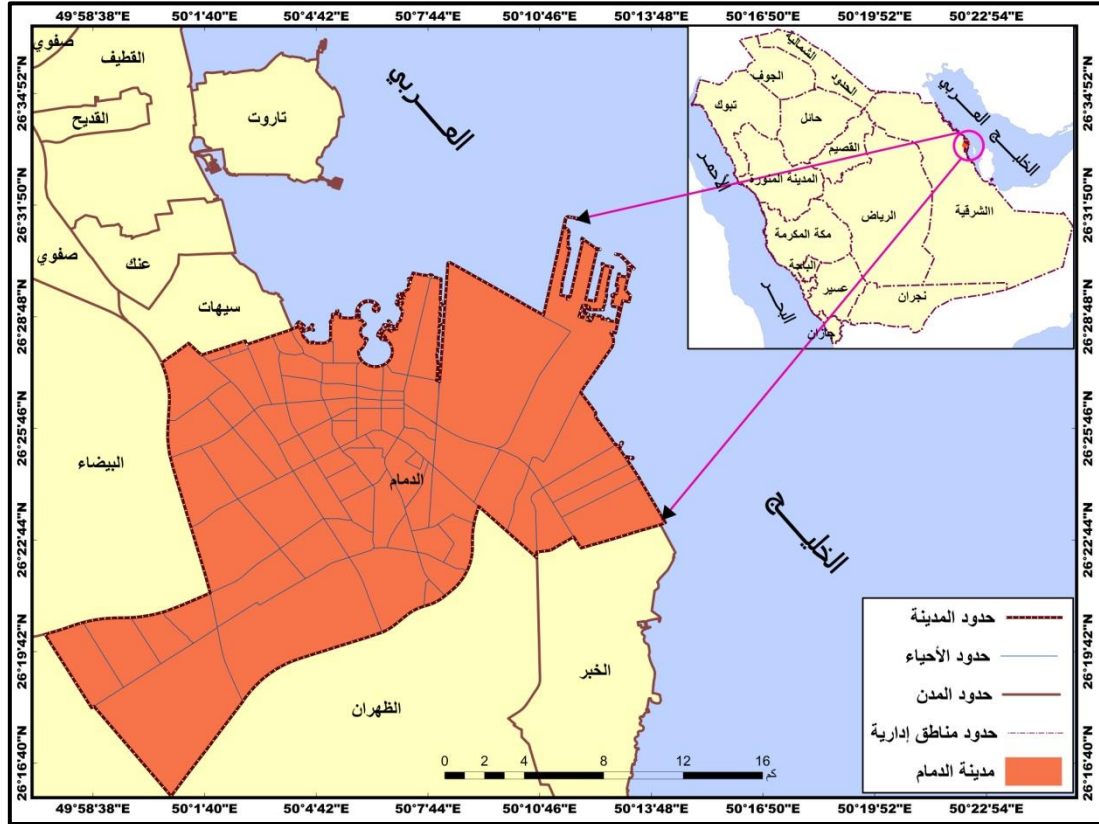
1. ما طبيعة أغطية واستعمالات الأرض في مدينة الدمام خلال فترة الدراسة؟
2. ما أنماط واتجاهات النمو العمراني في المدينة بين عامي 2016-2026م؟
3. ما مدى كفاءة نموذج (MOLUSCE) في محاكاة تغير استخدامات الأرض؟
4. كيف سيكون شكل النمو العمراني المستقبلي في مدينة الدمام وفق سيناريوهات المحاكاة؟

أهداف البحث:

1. إنتاج خرائط أغطية واستعمالات الأرض في مدينة الدمام عامي 2016 - 2026م.
2. رصد وتحليل التغيرات المكانية لأغطية واستعمالات الأرض بين عامي 2016 - 2026م.
3. بناء نموذج محاكاة للتغيرات المستقبلية.
4. التنبؤ باتجاهات النمو العمراني باستخدام نموذج محاكاة (MOLUSCE).

أهمية البحث: البحث يكتسب قيمته العلمية من كونه يربط بين النظرية الجغرافية (فهم التوسع العمراني)، والتكنولوجيا الحديثة (GIS والاستشعار عن بُعد)، والنمذجة الرياضية الذكية (MOLUSCE)، مما يجعله مرجعاً هاماً لمتخذي القرار ومخططي المدن. أما الأهمية التطبيقية، فتتمثل في دعم صُنَّاع القرار في مجال التخطيط الحضري، والمساعدة في إدارة استخدامات الأرض بكفاءة، وتعزيز التنمية العمرانية المستدامة في مدينة الدمام.

حدود البحث: تتمثل الحدود المكانية لهذا البحث بمدينة الدمام التي تقع مكانياً كما يظهر شكل (1) شرق المملكة العربية السعودية على ساحل الخليج العربي وتتبع ادارياً المنطقة الشرقية، وتقع المدينة فلكياً بين دائرتي عرض (17°، 15'، 26°) و (50°، 31'، 26°) شمالاً وخطي طول (20°، 40'، 49°) و (55°، 13'، 50°) شرقاً، بمساحة بلغت 336.97 كم²، وتضم المدينة 108 حياً سكنياً. اما الحدود الزمنية لهذا البحث تغطي الفترة الممتدة من عام 2016 إلى عام 2026، مع إجراء محاكاة مستقبلية تمتد حتى عام 2056. وتتمثل الحدود الموضوعية بتحليل النمو العمراني وتغير استخدام الأرض بالاعتماد على نموذج (MOLUSCE).



شكل رقم (1) موقع مدينة الدمام

مصطلحات البحث:

ديناميكية استخدامات الأرض: يُشير إلى «العملية التفاعلية المتغيرة والمستمرة التي تطرأ على مظهر الأرض بمرور الوقت، نتيجة تداخل الأنشطة البشرية مع المكونات الطبيعية». وبمفهوم موجز، يعني «دراسة ميزانية التحول المكاني والزمني للأرض»؛ لاستيعاب أثر الماضي والحاضر في تشكيل المشهد الجغرافي الراهن، واستشراف انعكاساته على مستقبل النمو الحضري.

نظريات النمو الحضري: مجموعة من الأطر الفكرية والنماذج التفسيرية (المكانية والاقتصادية) التي صاغها علماء الجغرافيا والاقتصاد وعلم الاجتماع الحضري لتفسير كيفية توسع المدن، وتشكل بنيتها الداخلية، وآلية توزيع الاستعمالات المختلفة للأراضي (سكنية، تجارية، صناعية) عبر الزمن.

النمذجة: العملية التي يتم من خلالها بناء نماذج رياضية أو حاسوبية تحاكي الواقع، سواء الحالية أو التاريخية، بهدف استشراف ملامحها وأنماطها المكانية أو الكمية في المستقبل وفق سيناريوهات معينة.

الشبكة العصبية الاصطناعية: هي إحدى الفروع الرئيسية لعلوم الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي (Machine Learning)، وهي عبارة عن أنظمة برمجية ورياضية مصممة ومحاكية لطريقة عمل الخلايا العصبية البيولوجية في الدماغ البشري.

الامتة الخلوية: هي نموذج رياضي وحاسوبي يُستخدم لنمذجة ومحاكاة الأنظمة الديناميكية المعقدة التي تتغير عبر الزمان والمكان، تعتمد على فكرة تقسيم الفضاء إلى شبكة من الخلايا (مثل خلايا بكسل الصورة)، حيث تتأثر كل خلية بحالة الخلايا المجاورة لها مباشرة وفقاً لقواعد محددة وثابتة.

نموذج (MOLUSCE): هو عبارة عن حزمة برمجية (Plugin) مفتوحة المصدر مصممة خصيصاً للعمل داخل بيئة نظم المعلومات الجغرافية (QGIS)، طُوّر هذا النموذج من قبل مؤسسة (NextGIS) بالتعاون مع

معهد آسيا للتكنولوجيا (AIT)، ليكون أداة جغرافية متكاملة لتحليل ونمذجة واستشراف التغيرات المكانية والزمانية في أغطية واستعمالات الأرض (LULC).

الإطار النظري والدراسات السابقة: يستند البحث إلى إطار فكري ومنهجي يجمع بين نظريات التطور الحضري والتقنيات الجيومعلوماتية الحديثة في نمذجة التحولات المكانية. ويركز المحور الأول على ديناميكيات تغير استخدامات وأغطية الأرض (LULC) بوصفها عملية تفاعلية ناتجة عن عوامل طبيعية وبشرية تؤدي إلى تحول الأغذية الطبيعية إلى بيئات عمرانية مع الزمن. وفي المدن الساحلية كمدينة الدمام، يتأثر هذا التوسع بمجموعة من المحددات الطبيعية، مثل الطبوغرافيا ومخاطر السيول، إلى جانب المحددات التنموية المرتبطة بشبكات الطرق والخدمات التي تسهم في توجيه الامتداد العمراني وفق مفهوم الوصلية المكانية.

ثانياً: النمذجة الجغرافية والمحاكاة المكانية: اتجهت الجغرافيا الحديثة نحو النمذجة التنبؤية لمحاكاة التحولات المكانية ودعم اتخاذ القرار. ويعتمد البحث على نموذج (MOLUSCE) ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية، من خلال دمج الشبكات العصبية الاصطناعية لتحليل العلاقات المعقدة بين المحددات الجغرافية والنمو العمراني، مع الخلايا التلقائية (CA) التي تفسر التغير المكاني وفق تأثير الجوار الجغرافي.

ثالثاً: الخصوصية المكانية لمدينة الدمام: تنبع أهمية الدراسة من خصوصية مدينة الدمام بوصفها مركزاً اقتصادياً وتنموياً رئيسياً شرق المملكة، شهد توسعاً عمرانياً متسارعاً مرتبطاً بخطط التنمية ورؤية المملكة، مما يستدعي توظيف نماذج مكانية لدعم التخطيط الحضري المستدام وإدارة الموارد الأرضية بكفاءة.

أما فيما يتعلق بالدراسات السابقة يمكن تصنيفها إلى دراسات النمو العمراني، واستخدامات الأرض، والمحاكاة المكانية، بالإضافة إلى دراسات طبقت نموذج (MOLUSCE) وكما يأتي:

قامت دراسة (Eman and Gawali, 2022) بنمذجة تغير استخدام الأرض في مدينة صنعاء اليمنية باستخدام نموذج (MOLUSCE) قدمت الدراسة بكشف التغيرات الفعلية والمتوقعة بناء على تصنيف مرئيات لاندسات للأعوام 2005، 2010، 2015، 2020، والتنبؤ بتغيرات استخدام الأرض للأعوام 2010، 2015، 2020، 2025، و2030م، وأظهرت النتائج دقة وموثوقية النموذج في التنبؤ بالتغيرات الأرضية، وذلك لانخفاض الفرق بين القيم الفعلية والمتوقعة لعام 2010م.

تطرقت دراسة (Kumari and Roy, 2024) لمحاكاة استخدامات الأرض وتغطيتها باستخدام (MOLUSCE) بمنطقة غرب الهيمالايا في الهند، كان هدف الدراسة توقع استخدامات الأرض وتغطيتها وتقييم التغيرات المتوقعة حتى عام 2055، في هذه الدراسة، وبدأت الدراسة بمعايرة النموذج والتحقق من صحته، وأظهر النهج القائم على الشبكات العصبية الاصطناعية دقة إجمالية بلغت 82% في هذه الدراسة، مما يؤكد فعالية النموذج، ثم تمت معايرة النموذج باستخدام بيانات استخدام الأرض وتغطيتها لعامي 1975 - 2015 لتوقع سيناريو استخدام الأرض وتغطيتها عام 2055م.

وظفت دراسة (Baghel et al., 2024) نموذج (MOLUSCE) في بيئة (QGIS) لتحليل تغيرات استخدامات الغطاء الأرضي (LULC) في حوض نهر ماند بين 2001 و2021 والتنبؤ بامتداداتها حتى 2030 و2040. اعتمدت على التصنيف الموجه ونموذج (CA-ANN) للتنبؤ، وحققت دقة تتراوح بين 82% و90% ومعامل كبا بين 0.79 و0.88. وأظهرت النتائج زيادة في الأرض الزراعية وبعض الاستخدامات الأخرى مقابل تراجع الغابات الكثيفة والمياه العميقة والأرض القاحلة، بما يعكس تحولات مكانية وبيئية واضحة في المنطقة.

نمذجت دراسة (Iskandar et al., 2024) تغيرات الغطاء الأرضي باستخدام نموذج (MOLUSCE) في وحدة إدارة غابات كاهيان تينغا بكاليمانان تينغا، بهدف تحليل ديناميكيات الغطاء الأرضي واستشرافها لدعم التخطيط المستدام. غطت الدراسة فترات 2011-2016 والتنبؤ بعامي 2021 و2026. وأظهرت النتائج زيادة في الأرض الزراعية خلال المرحلة الأولى، مع دقة جيدة للنمذجة باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) بمعامل كبا (0.701)، ومحاكاة الخلايا التلقائية (CA) لعام 2021 بمعامل كبا (0.672). وتشير التوقعات إلى استمرار التوسع الزراعي مقابل استقرار نسبي في الغابات، بما يدعم إدارة الغابات واتخاذ القرار.

تناولت دراسة (Gündüz, 2025) تحليل ديناميكيات تغير استعمالات وأغطية الأرض في مدينة مانيسا بتركيا والتنبؤ باتجاهاتها المستقبلية، بالاعتماد على صور (Sentinel-2) وبيئة (GEE) ومقارنة أربع خوارزميات للتعلم الآلي. وقد حققت خوارزمية الغابة العشوائية أعلى دقة في التصنيف، ثم استخدم نموذج (CA-ANN) عبر (MOLUSCE) في برنامج (QGIS) لمحاكاة سيناريوهات 2027 و2030م. وأظهرت النتائج تسارع التوسع

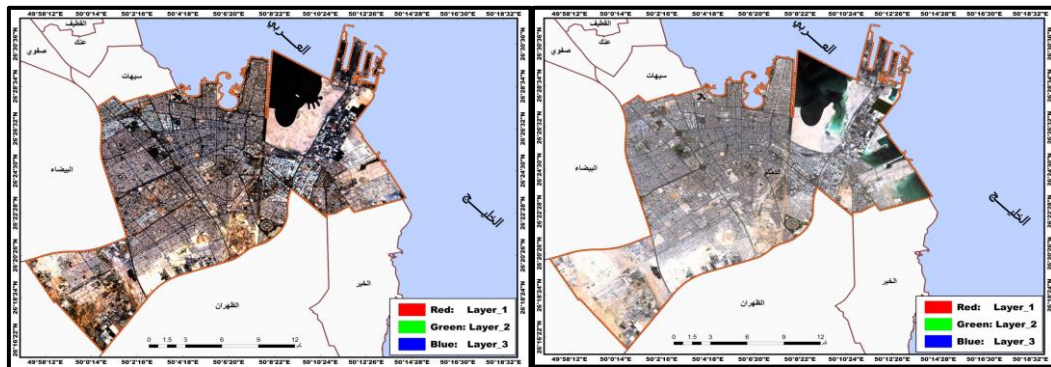
العمراني مع توقع زيادة المساحات المبنية بنسبة 23.67% بين عامي 2024 و 2030 على حساب الأرض الفضاء والمساحات المائية.

منهجية البحث:

اعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي والمنهج الكمي المكاني، إلى جانب النمذجة والمحاكاة، لتحليل أنماط النمو العمراني والتنبؤ بتغيرات استعمالات الأرض في منطقة الدراسة. واستند إلى ثلاثة أنواع من البيانات: بيانات فضائية متمثلة بمرئيات (Sentinel-2) لعامي 2016 و 2026 لاستخراج خرائط أغطية واستعمالات الأرض، وبيانات مكانية رقمية بصيغة (Shapefiles) تشمل الطرق والخدمات وحدود المدينة والأحياء السكنية. كما اعتمدت الدراسة على برامج (ArcGIS) و (QGIS) ونموذج (MOLUSCE) للنمذجة والتنبؤ، إلى جانب برنامج (ERDAS IMAGINE) لمعالجة وتحليل المرئيات الفضائية، ضمن مراحل علمية ومنهجية متكاملة لتنفيذ البحث.

(1) جمع البيانات: تضمنت مرحلة جمع البيانات الحصول على مجموعة من البيانات الفضائية والمكانية اللازمة لإعداد وتحليل خرائط أغطية واستعمالات الأرض ودراسة الخصائص الطبيعية لمنطقة الدراسة. وقد شملت هذه المرحلة تحميل المرئيات الفضائية للقمر الصناعي (Sentinel-2) للأعوام 2016م و 2026م، بدقة مكانية تبلغ 10 أمتار، وذلك من منصة نظام كوبرنيكوس البيئي للبيانات التابعة لوكالة الفضاء الأوروبية (<https://browser.dataspace.copernicus.eu>). بهدف اشتقاق خرائط أغطية واستعمالات الأرض في المدينة. كما تم الحصول على بيانات نموذج الارتفاعات الرقمية بدقة مكانية تبلغ 12 متراً من القمر الصناعي (ALOS PALSAR)، من منصة ناسا بيانات الأرض التابعة لـ (NASA) (<https://www.earthdata.nasa.gov>). والتي استُخدمت في اشتقاق خرائط الارتفاع وشبكة الأودية. إضافة إلى ذلك، تم جمع البيانات المكانية الأساسية المتعلقة بمنطقة الدراسة كالطرق والخدمات والسكان من أمانة المنطقة الشرقية وبلدية الدمام، وذلك لدعم التحليل المكاني وتعزيز دقة النتائج.

(2) معالجة البيانات: تضمنت مرحلة معالجة البيانات إجراء عدد من العمليات التصحيحية والمعالجات الرقمية للمرئيات الفضائية بهدف تحسين جودة البيانات ورفع دقتها التحليلية. وقد شملت هذه المرحلة تنفيذ التصحيح الهندسي (Geometric Correction) لضمان التطابق المكاني للمرئيات، بالإضافة إلى التصحيح الإشعاعي (Radiometric Correction) للنطاقات الطيفية المفردة باستخدام أداة (Rescale)، في حين تم تطبيق التصحيح الجوي للمرئيات المدمجة بواسطة أداة (Autonomous Atmospheric Correction)، وذلك للحد من تأثيرات الغلاف الجوي وتحسين القيم الطيفية للمرئيات. كما جرى تحسين الدقة المكانية للمرئيات من خلال دمج النطاقات متعددة الأطياف مع النطاق البنكروماتي باستخدام أداة (Resolution Merge)، بهدف الحصول على مرئيات ذات وضوح مكاني أعلى. وبعد ذلك، استُخدمت أداة (Create Subset Image) لاقتطاع المرئيات وفق حدود منطقة الدراسة الشكلين (2، 3)، بما يسهم في تركيز المعالجة على نطاق البحث. وفي المرحلة النهائية، تم تطبيق أسلوب التصنيف غير الموجه (Unsupervised Classification) لاقتقاق فئات أغطية واستعمالات الأرض، وذلك اعتماداً على الخصائص الطيفية للمرئيات الفضائية. وأنجزت جميع عمليات المعالجة والتحليل باستخدام برنامج (ERDAS IMAGINE).



شكل (3) مرئية (Sentinel-2) عام 2026م

شكل (2) مرئية (Sentinel-2) عام 2016م

(3) **تحليل التغيرات:** تستهدف هذه المرحلة رصد التحولات المكانية والزمنية في مدينة الدمام من خلال مقارنة خرائط استخدامات الغطاء الأرضي (LULC) لسنوات مختلفة. وتُوظف تقنيات التحليل المكاني في بيئة نظم المعلومات الجغرافية لتحديد مناطق التوسع العمراني، وتحليل ديناميكيات التحول بين فئات الغطاء الأرضي- لاسيما تحول الأرض الفضاء إلى عمران-، بالإضافة إلى حساب معدلات التوسع الحضري والمؤشرات الإحصائية لقياس حجم النمو واتجاهاته، بما يدعم عمليات التخطيط المستقبلي.

(4) **بناء النموذج:** تضمنت هذه المرحلة إعداد البيانات المكانية اللازمة لتطبيق محاكاة النمو العمراني باستخدام حزمة MOLUSCE في بيئة QGIS، حيث شملت الإجراءات تجهيز خرائط استعمالات الأرض ومحددات النمو- كالارتفاع والبعد عن الأودية والطرق والخدمات- مع حساب المسافات الإقليدية (Euclidean Distance) لتقدير أثر القرب والبعد في توجيه التوسع الحضري. وفي الختام، عولجت جميع الطبقات لتوحيد نظام الإحداثيات والدقة المكانية والصيغة الرقمية، بما يضمن كفاءة النموذج ودقة نتائج المحاكاة الاستشرافية.

(5) **المحاكاة المستقبلية:** تهدف هذه المرحلة إلى إنتاج خرائط تنبؤية وتحليل سيناريوهات التوسع العمراني للأعوام (2030م، 2040م، 2050م). ولتنفيذ ذلك عبر حزمة MOLUSCE في بيئة QGIS، غُذي

النموذج بخرائط استعمالات الأرض لعامي 2016م و2026م كبيانات تاريخية، إلى جانب طبقات العوامل المؤثرة. واعتمد نموذج المحاكاة الهجين القائم على دمج الشبكات العصبية الاصطناعية والأتمتة الخلوية (CA-ANN) لكفاءته العالية في معالجة ديناميكيات التوسع؛ حيث أُجريت عملية التنبؤ وإنتاج الخرائط الاستشرافية للفترات المستهدفة بعد إتمام مرحلتي تدريب النموذج والتحقق من دقة أدائه.

(6) **تقييم النموذج:** شملت هذه المرحلة عمليتي التدريب والتحقق لقياس كفاءة النموذج وموثوقيته في التنبؤ بالتحولات العمرانية. واعتمد التدريب على بيانات استعمالات الأرض لعامي 2016م و2026م بالاقتران مع المتغيرات التفسيرية، ليتم بعد ذلك اختبار أداء النموذج عبر مقارنة مخرجاته التنبؤية بالبيانات الحقيقية. ولتقييم درجة المطابقة بدقة، احتسبت مصفوفة الارتباك (Confusion Matrix)، واستُخرجت المؤشرات الإحصائية القياسية، وفي مقدمتها: مؤشر الدقة الكلية (Overall Accuracy) لتقييم كفاءة النموذج العامة، ومعامل كبا (Kappa Coefficient) لقياس مستوى التوافق بين النتائج المستشرفة والواقع الفعلي؛ مما أكد دقة النموذج وصلاحيته لمحاكاة الاتجاهات المستقبلية للتوسع الحضري.

عرض نتائج البحث ومناقشتها وتفسيرها:

أولاً) تحليل استعمالات الأرض في مدينة الدمام

(أ) استعمالات الأرض في مدينة الدمام عام 2016م:

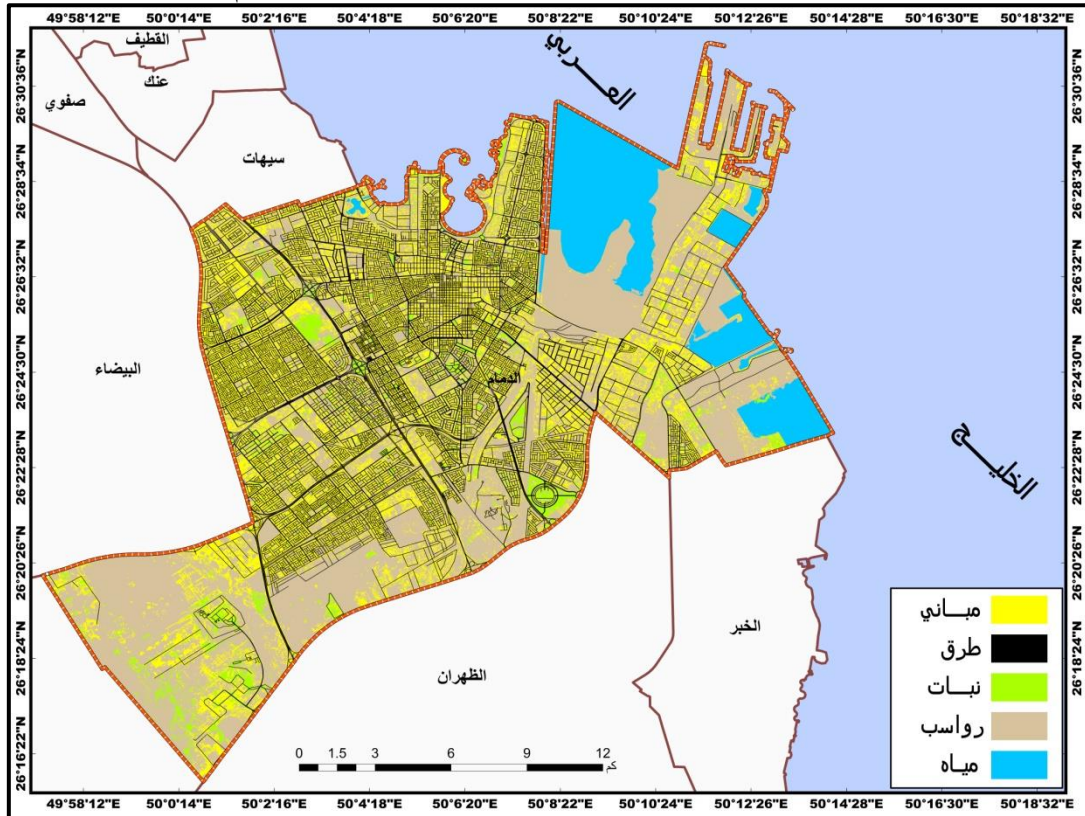
تُظهر نتائج اشتقاق استعمالات وأغطية الأرض في مدينة الدمام، اعتماداً على مرئية القمر الصناعي (Sentinel-2) لعام 2016م (شكل رقم 4)، تبايناً مكانياً واضحاً في توزيع أنماط استعمالات الأرض داخل المدينة، وهو ما يعكس طبيعة التوسع العمراني والخصائص البيئية والجغرافية السائدة في المنطقة. وقد أسهمت بيانات الاستشعار عن بُعد في تحديد وتصنيف مكونات الغطاء الأرضي المختلفة بدقة، بما يوضح التوزيع النسبي لكل نمط من أنماط الاستعمالات الأرضية.

أظهرت النتائج أن غطاء المباني يُعد من أبرز مظاهر استعمالات الأرض داخل المدينة، حيث تركز بصورة رئيسة في الأجزاء الشمالية الغربية والوسطى والشرقية من مدينة الدمام، وهي المناطق التي تشهد كثافة عمرانية ونشاطاً سكانياً وخدمياً مرتفعاً. وقد بلغت مساحة الغطاء العمراني نحو 79.93 كم²، مشكلاً ما نسبته 23.92% من إجمالي مساحة المدينة، الأمر الذي يعكس حجم التوسع الحضري الذي شهدته المدينة خلال السنوات الأخيرة، ولاسيما في المناطق المرتبطة بالأنشطة الاقتصادية والخدمية وشبكات النقل الرئيسية.

أما الرواسب، فقد جاءت في المرتبة الأولى من حيث المساحة، إذ بلغت مساحتها 162.92 كم²، بنسبة 48.36% من إجمالي مساحة المدينة، ما يجعلها الغطاء الأرضي السائد في منطقة الدراسة. وقد تركز انتشار الرواسب في الأجزاء الغربية والجنوبية والشرقية من المدينة، ويرتبط ذلك بطبيعة التكوينات السطحية والامتدادات الصحراوية المحيطة بمدينة الدمام، بالإضافة إلى محدودية التنمية العمرانية في تلك الأطراف مقارنة

بالمناطق المركزية. كما تعكس هذه المساحات الواسعة من الرواسب وجود أراضي غير مطورة أو مناطق مفتوحة ذات خصائص رسوبية ورملية. أظهرت شبكة الطرق توزيعًا يرتبط بصورة مباشرة بمناطق الكثافة العمرانية، حيث تركزت الطرق بشكل كثيف في المناطق الشمالية والوسطى من المدينة، وهي المناطق الأكثر تطورًا عمرانيًا وسكانيًا، بينما تقل كثافتها تدريجيًا باتجاه أطراف المدينة، ولاسيما في الجهة الغربية. وقد بلغت مساحة الطرق نحو 49.3 كم²، بنسبة 14.63% من إجمالي مساحة مدينة الدمام، لتأتي في المرتبة الثالثة من حيث مساحة تغطيتها، وهو ما يعكس ترابط شبكة النقل مع مراكز التنمية الحضرية والأنشطة الاقتصادية داخل المدينة. وجاءت المسطحات المائية في المرتبة الرابعة من حيث المساحة بعد الرواسب والمباني والطرق، حيث تركزت في الجزء الشرقي من المدينة المطل على الخليج العربي، وهو ما يفسر الامتداد المائي المرتبط بالساحل الشرقي للدمام. وقد بلغت مساحة المياه نحو 31.37 كم²، بنسبة 9.3% من إجمالي مساحة المدينة، مما يبرز الأهمية الجغرافية والاقتصادية للواجهة البحرية للمدينة، ودورها في تشكيل الأنشطة الساحلية والموانئ والمناطق الترفيهية.

أما الغطاء النباتي، فقد جاء في المرتبة الأخيرة من حيث المساحة، إذ بلغ نحو 13.44 كم²، بنسبة 3.99% من إجمالي مساحة المدينة. وقد ظهر الغطاء النباتي في مناطق متفرقة داخل المدينة، غالبًا في الحدائق العامة، والمسطحات الخضراء، وبعض المناطق الزراعية المحدودة. ويعكس انخفاض نسبة الغطاء النباتي الطبيعة المناخية الجافة للمنطقة، إضافة إلى سيطرة الاستعمالات العمرانية والرواسب على معظم مساحة المدينة.



شكل رقم (4) استعمالات الارض في مدينة الدمام عام 2016م

المصدر: الباحثة بالاعتماد على مرئية (Sentinel-2) ملتقطه بتاريخ (2016-5-15).

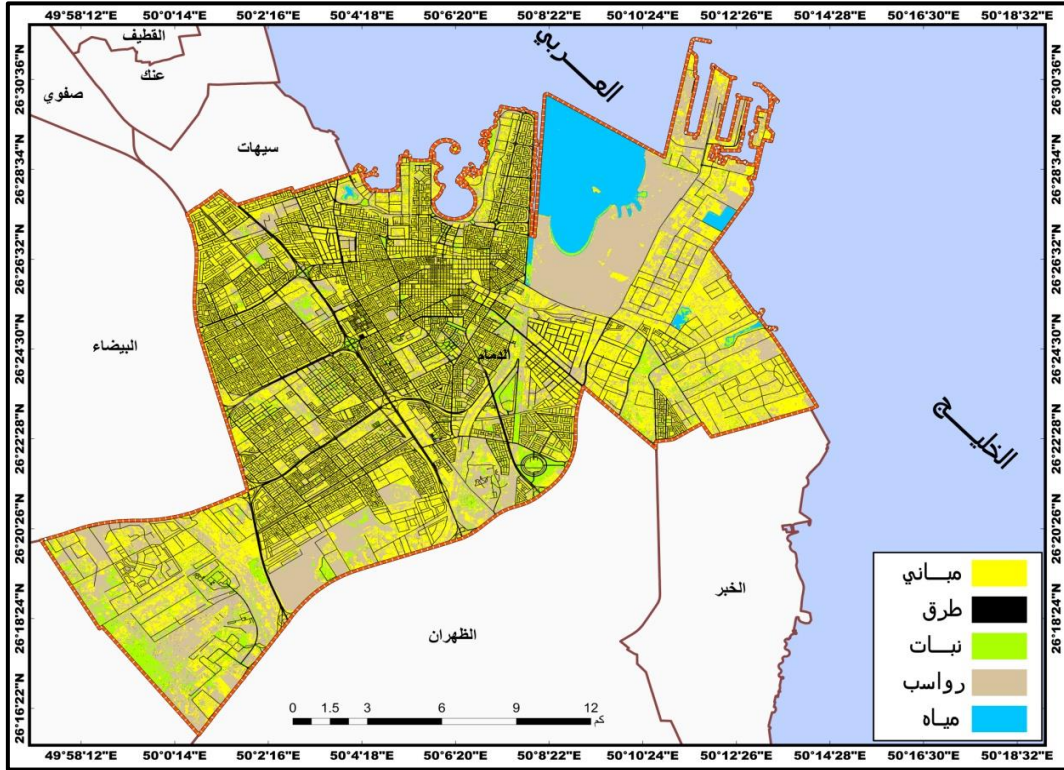
ب) استعمالات الأرض في مدينة الدمام عام 2026م:
أوضحت نتائج تحليل واستنباط استعمالات وأغطية الأرض في مدينة الدمام، بالاعتماد على مرئية القمر الصناعي (Sentinel-2) لعام 2026م (شكل رقم 5)، حدوث تغيرات مكانية ملحوظة في أنماط استعمالات الأرض مقارنة بعام 2016م، بما يعكس تسارع عمليات التنمية الحضرية والتوسع العمراني التي شهدتها المدينة خلال العقد الأخير، إلى جانب تأثير العوامل الطبيعية والجغرافية في إعادة تشكيل توزيع الأغطية الأرضية ضمن النطاق الحضري.

وأظهرت النتائج أن الغطاء العمراني المتمثل في المباني أصبح النمط السائد في المدينة خلال عام 2026م، بعد أن احتل المرتبة الأولى من حيث المساحة متجاوزاً غطاء الرواسب، وهو ما يشير بوضوح إلى اتساع نطاق التوسع الحضري وتحويل مساحات واسعة من الأرض المفتوحة إلى مناطق مطورة عمرانياً. وقد تركز انتشار المباني في الأجزاء الشمالية والوسطى والغربية والشرقية والجنوبية من المدينة، وهي المناطق التي تشهد ارتفاعاً في الكثافة السكانية والأنشطة الاقتصادية والخدمية. وبلغت مساحة الغطاء العمراني نحو 136.8 كم²، بما يعادل 40.6% من إجمالي مساحة المدينة، مسجلاً زيادة قدرها 56.87 كم² مقارنة بعام 2016م. ويعكس ذلك حجم النمو العمراني الذي شهدته مدينة الدمام خلال الفترة الممتدة بين عامي 2016م و2026م، ولاسيما في المناطق المرتبطة بالمشروعات التنموية وشبكات النقل والبنية التحتية الحديثة.

في المقابل، تراجع غطاء الرواسب إلى المرتبة الثانية من حيث المساحة مقارنة بعام 2016م، حيث بلغت مساحته نحو 98.54 كم²، بنسبة 29.25% من إجمالي مساحة المدينة، مسجلاً انخفاضاً قدره 64.39 كم² مقارنة بعام 2016م. وقد تركزت الرواسب في الأجزاء الشمالية الشرقية والجنوبية والجنوبية الغربية من المدينة، وهي مناطق ما تزال تحتفظ بخصائصها الطبيعية والرسوبية نتيجة محدودية التوسع العمراني فيها مقارنة بالمناطق المركزية. كما تشير هذه المساحات إلى وجود أراضٍ فضاء ومناطق غير مطورة ذات طبيعة رملية ورسوبية ترتبط بالامتدادات الصحراوية المحيطة بالمدينة.

كما أظهرت النتائج وجود ارتباط وثيق بين توزيع شبكة الطرق ومناطق التركيز العمراني والسكني، إذ سجلت الطرق كثافة مرتفعة في الأجزاء الشمالية والوسطى والغربية من المدينة، وهي المناطق التي تتميز بارتفاع مستويات التنمية الحضرية والكثافة السكانية، في حين تنخفض كثافة الطرق تدريجياً باتجاه الأطراف، ولاسيما في الجهات الشمالية الشرقية والجنوبية والجنوبية الغربية. وقد بلغت مساحة شبكة الطرق عام 2026م نحو 62.9 كم²، بنسبة 18.66% من إجمالي مساحة المدينة، وعليه فقد زادت مساحتها عن عام 2016م بنحو 13.6 كم²، مما يعكس تطور البنية التحتية للنقل وارتباطها بمحاور النمو العمراني والاقتصادي داخل المدينة. وفيما يتعلق بالغطاء النباتي، فقد سجل أقل نسبة بين أنماط استعمالات الأرض المختلفة، إذ بلغت مساحته نحو 20.8 كم²، بنسبة 6.18% من إجمالي مساحة مدينة الدمام، محققاً زيادة قدرها 7.37 كم² مقارنة بعام

2016م. وتتركز ظهوره في مناطق متفرقة من جنوب المدينة وجنوبها الغربي ووسطها، ويتمثل غالباً في الحدائق العامة والمساحات الخضراء وبعض الرقع الزراعية المحدودة. ويُعزى انخفاض نسبة الغطاء النباتي إلى الطبيعة المناخية الجافة السائدة في المنطقة، فضلاً عن هيمنة التوسع العمراني والرواسب على معظم مساحة المدينة.



شكل رقم (5) استعمالات الارض في مدينة الدمام عام 2026م

المصدر: الباحثة بالاعتماد على مرئية (Sentinel-2) ملتقطة بتاريخ (2026-5-18).

أما المسطحات المائية، فقد تراجعت من المرتبة الرابعة إلى الخامسة من حيث المساحة، وتركز وجودها في الجزء الشمالي الشرقي من المدينة بمحاذاة الخليج العربي، بما يعكس الامتداد الساحلي لمدينة الدمام وأهمية موقعها البحري. وقد بلغت مساحة المياه نحو 17.92 كم²، بنسبة 5.31% من إجمالي مساحة المدينة، مسجلة انخفاضاً قدره 13.44 كم² مقارنة بعام 2016م. ويبرز هذا التراجع الدور الحيوي للواجهة البحرية في دعم الأنشطة الاقتصادية واللوجستية والترفيهية، إضافة إلى ارتباطها بالموانئ والمناطق الساحلية ذات الأهمية التنموية.

ثانياً) أنماط تغيرات أغطية واستعمالات الأرض بين عامي 2016-2026م:

أ) مناطق لم تشهد تغيرات مكانية: تشير نتائج تحليل التغيرات المكانية لأغطية واستعمالات الأرض في مدينة الدمام خلال الفترة الممتدة بين عامي 2016م و2026م إلى وجود مساحات واسعة حافظت على خصائصها واستعمالاتها الأرضية دون حدوث تغيرات جوهرية. وقد بلغت المساحة الإجمالية لهذه المناطق نحو 206.15 كم²، بما يمثل 61.18% من إجمالي مساحة المدينة، الأمر الذي يعكس درجة مرتفعة من الاستقرار المكاني والثبات النسبي في أنماط استعمالات الأرض خلال مدة الدراسة. ويُفسر هذا الاستقرار بعدة عوامل، من أبرزها ثبات البنية العمرانية في بعض الأحياء القائمة، واستمرار الخصائص الطبيعية لبعض البيئات الرملية والساحلية، إلى جانب استقرار شبكات النقل والبنية التحتية الرئيسية. كما يعكس ذلك محدودية التحولات المكانية في بعض أجزاء المدينة مقارنة بالمناطق التي شهدت توسعاً عمرانياً أو تغيرات وظيفية خلال الفترة نفسها. وقد تنوعت المناطق المستقرة مكانياً وفقاً لأنماط استعمالات الأرض، ويمكن تصنيفها إلى خمسة أنماط رئيسية على النحو الآتي:

1. مناطق المباني: يمثل هذا النمط المناطق العمرانية التي حافظت على استعمالها بوصفها مناطق مبنية خلال عامي 2016م و2026م، دون أن تتعرض لتحولات وظيفية أو تغيرات في طبيعة الغطاء الأرضي. وقد بلغت مساحة هذه المناطق نحو 57.55 كم²، مشكلةً ما نسبته 27.92% من إجمالي مساحة المناطق التي لم

تشهد تغييراً في الاستعمال الأرضي. ويعكس هذا النمط استقرار الكتلة العمرانية القائمة في المدينة، ولاسيما في الأحياء السكنية والتجارية الراسخة التي تمتلك بنية تحتية مكتملة وشبكات خدمات مستقرة، الأمر الذي أسهم في الحد من حدوث تغيرات جوهرية في طبيعة استخدامها خلال فترة الدراسة.

2. مناطق الرواسب الرملية: تمثل الرواسب الرملية النمط الأكبر ضمن المناطق المستقرة مكانياً، حيث حافظت هذه المناطق على خصائصها الطبيعية خلال الفترة الممتدة بين عامي 2016م و2026م، دون تعرضها لتحويلات عمرانية أو استغلالات بشرية واسعة النطاق. وقد بلغت مساحتها نحو 73.52 كم²، بنسبة 35.67% من إجمالي مساحة المناطق المستقرة. ويُعزى اتساع هذا النمط إلى استمرار وجود مساحات صحراوية أو أراضٍ غير مطورة خارج النطاق الحضري أو على أطرافه، إضافةً إلى محدودية التوسع العمراني في بعض المناطق الرملية نتيجة العوامل البيئية أو التخطيطية. كما تعكس هذه النتيجة بقاء أجزاء من البيئة الطبيعية للمدينة دون تغيير ملحوظ خلال فترة الدراسة.

3. مناطق الطرق: يشمل هذا النمط شبكات الطرق والمحاور المرورية التي ظلت محافظة على استعمالها ووظيفتها خلال سنوات الدراسة، حيث بلغت مساحتها نحو 50.58 كم²، وبنسبة 24.54% من إجمالي مساحة المناطق التي لم تشهد تغييراً. ويشير استقرار هذا النمط إلى ثبات البنية الأساسية للنقل في المدينة، واستمرار كفاءة الشبكة المرورية القائمة دون الحاجة إلى تغييرات كبيرة في مسارات الطرق أو وظائفها. كما يعكس اعتماد التوسع الحضري في بعض المناطق على الشبكات القائمة بدلاً من إنشاء محاور جديدة بصورة واسعة.

4. المسطحات المائية: يمثل هذا النمط المناطق المائية التي حافظت على خصائصها الطبيعية خلال الفترة الزمنية الممتدة بين عامي 2016م و2026م، وقد بلغت مساحتها نحو 17.66 كم²، مشكلةً نسبة 8.57% من إجمالي مساحة المناطق المستقرة. ويعكس استقرار المسطحات المائية ثبات بعض الخصائص الساحلية والبحرية للمدينة، وعدم تعرضها لعمليات ردم أو تغيير جوهرية في استخداماتها خلال فترة الدراسة، وهو ما يشير إلى استمرار الخصائص البيئية المرتبطة بالساحل والمناطق المائية.



شكل رقم (6) المناطق التي تتغير استعمالاتها في مدينة الدمام بين عامي 2016-2026

المصدر: الباحثة بالاعتماد على الشكلين (4،5).

5. مناطق الغطاء النباتي: يمثل هذا النمط المناطق التي حافظت على غطائها النباتي دون تغير في طبيعة استعمالها خلال عامي 2016م و2026م، حيث بلغت مساحتها نحو 6.85 كم²، بنسبة 3.32% من إجمالي مساحة المناطق التي لم تشهد تغييراً في نوع الاستعمال الأرضي. ورغم محدودية مساحة هذا النمط مقارنة ببقية الأنماط، فإنه يعكس استمرارية بعض المساحات الخضراء والمناطق المزروعة داخل المدينة، سواء كانت حدائق حضرية أو مناطق ذات غطاء نباتي طبيعي. كما يشير إلى أهمية هذه المناطق في الحفاظ على التوازن البيئي وتحسين جودة البيئة الحضرية. وبوجه عام، توضح نتائج هذا النمط أن أكثر من نصف مساحة مدينة الدمام اتسمت بالاستقرار المكاني خلال فترة الدراسة، وهو ما يعكس ثبات عدد من أنماط استعمالات الأرض الطبيعية والعمرانية، في مقابل تركيز التغيرات المكانية في نطاقات أخرى شهدت توسعاً عمرانياً أو تحولات وظيفية مختلفة، كما هو موضح في شكل رقم (6).

ب) المناطق التي تغيرت إلى استعمالات عمرانية: أظهرت نتائج تحليل التغيرات المكانية لأغطية واستعمالات الأرض في مدينة الدمام خلال الفترة الممتدة بين عامي 2016م و2026م وجود توسع عمراني ملحوظ تمثل في تحول مساحات متنوعة من الاستعمالات الطبيعية وغير العمرانية إلى مناطق مبنية. وقد بلغت المساحة الإجمالية للمناطق التي تغيرت استعمالها إلى مبانٍ نحو 78.86 كم²، بما يعادل 23.4% من إجمالي مساحة المدينة، وهو ما يعكس تسارع النمو الحضري والتوسع العمراني الذي شهدته المدينة خلال فترة الدراسة. ويشير هذا النمط إلى تنامي الامتداد العمراني على حساب بعض الأغطية الأرضية الطبيعية، ولاسيما الرواسب الرملية والمساحات المائية والغطاء النباتي، نتيجة زيادة الطلب على الأرض المرتبطة بالنمو السكاني والتوسع الاقتصادي وتطوير البنية التحتية والمشروعات الحضرية. كما يعكس هذا التحول استمرار عمليات التنمية العمرانية في الأطراف الحضرية والمناطق الساحلية ومناطق الامتداد الجديدة. وتتنوع أنماط التحول إلى الاستعمال العمراني وفقاً لنوع الغطاء الأرضي السابق، ويمكن تصنيفها إلى أربعة أنماط رئيسية كما يأتي:

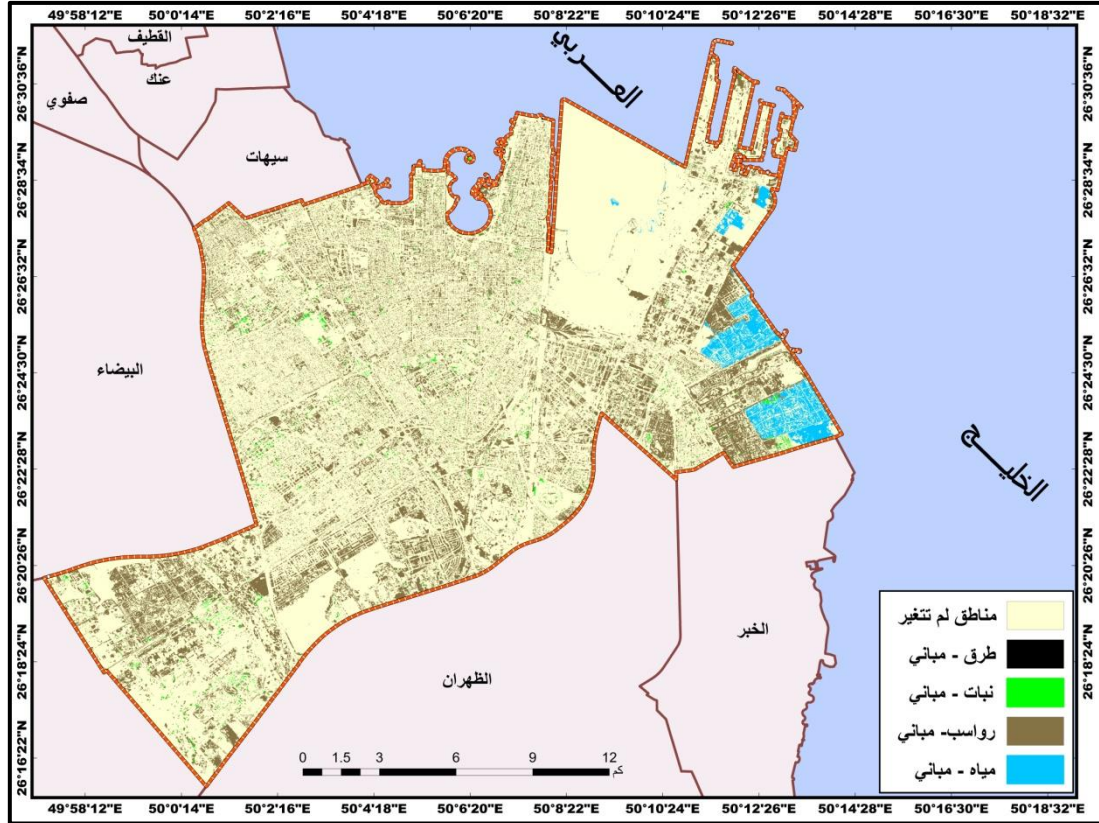
1. تحول الرواسب الرملية إلى مبانٍ: يمثل هذا النمط الشكل الأكثر انتشاراً ضمن التحولات العمرانية، حيث تحولت مساحات واسعة من الرواسب الرملية والأرض الصحراوية غير المستغلة عام 2016م إلى مناطق مبنية بحلول عام 2026م. وقد بلغت مساحة هذه المناطق نحو 69.27 كم²، مشكلةً ما نسبته 20.56% من إجمالي مساحة المدينة، وهي النسبة الأكبر ضمن أنماط التحول العمراني. ويعكس هذا التحول اتجاه النمو العمراني نحو الأطراف الصحراوية للمدينة، مستفيداً من توافر الأرض الفضاء وسهولة استغلالها في إقامة المشروعات السكنية والتجارية والخدمية. كما يشير إلى الدور الذي لعبته خطط التنمية الحضرية في توجيه التوسع العمراني نحو المناطق غير المطورة سابقاً، بما يتوافق مع متطلبات النمو السكاني والتوسع الاقتصادي.

2. تحول المسطحات المائية إلى مبانٍ: يتمثل النمط الثاني في تحول بعض المسطحات المائية الواقعة في الجزء الشرقي من المدينة إلى مناطق مبنية، حيث بلغت مساحة هذه المناطق نحو 6.89 كم²، بنسبة 2.04% من إجمالي مساحة المناطق التي تحولت إلى مبانٍ. ويعكس هذا التغيير عمليات الردم الساحلي والتوسع العمراني باتجاه الواجهة البحرية، وهي من السمات الشائعة في المدن الساحلية التي تشهد نمواً عمرانياً متسارعاً. كما يشير إلى تزايد الاستغلال العمراني للمناطق الساحلية بهدف تطوير مشروعات سكنية أو استثمارية أو خدمية ذات قيمة اقتصادية مرتفعة، الأمر الذي أدى إلى تغير الخصائص الطبيعية لبعض المناطق المائية.

3. تحول الغطاء النباتي إلى مبانٍ: يشمل هذا النمط المناطق التي كانت مغطاة بالغطاء النباتي في عام 2016م، ثم تحولت إلى استعمالات عمرانية بحلول عام 2026م، خاصة في الأجزاء الوسطى والجنوبية والجنوبية الغربية من المدينة. وقد بلغت مساحة هذه المناطق نحو 2.67 كم²، بنسبة 0.79% من إجمالي مساحة المناطق المتحولة إلى مبانٍ. ويشير هذا التحول إلى الضغوط العمرانية المتزايدة على المساحات الخضراء داخل المدينة، نتيجة التوسع الحضري وارتفاع الطلب على الأرض المخصصة للبناء. كما يعكس تقلص بعض المناطق النباتية لصالح التوسع العمراني، الأمر الذي قد يؤثر على التوازن البيئي المحلي وجودة البيئة الحضرية، خاصة في ظل أهمية الغطاء النباتي في تحسين المناخ الحضري والحد من الآثار البيئية للتوسع العمراني.

4. تحول الطرق إلى مبانٍ: يمثل هذا النمط أقل أنماط التغيير مساحةً، حيث تحولت أجزاء محدودة من مناطق الطرق في عام 2016م إلى مبانٍ في عام 2026م، بمساحة بلغت نحو 0.027 كم²، وبنسبة 0.008% من إجمالي مساحة المناطق التي تغير استعمالها إلى مبانٍ. ورغم ضآلة هذا التغيير، فإنه قد يرتبط بإعادة تنظيم بعض

المسارات المرورية أو تعديل استعمالات أجزاء من البنية التحتية القائمة بما يتلاءم مع متطلبات التنمية الحضرية الجديدة. كما قد يعكس عمليات إعادة تخطيط عمراني داخل بعض المناطق الحضرية القائمة. وبصفة عامة، توضح نتائج هذا النمط أن التوسع العمراني في مدينة الدمام خلال الفترة 2016-2026م اتجه بصورة رئيسية نحو استغلال الأرض الرملية الفضاء، مع امتداد محدود نحو المسطحات المائية والغطاء النباتي، وهو ما يعكس ديناميكية النمو الحضري واتساع نطاق التنمية العمرانية في المدينة، كما هو موضح في شكل رقم (7).



شكل رقم (7) المناطق التي تغيرت استعمالاتها الى مبان في مدينة الدمام بين عامي 2016-2026م

المصدر: الباحثة بالاعتماد على الشكلين (4،5).

ج) مناطق تغيرت الى استعمالات غير عمرانية: أوضحت نتائج تحليل التغيرات المكانية لأغطية واستعمالات الأرض في مدينة الدمام بين عامي 2016- و2026م وجود تحولات ملحوظة ضمن فئة الاستعمالات غير العمرانية، حيث شهدت بعض الأغطية الأرضية الطبيعية تغيرات متبادلة فيما بينها دون أن تتحول إلى استعمال عمراني. وقد بلغت المساحة الكلية لهذه التحولات نحو 46.46 كم²، بما يعادل 13.78% من إجمالي مساحة المدينة، وهو ما يعكس ديناميكية بيئية ومكانية مرتبطة بالتغيرات الطبيعية والبشرية التي شهدتها المدينة خلال فترة الدراسة. وتشير هذه التحولات إلى استمرار عمليات إعادة تشكيل بعض الأغطية الأرضية الطبيعية نتيجة عوامل متعددة، من أبرزها أعمال تطوير البنية التحتية، والتغيرات الساحلية، وعمليات الردم والتجريف، بالإضافة إلى التأثيرات البيئية والمناخية التي ساهمت في تغير خصائص بعض المناطق. كما تعكس هذه الأنماط تداخلاً واضحاً بين المظاهر الطبيعية والاستعمالات المرتبطة بخدمات النقل والبنية الأساسية داخل المدينة. وقد تنوعت أنماط التحول غير العمراني إلى تسعة أنماط رئيسية، يمكن توضيحها على النحو الآتي:

1. تحول الرواسب الرملية إلى طرق: يمثل هذا النمط أكبر أنماط التغير غير العمراني في المدينة، حيث تحولت مساحات واسعة من مناطق الرواسب الرملية في عام 2016م إلى شبكات طرق ومحاور مرورية بحلول عام 2026م. وقد بلغت مساحة هذه المناطق نحو 16.46 كم²، مشكلة نسبة 35.42% من إجمالي مساحة

المناطق التي شهدت تحولات غير عمرانية. ويعكس هذا التحول التوسع في إنشاء شبكات النقل والبنية التحتية لدعم الامتداد الحضري والتوسع العمراني في المدينة، خاصة في المناطق الطرفية التي كانت تتكون في الأصل من أراض رملية غير مطورة. كما يشير إلى الدور المحوري للطرق في ربط مناطق التنمية الجديدة وتحسين كفاءة الحركة المرورية داخل المدينة.

2. تحول الرواسب الرملية إلى غطاء نباتي: يمثل هذا النمط تحول بعض مناطق الرواسب الرملية إلى مناطق ذات غطاء نباتي خلال فترة البحث، حيث بلغت مساحتها نحو 9.96 كم²، بنسبة 21.44% من إجمالي مساحة المناطق التي تحولت إلى استعمالات غير عمرانية. ويعكس هذا التحول التوسع في أعمال التشجير واستصلاح الأرض أو إنشاء المساحات الخضراء في بعض أجزاء المدينة، وتحسن الظروف البيئية أو استغلال بعض الأرض الرملية في الأنشطة الزراعية، وتنامي الاهتمام بتحسين المشهد الحضري وزيادة المساحات الخضراء داخل البيئة الحضرية.

3. تحول الرواسب الرملية إلى مياه: يمثل هذا النمط المناطق التي تحولت من رواسب رملية إلى مسطحات مائية بحلول عام 2026م، بمساحة بلغت نحو 1.55 كم²، وبنسبة 3.33% من إجمالي مساحة المناطق التي شهدت تغيرات غير عمرانية. وقد يرتبط هذا التحول بعمليات التوسع في الأحواض المائية أو تشكل تجمعات مائية جديدة نتيجة أعمال التطوير الساحلي أو التغيرات البيئية المرتبطة بمستويات المياه، إضافة إلى احتمالية تأثير عمليات الحفر أو الردم في تغيير طبيعة هذه المناطق.

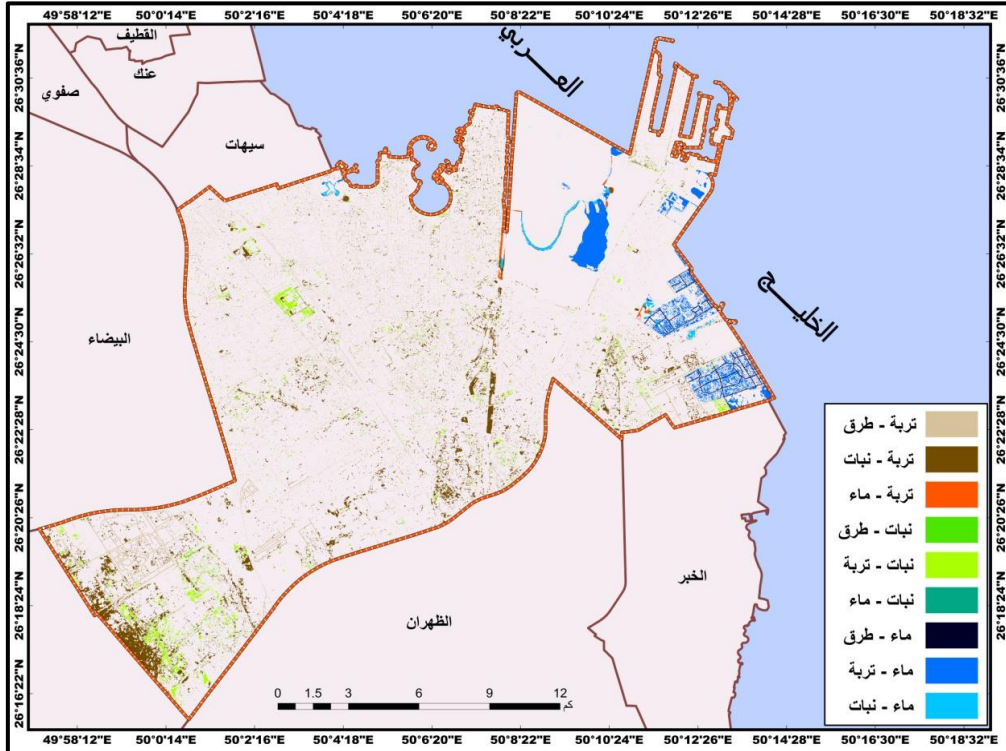
4. تحول المسطحات المائية إلى رواسب رملية: يتمثل هذا النمط في المناطق التي كانت تشغلها مسطحات مائية عام 2016م ثم تحولت إلى رواسب رملية عام 2026م، بمساحة بلغت نحو 5.8 كم²، بنسبة 12.49% من إجمالي مساحة المناطق التي شهدت تحولات غير عمرانية. ويعكس هذا التحول عمليات الردم الساحلي أو الترسيب الطبيعي للرواسب، خاصة في المناطق القريبة من الساحل أو الأجزاء المنخفضة. كما قد يرتبط بمشروعات التهيئة العمرانية المستقبلية التي تتطلب تجهيز الأرض قبل إدخالها ضمن عمليات التنمية.

5. تحول المسطحات المائية إلى طرق: يشمل هذا النمط المناطق التي كانت عبارة عن مسطحات مائية عام 2016م ثم تحولت إلى طرق عام 2026م، بمساحة بلغت نحو 3.97 كم²، وبنسبة 8.54% من إجمالي مساحة المناطق التي تغيرت إلى استعمالات غير عمرانية. ويعكس هذا النمط عمليات الردم والتجهيز التي صاحبت إنشاء محاور مرورية أو طرق ساحلية جديدة، بهدف تعزيز الربط المكاني وتحسين البنية التحتية للنقل، خاصة في المناطق الساحلية التي شهدت توسعاً عمرانياً وتنموياً متسارعاً.

6. تحول المسطحات المائية إلى غطاء نباتي: مثل هذا النمط المناطق التي تحولت من مسطحات مائية إلى غطاء نباتي خلال فترة الدراسة، حيث بلغت مساحتها نحو 1.84 كم²، بنسبة 3.96% من إجمالي مساحة المناطق التي تحولت إلى استعمالات غير عمرانية. ويشير هذا التحول إلى احتمالية استصلاح بعض المناطق الرطبة أو تحويلها إلى مساحات خضراء وحدائق حضرية، الأمر الذي يعكس توجهات بيئية وتنموية تهدف إلى تحسين جودة البيئة الحضرية وزيادة الرقعة النباتية في المدينة.

7. تحول الغطاء النباتي إلى رواسب رملية: يتمثل هذا النمط في المناطق التي كانت مغطاة بالنباتات عام 2016م ثم تحولت إلى رواسب رملية عام 2026م، بمساحة بلغت نحو 3.11 كم²، وبنسبة 6.7% من إجمالي مساحة المناطق التي شهدت تغيرات غير عمرانية. ويعكس هذا التغير تراجع بعض المساحات النباتية نتيجة الجفاف أو تدهور الظروف البيئية، بالإضافة إلى احتمالية تعرض بعض المناطق لعمليات إزالة الغطاء النباتي أو التصحر المحلي.

8. تحول الغطاء النباتي إلى طرق: يشمل هذا النمط المناطق التي كانت عبارة عن غطاء نباتي عام 2016م وتحولت إلى طرق عام 2026م، بمساحة بلغت نحو 2.9 كم²، بنسبة 6.25% من إجمالي مساحة المناطق التي شهدت تحولات غير عمرانية. ويشير هذا التحول إلى التوسع في إنشاء الطرق داخل بعض المناطق الخضراء أو الزراعية، بهدف دعم التوسع الحضري وتحسين الربط بين أجزاء المدينة، الأمر الذي أدى إلى تقليص أجزاء من المساحات النباتية لصالح البنية التحتية للنقل.



شكل رقم (8) المناطق التي تغيرت الى استعمالات غير عمرانية في مدينة الدمام بين عامي 2016-2026م
المصدر: الباحثة بالاعتماد على الشكلين (4,5).

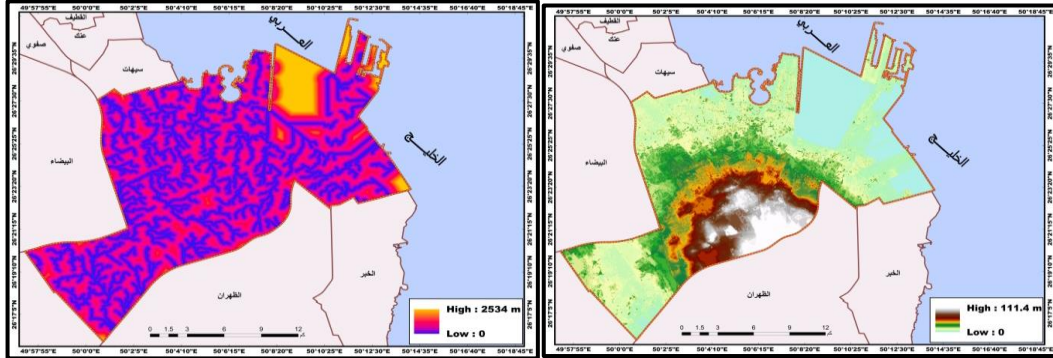
9. تحول الغطاء النباتي إلى مياه: يمثل هذا النمط أقل أنماط التحول مساحةً، حيث تحولت بعض المناطق النباتية إلى مسطحات مائية خلال فترة الدراسة، بمساحة بلغت نحو 0.87 كم²، مشكلةً نسبة 1.88% من إجمالي مساحة المناطق التي تحولت إلى استعمالات غير عمرانية. وقد يرتبط هذا التحول بارتفاع منسوب المياه أو بتكوين تجمعات مائية جديدة في بعض المناطق المنخفضة، إضافةً إلى احتمالية تأثير مشروعات البنية التحتية أو التغيرات البيئية في إعادة تشكيل طبيعة الغطاء الأرضي.

وبوجه عام، تكشف هذه الأنماط عن وجود تغيرات ديناميكية واضحة في الاستعمالات غير العمرانية بمدينة الدمام خلال الفترة 2016-2026م، حيث تداخلت العوامل الطبيعية والبشرية في إعادة تشكيل خصائص الغطاء الأرضي، خاصةً في المناطق الساحلية والأطراف الحضرية. كما توضح النتائج الدور الكبير الذي لعبته مشاريع البنية التحتية والتوسع في شبكات الطرق في إحداث تحولات مكانية ملحوظة ضمن فئة الاستعمالات غير العمرانية، كما هو موضح في شكل رقم (8).

ثالثاً) محاكاة النمو العمراني وتغيراته في المستقبل:

أ) معايير محاكاة النمو العمراني في مدينة الدمام: اعتمدت محاكاة العمران في المستقبل على عدة متغيرات مستقلة كارتفاع التضاريس التي تراوحت بين صفر إلى 111.4م فوق سطح البحر شكل (9) بمتوسط مكاني للارتفاع على مستوى المدينة 12 م. أما المعيار البيئي الثاني يتمثل بالبعد من مجاري الأودية التي تراوحت بين صفر إلى 2534 م شكل رقم (10) بمتوسط مكاني للبعد من مجاري الأودية على مستوى المدينة بلغ 285

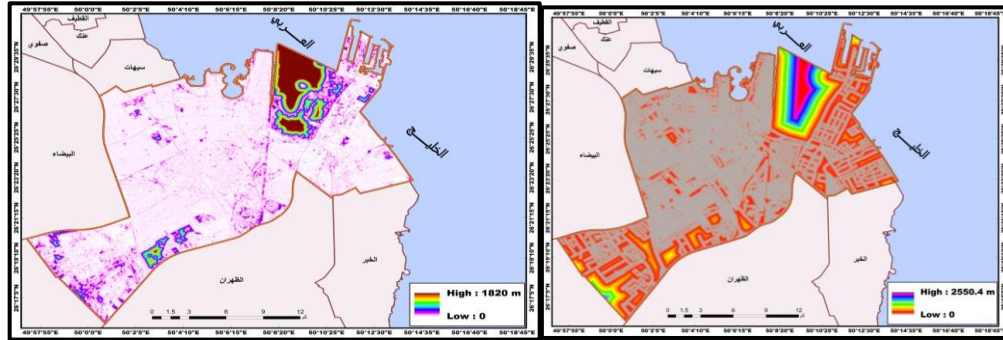
م.



شكل (10) البعد من مجاري الاودية في مدينة الدمام

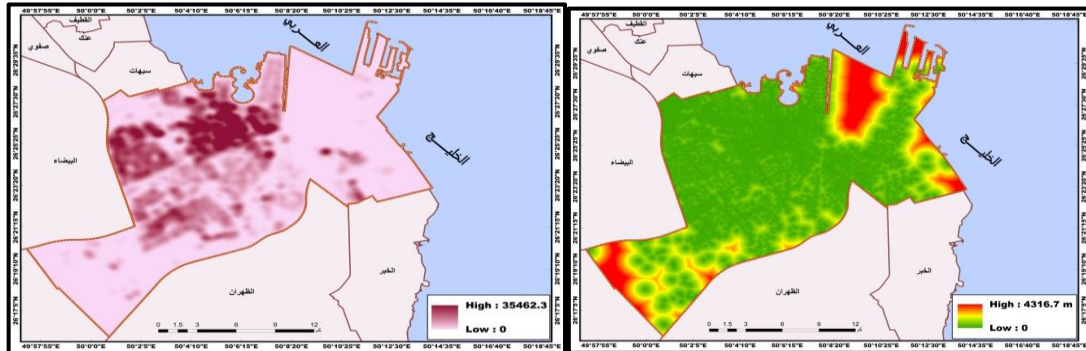
شكل (9) ارتفاع تضاريس مدينة الدمام

كما اعتمد البحث على معيار البعد من الطرق في تحديد نمو العمران ويوضح شكل (11) تراوح البعد من الطرق بين صفر - 2550م بمتوسط مكاني للبعد من الطرق على مستوى المدينة 189.5 م. اما المعيار الرابع فيتمثل بالبعد من المناطق المبنية التي تراوحت كما يوضح شكل رقم (12) بين صفر الى 1820 م بمتوسط مكاني للبعد من المباني على مستوى المدينة بلغ 55 م.



شكل (11) البعد من الطرق في مدينة الدمام شكل (12) البعد من المناطق المبنية في مدينة الدمام

ومن ضمن معايير بناء النموذج المعياري المتمثل بمتغيري البعد من الخدمات كما يوضح شكل (13) تراوح البعد من الخدمات بمدينة الدمام بين صفر - 4316.7م بمتوسط مكاني للبعد من الخدمات على مستوى المدينة 416.6 م. ومتغير كثافة السكان التي تراوحت شكل رقم (14) بين صفر الى 35462.3 نسمة/ كم²، بمتوسط مكاني لكثافة السكان على مستوى المدينة بلغ 3108 نسمة/ كم².



شكل (14) كثافة السكان عام 2022م في مدينة الدمام

شكل (13) البعد من الخدمات في مدينة الدمام

(ب) التحقق من دقة نتائج محاكاة النمو العمراني: اعتمد البحث على نموذج التغيير المكاني (MOLUSCE) في بيئة (QGIS) لمحاكاة النمو العمراني بمدينة الدمام، مستنداً إلى طبقتي غطاء واستعمالات الأرض لعامي 2016 و2026م. ولتحديد المواقع الأكثر ملاءمة للتوسعات الحضرية المستقبلية، وُظِّفت عدة معايير رئيسية شملت: المعيار البيئي (ممثلاً في الارتفاع عن سطح الأرض والبعد عن مجاري الأودية)، ومعياري سهولة الوصول (ممثلاً في القرب من شبكة الطرق والمباني القائمة)، إضافة إلى معيار التنمية الاقتصادية (جودة الطرق ونوعيتها)، ومعايير اجتماعية تنموية (كثافة السكان والبعد من الخدمات الاجتماعية). وأظهرت نتائج تقييم دقة المحاكاة المستقبلية للنمو العمراني-الذي أُجري عبر المقارنة المكانية بين الخريطة المتوقعة لعام 2036م، وخريطة الغطاء الأرضي الفعلية لعام 2026م - ما يلي:

أولاً: مؤشرات الدقة العامة للنموذج: أظهرت النتائج ارتفاع قيم معاملات الاتفاق (Agreement)، وهو ما يشير إلى أن النموذج حقق درجة عالية من التطابق بين الخريطة المتوقعة والخريطة الفعلية ومما يدعم ذلك.

1. معامل (Kstandard) الذي يُعد من أهم مؤشرات لتقييم الدقة، حيث يقيس درجة الاتفاق الكلي بين النموذج والواقع بعد استبعاد الاتفاق الناتج عن الصدفة. وتشير القيمة (0.9048) لهذا المعامل إلى وجود اتفاق قوي جداً بين النتائج المتوقعة والواقع الفعلي، لأن قيم الكابا (Kappa) تتجاوز العتبة الحرجة (0.80)، وهذا يعني أن النموذج قادر على تفسير 90.48% من ديناميكيات التغيير العمراني في الدمام بناءً على المعايير المدخلة (كالارتفاع والبعد عن الطرق والمباني والأودية)، وأن نسبة الخطأ أو العشوائية لا تتعدى 9.5%.

2. معامل (Kno) الذي يقيس مقدار الاتفاق المكاني الناتج عن التنبؤ الصحيح بعد استبعاد أثر الكمية، وارتفاع القيمة إلى (0.9327) دليل على أن النموذج نجح بدرجة عالية في تحديد المواقع المكانية الصحيحة للتغيرات، ويتفوق هذا المعامل مع كابا القياسي لأنه يتحرر من التحيز الناجم عن مساحات الفئات، وعليه فإن القيمة (93.27%) تثبت أن النموذج ليس دقيقاً فقط في حساب كمية المساحات الإجمالية التي ستتحول إلى عمران، بل هو ممتاز في تحديد الموقع الجغرافي الدقيق للخلايا المتحولة.

3. معامل (Klocation) يشير هذا المؤشر إلى دقة النموذج في تمثيل التوزيع المكاني للفئات المختلفة. والقيمة المرتفعة التي بلغت 0.9340 تعني أن النموذج استطاع إعادة إنتاج النمط المكاني لاستعمالات الأرض بصورة قريبة جداً من الواقع.

4. معامل (KlocationStrata) هذا المؤشر يوضح دقة التوزيع المكاني داخل الفئات أو الطبقات المختلفة. وتشير القيمة المرتفعة (0.9340) إلى أن النموذج حافظ على التوزيع الداخلي للفئات، والعلاقات المكانية بينها، وأنماط الامتداد الحضري في مدينة الدمام. والتطابق بين المعاملين بقيمة (0.9340) يعكس نجاحاً كبيراً للتغيرات المستقلة المعتمدة. فالقرب من الطرق والمباني القائمة (سهولة الوصول) والبعد عن مجاري الأودية (المعيار البيئي) شكلت محددات مكانية مهمة التزم بها النموذج، مما جعله يعيد إنتاج النمط الحضري المتصل والموجه في الدمام بدقة عالية ودون عشوائية داخل الطبقات.

ثانياً: مؤشرات الاتفاق: تشير قيمة (AgreementGridcell) التي تمثل نسبة التطابق على مستوى الخلايا والتي بلغت 55.31% وهذا يعني أن أكثر من نصف مساحة منطقة الدراسة تطابقت فيها التوقعات مع الواقع على مستوى البكسل جدول رقم (1). كما تشير قيمة (AgreementQuantity) التي بلغت (24.41) إلى مدى الاتفاق في كمية التغيرات بصرف النظر عن الموقع؛ مما يعني نجاح هذا النموذج في تقدير أحجام ومساحات الفئات المتغيرة، ومقدار التوسع العمراني، ونسب التحولات بين الفئات. وتمثل قيمة (AgreementChance) نسبة الاتفاق الناتجة عن الصدفة العشوائية فقط؛ لذا فإن انخفاض هذه القيمة (16.67) يشير إلى أن التوافق بين النموذج والواقع ليس وليد المصادفة، بل ناتج عن قدرة حقيقية للنموذج على تفسير التغيرات.

جدول (1) مؤشرات الاتفاق على مستويات (الخلية، الكمية، الصدفة)

المؤشر	القيمة	الدلالة العلمية والتفسير الجغرافي
(AgreementGridcell)	55.31%	يعني أن أكثر من نصف مساحة منطقة الدراسة تطابقت فيها التوقعات مع الواقع على مستوى البكسل الفردي. في علم نمذجة المدن الديناميكية (مثل الدمام التي تشهد نمواً متسارعاً)، تعتبر أي قيمة فوق 50% ممتازة، لأن التنبؤ بالبكسل الدقيق (Pixel-by-Pixel) صعب جداً بسبب التدخلات البشرية والمخططات المفاجئة.
(AgreementQuantity)	24.41%	يشير إلى أن النموذج يمتلك دقة مسبقة في حساب ميزانية التغيير الإجمالية (Transition Budget). أي أنه يعرف كم كيلومتر مربع سيتحول من أرض فضاء إلى أرض مبنية بناءً على معدلات التغيير بين 2016 و 2026.
(AgreementChance)	16.67%	قيمة منخفضة إيجابية جداً. تؤكد أن 16.67% فقط من الاتفاق يمكن عزوه للصدفة الرياضية البحتة، بينما النسبة المتبقية الضخمة تعود لقدرة النموذج التفسيرية المعتمدة على المدخلات الجغرافية (المعايير الأربعة).

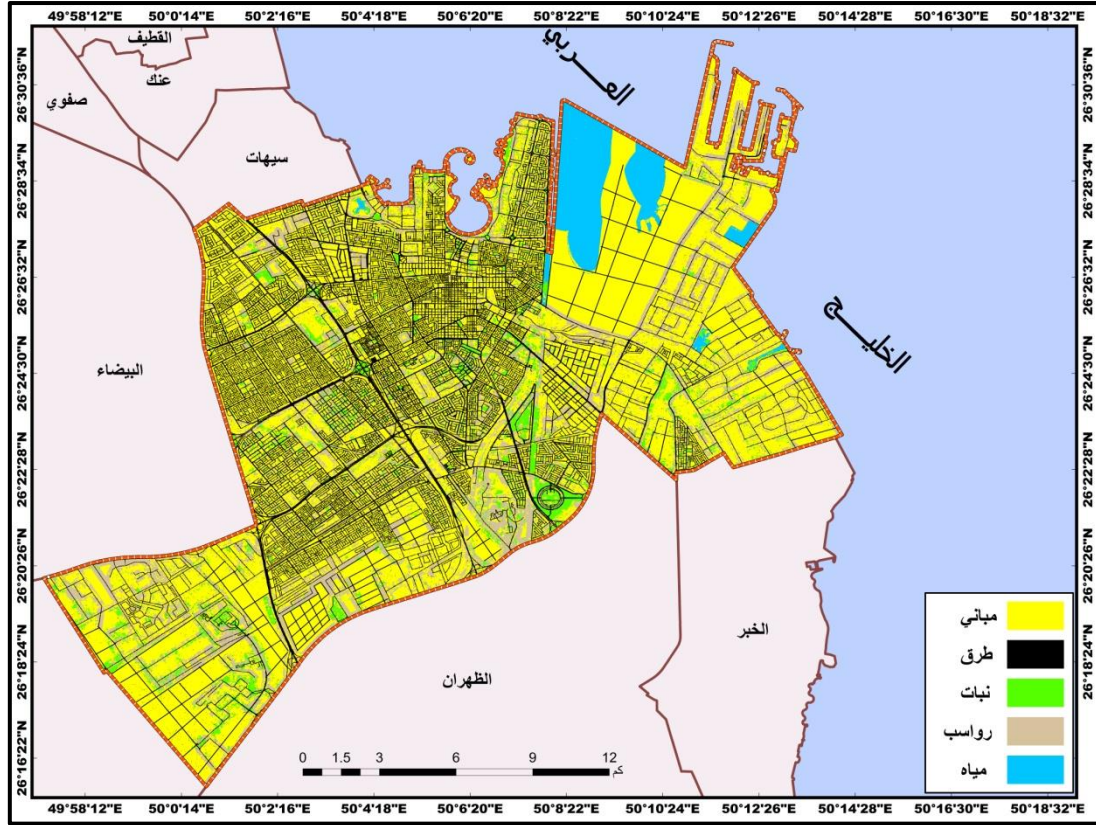
المصدر: الباحثة بالاعتماد على نتائج تقييم الدقة.

ثانياً: مؤشرات الاختلاف: تمثل نسبة الاختلاف الكامل (DisagreeQuantity) على مستوى الخلايا والتي بلغت (0.0589). وهي قيمة منخفضة جداً، إلى انخفاض الأخطاء المكانية، وارتفاع دقة التنبؤ، وقدرته على تقدير أحجام التغييرات بدقة. كما تؤكد قيمة (DisagreeStrata) التي بلغت (0.0000) عدم وجود فروق تُذكر في توزيع الطبقات المكانية بين النموذج والواقع، وهي نتيجة إيجابية جداً توضح عدم وجود فروق جوهرية في توزيع الطبقات أو الفئات المكانية بين النموذج والواقع، وهذا يعكس استقرار البنية المكانية للفئات المختلفة داخل النموذج. وتعكس قيمة (DisagreeGridcell) التي بلغت (0.0000) عدم وجود اختلافات مكانية تُذكر على مستوى الخلايا. وهي نتيجة قوية جداً تشير إلى ارتفاع دقة التوزيع المكاني، ونجاح النموذج في تحديد مواقع التغيير بصورة دقيقة للغاية.

رابعاً: تفسير مؤشرات التطابق: تُبين هذه المؤشرات مدى دقة تطابق تنبؤات النموذج مع الواقع الفعلي؛ حيث يشير المؤشر (Perfect) إلى تطابق تام، و (Medium) إلى تطابق متوسط، و (No) إلى غياب التطابق. وتُظهر النتائج أن نسبة كبيرة من الخلايا تندرج تحت فئة التطابق التام، بينما تقع نسبة محدودة ضمن فئة غياب التطابق، مما يؤكد كفاءة النموذج في محاكاة التغييرات المكانية.

ج) محاكاة النمو العمراني عام 2036م: يتجاوز التحليل الجغرافي والمكاني لمخرجات نموذج (MOLUSCE) عام 2036 كونها مجرد تنبؤات هندسية، لتشكل خريطة طريق ديناميكية ترسم ملامح النمو الحضري لمدينة الدمام. وتوصلت نتائج المحاكاة إلى استمرار ديناميكية التحول المكاني لاستعمالات الأرض، حيث تُشير توقعات عام 2036م إلى أن مدينة الدمام مقبلة على مرحلة من الكثافة السكانية والتوسع الحضري المتسارع على حساب الأرض الفضاء والسبخية. ويتسم التوسع الحضري بزحف موجّه لا عشوائي، بل يتبع استراتيجية تتسق مع اتجاهات التنمية الحالية. وتُظهر المحاكاة أن الأرض الفضاء في الضواحي والمحاور الطرفية هي الأكثر عرضة للتحول إلى كتل مبنية، مما يؤدي إلى توسيع المخططات الهيكلية للمدينة وزيادة مساحتها الإجمالية. ويُعزى نجاح نموذج الخلايا في استقراء المستقبل إلى الوزن النسبي للمتغيرات المستقلة، ويمكن توضيح آلية عملها بالقرب من شبكات النقل والمحاور الشريانية، حيث تُعد الطرق المحورية (مثل طريق الملك فهد، وطريق الرياض) بمثابة نواة الجذب التنموي في الدمام؛ مما دفع المحاكاة لتوجيه النمو العمراني لعام 2036 ليتخذ نمطاً شريطياً بمحاذاة هذه الطرق، وهو ما يفسر نشوء مناطق لوجستية وتجارية وسكنية جديدة على أطراف المدينة الحالية. والاتصال بالكتل العمرانية القائمة، حيث يعتمد نموذج (MOLUSCE) على مبدأ الجوار المباشر، إذ تزداد احتمالية تحوّل البكسل إلى منطقة عمرانية كلما كان ملاصقاً للمباني القائمة. يعكس هذا النمط جغرافياً النمو التكتلي أو الاندماجي؛ حيث تنمو الدمام عبر ملء الفراغات البيئية داخل الأحياء شبه المكتملة، ثم تتمدد نحو الخارج ككتلة واحدة متصلة، مما يساهم في خفض تكاليف مد شبكات البنية التحتية من مياه وكهرباء وصرف صحي. وقابلية الأرض الطرفية للتطوير العمراني، وبفضل دمج المعايير البيئية -مثل الارتفاع والبعد عن الأودية - استبعد النموذج تلقائياً المناطق المعرضة للمخاطر الطبيعية أو المنخفضات، ووجّه التوسع

المستقبلي نحو الأرض الطرفية في الضواحي الغربية والجنوبية للدمام، والتي تتميز بطوبوغرافيا مستوية واستقرار، وتُعد هذه الأرض أكثر ملاءمة للتوسع السكاني والاستثماري للمدينة بحلول عام 2036م.



شكل رقم (15) محاكاة النمو العمراني وتغير استخدام الارض بمدينة الدمام عام 2036م

المصدر: الباحثة بالاعتماد على نموذج (MOLUSCE).

تظهر نتائج التقييم الكمي والتغير الديناميكي لفئات الغطاء الأرضي جدول (2) تبادلاً مكانياً ملحوظاً بين البيئة المشيدة والأغطية الطبيعية، وتحدد ملامح هذا التغير يُتوقع أن تسجل المناطق المبنية (العمران) النمو الأعلى لتصدر المرتبة الأولى بمساحة 183.4 كم²، مستحوذة على 54.43% من مساحة المدينة الإجمالية، بزيادة قدرها 46.6 كم²، مما يعكس وتيرة الامتداد الأفقي المتسارع استجابةً للضغط الديموغرافي والطلب الاستثماري. أما شبكة الطرق فقد تقدمت للمرتبة الثانية بمساحة 68.59 كم² بنسبة 20.36% من المساحة الكلية، بزيادة صافية قدرها 5.69 كم²؛ ويؤكد تحليل الحساسية دورها كموجه رئيسي للتنمية وإعادة تشكيل البنية المكانية. وتراجعت مساحة تغطية الرواسب الرملية الى المرتبة الثالثة بمساحة 55 كم² بنسبة 16.32% من المساحة الكلية للمدينة، مسجلة أكبر انخفاض بين الفئات بانخفاض قدره 43.55 كم²، نظراً لاستغلالها كمخزون مكاني استراتيجي للتوسع.

جدول رقم (2): مصفوفة التحول المكاني المتوقع لمدينة الدمام بين عامي (2026 - 2036م)

الاتجاه الديناميكي	الترتيب (2026) - (2036)	حجم التغير عن عام 2026م (كم ²)	النسبة من المساحة الإجمالية (%)	المساحة المتوقعة لعام 2036م (كم ²)	فئة استخدام الأرض والغطاء الأرضي (LULC)
نمو متسارع	الأولى - الأولى	+46.60	%54.43	183.40	المناطق المبنية
نمو توجيهي	الثالثة - الثانية	+5.69	%20.36	68.59	شبكة الطرق
تراجع حاد جداً	الثالثة - الثانية	-43.55	%16.32	55.00	الرواسب الرملية
انكماش بيئي	الرابعة - الرابعة	-4.78	%4.75	16.02	الغطاء النباتي
تراجع موضعي (ردم ساحلي)	الخامسة - الخامسة	-3.96	%4.14	13.97	المسطحات المائية

المصدر: الباحثة بالاعتماد على شكل رقم (9).

ويتوقع نموذج المحاكاة احتفاظ الغطاء النباتي بالمرتبة الرابعة رغم تراجع مساحته إلى 16.02 كم² بنسبة 4.75% من مساحة المدينة، بنقص قدره 4.78 كم²؛ نتيجة تأثره بمشاريع التطوير العقاري. وفيما يتعلق بالمسطحات المائية فقد استقرت في المرتبة الأخيرة مع تراجع مساحتها إلى 13.97 كم² بنسبة 4.14% من إجمالي مساحة مدينة الدمام، بعجز مكاني قدره 3.96 كم².

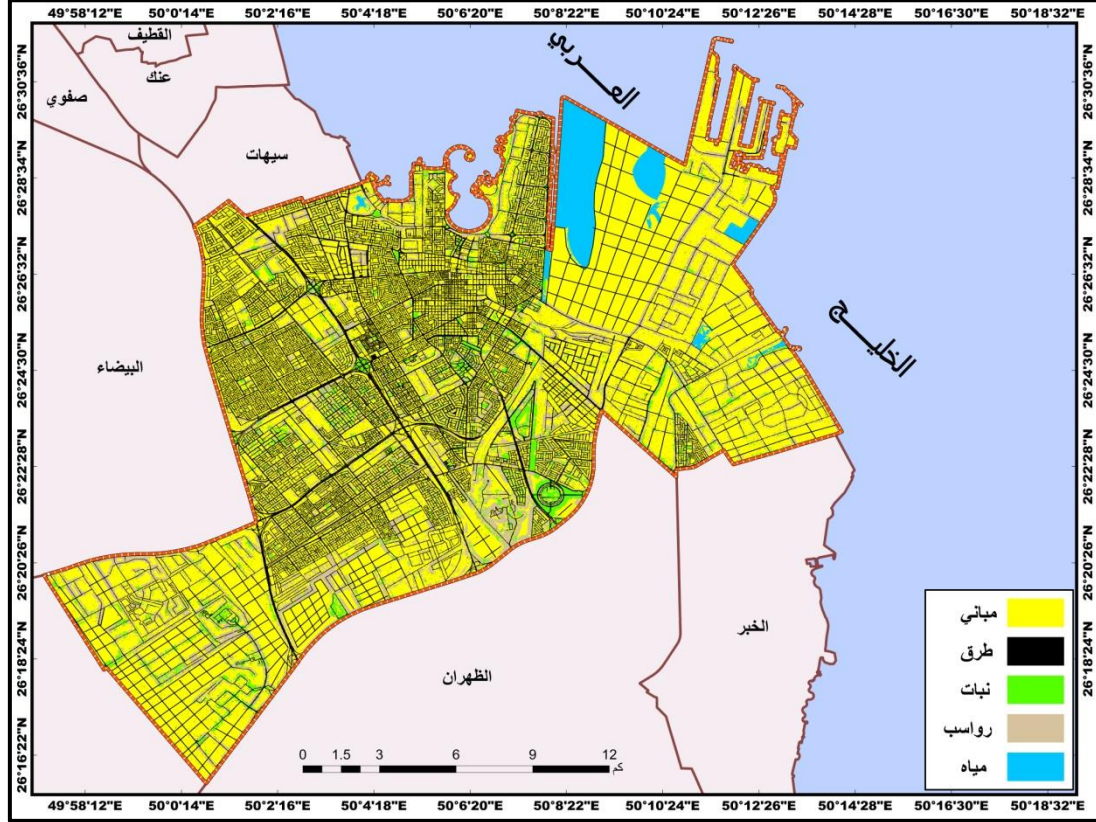
(د) محاكاة النمو العمراني عام 2046م: توصلت نتائج مخرجات التنبؤ واستشراف البنية المكانية لمدينة الدمام (عام 2046م)، أن الإطار الديناميكي العام للتغير المكاني حسب نتائج مخرجات النمذجة الرقمية باستخدام نموذج المحاكاة المستقبلية (MOLUSCE) لعام 2046م استمرار التحولات الهيكلية في أنماط استخدامات الأرض وأغبيتها (LULC) في مدينة الدمام. وتكشف المؤشرات عن اتجاه ديناميكي غير عشوائي محكوم بمحددات تنموية وجغرافية، أبرزها: القرب من شبكات النقل والمحاور المرورية القائمة، والامتداد الفيزيائي للكتل العمرانية، وتوافر الأرض الصالحة للتطوير. وتتجه هذه الديناميكية نحو نمو متسارع للمجال الميني والبنية التحتية، على حساب انكماش تدريجي في الأغنية الطبيعية وشبه الطبيعية. أظهرت نتائج المحاكاة جدول رقم (3) تبايناً كمياً ومكانياً بين مختلف الفئات بحلول عام 2046م مقارنة بسنة الأساس 2036م، وفقاً لما يلي: المناطق المبنية (العمران): يُتوقع المقترح التنبؤي توسع الكتلة العمرانية لتشغل المرتبة الأولى بمساحة تصل إلى 194.03 كم²، مستحوذة على 57.57% من إجمالي مساحة المدينة، وبزيادة صافية بلغت 10.63 كم². ويعزى هذا النمو الأفقي إلى الضغوط الديموغرافية، التوسع الاقتصادي، والطلب المطرد على الأرض السكنية.

جدول رقم (3): التغير الكمي المتوقع في استخدامات الأرض بمدينة الدمام بين عامي (2036 - 2046م)

الاتجاه الديناميكي للفئة الأرضي (LULC)	حجم التغير عن عام 2036م (كم ²)	النسبة من المساحة الإجمالية (%)	المساحة المتوقعة لعام 2046م (كم ²)	فئة استخدام الأرض والغطاء الأرضي (LULC)
نمو متسارع	10.63+	%57.57	194.03	المناطق المبنية
نمو تدريجي متزامن	3.79+	%21.47	72.38	شبكة الطرق
تراجع حاد	8.75-	%13.72	46.25	الرواسب الرملية
انكماش مستمر	3.00-	%3.87	13.02	الغطاء النباتي
تراجع موضعي (ردم ساحلي)	2.66-	%3.36	11.306	المسطحات المائية

المصدر: الباحثة بالاعتماد على شكل رقم (10).

ومن المتوقع أن تحافظ الطرق على المرتبة الثانية من حيث المساحة، إذ يُتوقع تمددها لتغطي 72.38 كم² بنسبة 21.47% من المساحة الكلية، مسجلةً زيادة بحوالي 3.79 كم². ويعكس هذا الترابط الوظيفي والمكاني استجابة البنية التحتية لمتطلبات الوصول وكفاءة الربط بين الأحياء المستحدثة.



شكل رقم (16) محاكاة النمو العمراني وتغير استخدام الارض بمدينة الدمام عام 2046م

المصدر: الباحثة بالاعتماد على نموذج (MOLUSCE).

ويتوقع أن تشهد الرواسب الرملية التراجع الأكبر بين الأغصية الطبيعية، حيث تنخفض مساحتها إلى 46.25 كم² بنسبة 13.72% من المساحة الإجمالية، وبانخفاض حاد يُقدر بنحو 8.75 كم². ويمثل هذا التراجع دور الرواسب الرملية بوصفها المورد المكاني والاحتياطي الرئيسي للتوسع الحضري، نظراً لانخفاض تكاليف تجهيزها هندسياً وقابليتها العالية للتطوير المباشر. واستقر لغطاء النباتي في المرتبة الرابعة بنسبة يمكن ان تتراجع إلى 3.87% وبمساحة تُقدر بـ 13.02 كم²، مسجلاً عجزاً مكانياً يبلغ 3 كم². ويعود هذا التدهور إلى زحف الكتلة الخرسانية على الأرض المشجرة والمفتوحة الواقعة ضمن نطاق الامتداد الحضري. وسوف يستمر التراجع التدريجي للمساحات المائية لتصل إلى 11.306 كم² بنسبة (3.36% من المساحة الكلية)، بفقدان مكاني قدره 2.66 كم²؛ نتيجة للضغوط التنموية على المناطق الساحلية، والأنشطة المرتبطة بالردم والدفن لأغراض التطوير العقاري والسياحي والتجاري.

(ه) محاكاة النمو العمراني عام 2056م: تشير مخرجات النمذجة الديناميكية لنموذج (MOLUSCE) الخاص بمحاكاة التغيرات المستقبلية في استخدامات الأرض والغطاء النباتي لمدينة الدمام بحلول عام 2056م، إلى استمرار التنافس المكاني لصالح البيئة العمرانية المشيدة على حساب الأغصية الطبيعية وشبه الطبيعية. وتوضح ملامح هذا التحول جدول رقم (4) من خلال الاتجاهات التالية: الكتلة العمرانية المبنية: يُتوقع الشغل المكاني

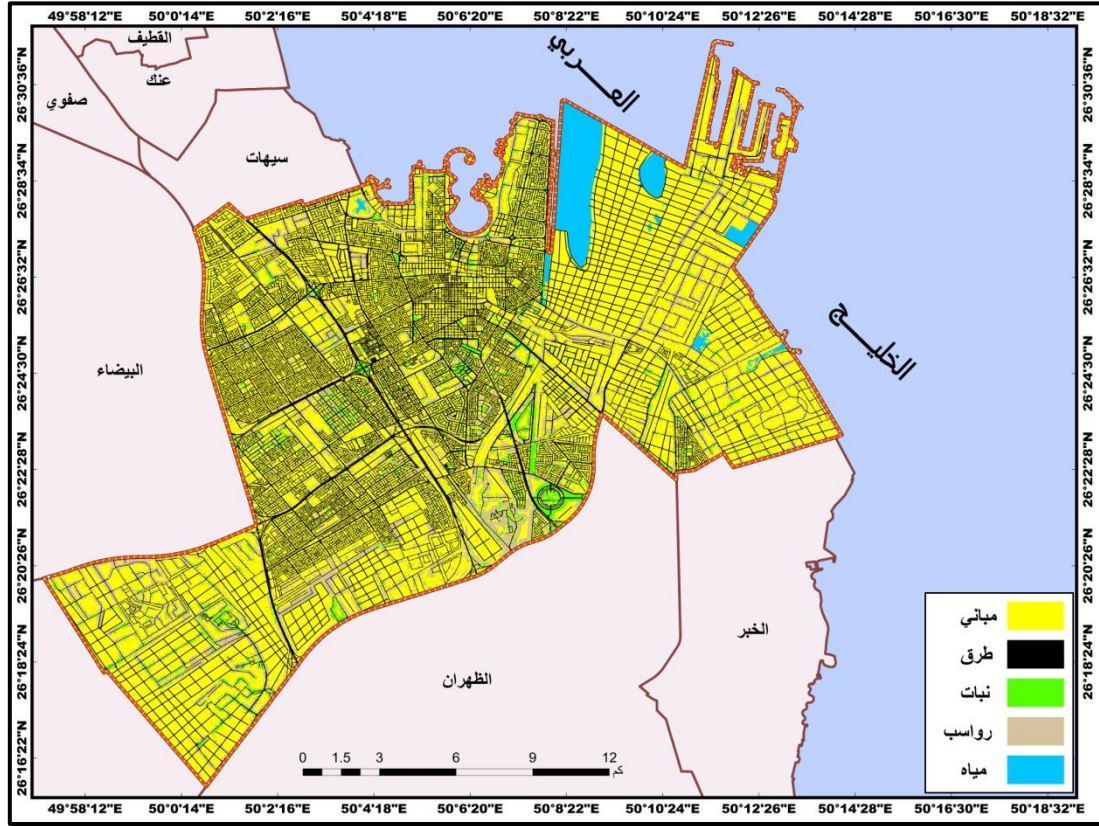
للمناطق المبنية مساحة تصل إلى 203.27 كم²، لتستحوذ على الحصة الأكبر بنسبة 60.33% من إجمالي مساحة المدينة، مسجلةً نمواً أفقياً صافياً يبلغ 10.63 كم² مقارنة بالعام التنبؤي السابق 2046م. وتتماشى كفاءة التمدد العمراني مع توسع شبكات النقل، حيث يُتوقع نمو مساحة الطرق لتصل إلى 77.82 كم² (23.1% من المساحة الإجمالية)، بزيادة مطردة بلغت 5.44 كم² عن عام 2046م. وتواجه الرواسب الرملية تراجعاً حاداً نتيجة الزحف العمراني، حيث يُتوقع انكماش مساحة الرواسب الرملية إلى 36.4 كم² بنسبة (10.8% من مساحة المدينة)، مسجلةً أعلى معدل فقد بين الأغشية بنقصان قدره 9.85 كم². ويستمر التدهور التدريجي للمساحات الخضراء والمزارع ليتقلص إلى 10.46 كم² بنسبة (3.1% من المساحة الكلية)، وبِعجز مكاني يُقدر بـ 2.55 كم² مقارنة بعام 2046م.

جدول رقم (4): التغير الكمي المتوقع في استخدامات الأرض بمدينة الدمام (2046 - 2056م)

اتجاه التغير الديناميكي	حجم التغير مقارنة بعام 2046م (كم ²)	النسبة المئوية من المساحة الإجمالية (%)	المساحة المتوقعة لعام 2056م (كم ²)	فئة استخدام الأرض والغطاء الأرضي (LULC)
نمو متسارع	10.63+	60.33%	203.27	المناطق المبنية (العمران)
نمو مطرد	5.44+	23.10%	77.82	شبكة الطرق
تراجع حاد	9.85-	10.80%	36.40	الرواسب الرملية
تراجع مستمر	2.55-	3.10%	10.46	الغطاء النباتي
تراجع تدريجي	2.28-	2.67%	9.03	الأسطح المائية

المصدر: الباحثة بالاعتماد على شكل رقم (11).

تظهر المحاكاة انخفاضاً مستمراً في الأسطح المائية لتصل إلى أدنى مستوياتها عند 9.03 كم² بنسبة 2.67% من المساحة الإجمالية، بتراجع قيمته 2.28 كم². ويرجع هذا التحول الهيكلي في مدينة الدمام حسب نموذج المحاكاة، إلى تضافر مجموعة من العوامل الاقتصادية والديموغرافية والجغرافية، فمن دوافع نمو المناطق المبنية والطرق (الاتجاه الموجب): النمو الديموغرافي والطلب الإسكاني، حيث تعتبر مدينة الدمام مركزاً جاذباً للسكان والعمالة نتيجة للأنشطة الصناعية، مما يولد ضغطاً مستمراً لإنشاء مخططات سكنية وتجارية جديدة. وبالتالي وترجع زيادة مساحة الطرق (5.44 كم²) إلى ربط الحواضر الحضرية (الدمام-الخبر-الظهران) بشبكات نقل ضخمة، حيث يسبق شق الطرق عادةً التوسع العمراني أو يتزامن معه لفتح آفاق استثمارية جديدة في ضواحي المدينة. أما أسباب تراجع الرواسب الرملية (الاتجاه السالب الأكبر) إلى سهولة التسوية والتطوير العقاري: تمثل الرواسب الرملية والأرض الفضاء الخيار الجغرافي الأسهل والأقل تكلفة للتوسع الأفقي؛ لذا يتم تحويل هذه الأرض الطبيعية مباشرة إلى أراضٍ مطورة لسد حاجة العمران. ويمكن ربط تراجع الغطاء النباتي والأسطح المائية (الاتجاه السالب) إلى تحويل الأرض الزراعية في أطراف الدمام إلى زحف عمراني، حيث يفضل ملاك الأرض تحويلها إلى مخططات سكنية أو استراحات تجارية نظراً لارتفاع قيمتها مقارنة بالعائد الزراعي. ويُعزى تراجع الأسطح المائية إلى دفن الشواطئ المستمرة لتوفير واجهات بحرية ومشاريع استثمارية وسياحية، وهو ما يؤدي إلى تجفيف البيئات المائية الضحلة وتحويلها إلى أراضٍ صلبة قابلة للبناء.



شكل رقم (17) محاكاة النمو العمراني وتغير استخدام الارض بمدينة الدمام عام 2056م

المصدر: الباحثة بالاعتماد على نموذج (MOLUSCE).

الاستنتاجات:

- نجح البحث في إعداد خرائط دقيقة للنمو العمراني وتحديد اتجاهات التوسع الحضري وتغير استخدامات الأرض، مع تطوير نموذج تنبؤي فعال يدعم سيناريوهات التخطيط الحضري المستقبلي.
- أظهرت نتائج نموذج (MOLUSCE) كفاءة عالية في التنبؤ بالتوسع العمراني ومحاكاة ديناميكية استخدامات الأرض وتمثيل الأنماط المكانية للتغير الحضري.
- بينت النتائج أن التغيرات المكانية في مدينة الدمام تتبع نمطاً منظماً مرتبطاً بعوامل جغرافية واضحة، وهو ما أكدته ارتفاع قيم مؤشرات (Kappa).
- تؤكد مؤشرات الاتفاق المرتفعة موثوقية النموذج وصلاحيته لدعم التخطيط الحضري، وتقييم سيناريوهات التوسع العمراني، وإدارة استخدامات الأرض، وحماية المناطق البيئية الحساسة.
- كشفت نتائج النموذج عن تزايد التوسع العمراني على حساب المساحات المفتوحة والغطاء النباتي، مما يفرض ضغطاً بيئية متنامية، ويبرز الحاجة إلى تبني سياسات تخطيط حضري مستدامة تقوم على التكتيف الحضري وتحقيق التوازن البيئي.

التوصيات:

- توظيف نماذج المحاكاة المكانية، مثل (MOLUSCE)، في دعم التخطيط الحضري والتنبؤ باتجاهات التوسع العمراني المستقبلية.
- اعتماد خرائط القابلية المكانية لتوجيه التنمية نحو المناطق الملائمة بيئياً واقتصادياً، والحد من التوسع العشوائي والضغط على الموارد والبنية التحتية.
- وضع سياسات وتشريعات لحماية المسطحات المائية والغطاء النباتي والأرض المفتوحة، بما يعزز التوازن البيئي داخل المدينة.



- تطوير شبكات النقل والبنية التحتية بصورة متوازنة تتوافق مع اتجاهات النمو العمراني المستقبلية.
- إنشاء قواعد بيانات جغرافية محدثة باستمرار لدعم رصد التغيرات المكانية وتحسين دقة النماذج التنبؤية.
- تعزيز استخدام تقنيات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية في مراقبة التغيرات الحضرية وإدارة التنمية المكانية.
- الاستفادة من مخرجات النماذج المكانية في إعداد المخططات الهيكلية والاستراتيجيات العمرانية المستقبلية.
- ترشيد استغلال الأرض الطبيعية والحد من التوسع الأفقي، مع دعم سياسات التنمية الرأسية ورفع كفاءة استخدام الأرض.
- تشجيع الدراسات المستقبلية التي تدمج المتغيرات الاقتصادية والديموغرافية والبيئية لتحسين فهم التغير الحضري ودقة التنبؤات.
- تبني استراتيجيات تنموية مستدامة تحقق التوازن بين التوسع العمراني والمحافظة على الموارد البيئية بما يتوافق مع رؤية المملكة 2030.

المصادر

1. Ahmad, M.N., Shao, Z., Javed, A. (2022). Modelling Land Use/Land Cover (LULC) Change Dynamics, Future Prospects, and Its Environmental Impacts Based on Geospatial Data Models and Remote Sensing Data. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 30, 32985–33001.
2. Baghel, S., Kothari, M.K., Tripathi, M.P., Singh, P.K., Jain, S.K. (2024). Spatiotemporal LULC Change Detection and Future Prediction for the Mand Catchment Using MOLUSCE Tool. *Environ. Earth Sci*, 83, 1–15.
3. Baig, M. F., Mustafa, M. R. U., Baig, I., Takaijudin, H. B., & Zeshan, M. T. (2022). Assessment of Land Use Land Cover Changes and Future. *Water*, 1–17. <https://doi.org/10.3390/w14030402>.
4. Beroho, M., Briak, H., Cherif, E. K., Boulahfa, I., Ouallali, A., Mrabet, R., Kebede, F., et al. (2023). Future Scenarios of Land Use/Land Cover (LULC) Based on A CA-Markov Simulation Model: Case of a Mediterranean Watershed in Morocco. *Remote Sensing* 15(4): 1162. DOI: 10.3390/rs15041162.
5. Boakye, E., Anyemedu, F. O. K., Quaye-Ballard, J. A., and Donkor, E. A. (2020). Spatio-Temporal Analysis of Land Use/Cover Changes in the Pra River Basin, Ghana. *Applied Geomatics* 12: 83–93. DOI: 10.1007/s12518-019-00278-3.
6. Eman A., Gawali, B. W. (2022). Modeling Land Use Change in Sana'a City of Yemen with MOLUSCE. *Hindawi Journal of Sensors*, 2022, 1-15, <https://doi.org/10.1155/2022/741903>.
7. Gündüz, H. H. (2025). Land-Use Land-Cover Dynamics and Future Projections Using GEE, ML, and QGIS-MOLUSCE: A Case Study in Manisa. *Sustainability*, 17(4), 1363; <https://doi.org/10.3390/su17041363>.
8. Iskandar, B., Kurnia. A. A., Jauhari, A., Zannah, F. (2024). Modeling Land Cover Change Using MOLUSCE in Kahayan Tengah Forest Management Unit, Kalimantan Tengah. *Jurnal Sylva Lestari*, 12(2), 242-257, May 2024 DOI: <https://doi.org/10.23960/jsl.v12i2.865>.
9. Khwarahm, Nabaz R., Najmaddin, Peshawa M., Ararat, Korsh and Qader, Sarchil (2021) Past and future prediction of land cover land use change based on earth observation data by the CA–Markov model: a case study from Duhok governorate,



Iraq. Arabian Journal of Geosciences, 14 (15), [1544]. (doi:10.1007/s12517-021-07984-6).

10. Kumari, S. and Roy, A.. (2024). Simulation of Land Use and Land Cover Using the MOLUSCE Plugin Integrated with QGIS for the Western Himalayan Region of India, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-5, 81–85, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-5-2024-81-2025>, 2025.

11. Mandal, B., Mondal, S., & Mandal, S. (2023). GISbased landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping of Darjeeling Himalaya, India using weights of evidence (WoE) model. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(7). <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11523-w>.

12. Osman, M. A. A., Abdel-Rahman, E. M., Onono, J. O., Olaka, L. A., et al. (2023). Mapping, Intensities and Future Prediction of Land Use/Land Cover Dynamics Using Google Earth Engine and CA-Artificial Neural Network Model. *PLOS ONE* 18(7): e0288694. DOI: 10.1371/journal.pone.0288694.

13. Ramadan, G. F., and Hidayati, I. N. (2022). Prediction and Simulation of Land Use and Land Cover Changes Using Open Source QGIS. A Case Study of Purwokerto, Central Java, Indonesia. *The Indonesian Journal of Geography*, 54(3), 344–351. DOI: 10.22146/ijg.68702.

14. Tewabe, D., and Fentahun, T. (2020). Assessing Land Use and Land Cover Change Detection Using Remote Sensing in the Lake Tana Basin, Northwest Ethiopia. *Cogent Environmental Science*, 6, <https://doi.org/10.1080/23311843.2020.1778998>.

15. Wang, Q., Guan, Q., Sun, Y., Du, Q., Xiao, X. et al. (2023). Simulation of Future Land Use/Cover Change (LUCC) in Typical Watersheds of Arid Regions under Multiple Scenarios. *J. Environ. Manag.*, 335, 117543.