

## Urban Metabolism and Material Flow Analysis in the Greater Cairo Region: A Case Study

### الأيض الحضري وتحليل تدفق المواد في إقليم القاهرة الكبرى: دراسة حالة

مينا نظمي يونان<sup>1\*</sup>، أحمد عثمان الخولي<sup>1</sup>، غادة أحمد يس<sup>1</sup>

<sup>1</sup> قسم الهندسة المعمارية، كلية الهندسة بشبين الكوم

<sup>2</sup> طالب دكتوراه – قسم الهندسة المعمارية – كلية الهندسة بشبين الكوم

(Corresponding author: m.nazmy@sh-eng.menofia.edu.eg) \*

#### ملخص البحث

إن تعزيز حياة البشر هو هدف التخطيط الحضري للتنمية المستدامة. يواجه التخطيط الحضري المعاصر قضايا وتحديات ظهرت مع ظهور الاهتمامات البيئية، والتي تتطلب طريقة عمل مختلفة مقارنة بتلك المستخدمة في الماضي. وصاحب تحسن مستويات المعيشة أساليب جديدة للإنتاج والاستهلاك أدت إلى نمو في توليد النفايات البلدية الصلبة ونفايات الميثان، وهي من بين غازات الدفيئة المسؤولة عن تغير المناخ. باستخدام إقليم القاهرة الكبرى كدراسة حالة، يستخدم المؤلفون مفهوم الأيض الحضري وتحليل تدفق المواد لوضع سيناريوهات للمستقبل بفرض استمرار إعداد وتنفيذ المخططات العمرانية بالطرق التقليدية المعتادة. تعددت مصادر البيانات فمنها ما وفرته السلطات المصرية بالإضافة إلى المؤسسات الدولية. التقنيات المستخدمة في التحليل هي نمذجة ديناميكية مدعومة بنظام المعلومات الجغرافية. تظهر النتائج التي توصلنا إليها أنه في ظل السيناريو الأفضل، سيكون عدد سكان إقليم القاهرة الكبرى حوالي 33.35 مليوناً في عام 2050، بينما يتوقع السيناريو الأسوأ أن يبلغ عدد السكان 40.33 مليوناً؛ وستبلغ انبعاثات الغازات الدفيئة للمخلفات الصلبة والمياه العادمة 703041 جيجا جرام تقريباً في عام 2050. تلقي النتائج بظلال من الشك على قدرة الإقليم على تحقيق الحياد الكربوني، ونتيجة لذلك، الرغبة في فرض ضوابط صارمة على انبعاثات الغازات الدفيئة.

الكلمات المفتاحية: مخطط الحلقة السببية، النماذج الديناميكية InVEST، MOLUSCE

#### Abstract:

Enhancing the lives of humans is the aim of urban planning for sustainable development. Contemporary urban planning faces issues and challenges that emerged with the rise of environmental concerns, requiring a different modus operandi than those used in the past. Improved living standards accompanied new modes of production and consumption that resulted in growth in the generation of solid municipal wastes and wastewater emitting methane, which is among the Greenhouse Gases responsible for climate change. Using the Greater Cairo region as a case study, the authors employ the concept of urban metabolism and material flow analysis to elaborate scenarios for the future in the case of Business-As-Usual. Sources of the data are Egyptian authorities plus international institutions. The technique used in the analysis is dynamic modeling augmented with GIS. Our findings show that under the best-case scenario, the population of GCR would be around 33.348 million in 2050, while the worst-case scenario predicts a population of 40.334 million. Solid waste and wastewater emissions will be approximately 703,041 Gg in 2050. These findings cast doubt on GCR's potential to achieve carbon neutrality and, as a result, the urge for strict controls on GHG emissions.

**Keywords:** Causal Loop Diagram, Dynamic models, InVEST, MOLUSCE

## 1- تمهيد

الخضراء بنسبة ثلاثة في المئة في العقدين الأولين من القرن الحالي، بينما ارتفعت نسبة الأسطح الخرسانية من 23 إلى 35 في المئة من المساحة الكلية للمدينة؛ ووفقاً لتوقعات الهيئة الحكومية لتغير المناخ<sup>1</sup> بسيناريو الانبعاثات العالية جداً، سيرتفع معدل الوفيات في القاهرة نتيجة الحرارة الزائدة إلى 80 حالة وفاة لكل 100 ألف شخص. رصد الباحثون معدل الوفيات المرتبطة بالحرارة الزائدة في القاهرة عام 2020 بأربع وفيات لكل 100 ألف شخص [4].<sup>2</sup>

يوضح مؤشر Arcadis للمدن المستدامة<sup>3</sup> (The Arcadis Sustainable Cities Index) الذي يستكشف الاستدامة الحضرية من خلال منظور الازدهار<sup>4</sup>، إن القاهرة تحتل المرتبة 79 و 91 في مؤشر البنية التحتية ونوعية الاقتصاد، مما أدى إلى احتلال القاهرة المركز 86 بين 100 مدينة حول العالم [5].

في عام 2023 احتلت القاهرة المرتبة الـ 226 من بين 242 مدينة حول العالم في مؤشر جودة الحياة حيث توضح البيانات في جدول 1 أن مؤشر التلوث يومي إلى بيئة معيشية غير صحية، بينما يلقي مؤشر المناخ الشكوك بشأن قدرة العاصمة المصرية على الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة، وبالتالي يشير وضع القاهرة إلى قدراتها المحدودة في جذب المستثمرين، وهذا ما يفسر أداءها الاقتصادي المتواضع، حيث يعتمد رجال الأعمال على تقارير جهات مستقلة بحثاً عن أفضل فرص للاستثمار [6].

تواجه العاصمة المصرية العديد من المشاكل البيئية، وذلك بسبب انخفاض كفاءة التخطيط المكاني وتوزيع السكان والإدارة الحضرية السليمة، وهجرة السكان من الريف إلى المدن للبحث عن فرص عمل وظروف معيشية أفضل، وقد أدت هذه العوامل إلى إحداث ضغوط على الموارد الطبيعية [1]، مما أدى إلى هروب الأثرياء إلى التجمعات المسورة (Gated Communities) بالمدن الجديدة بإقليم القاهرة الكبرى، واستقرار العديد من المهاجرين في المناطق العمرانية المتدهورة داخل المدينة أو إنشاء مناطق لا رسمية على حدود الكتلة العمرانية.

وفقاً لبوابة البيانات المصرية ومجلس السكان، تعد القاهرة أكبر المدن المصرية من حيث المساحة وعدد السكان. تقع القاهرة بالقرب من دلتا النيل، ويضم إقليم القاهرة الكبرى عدداً من المدن التاريخية منذ عصر قدماء المصريين [2]. وقد ازداد عدد سكان المدينة من 348 ألف نسمة في عام 1882 إلى 2.10 مليون نسمة في 1947 ووصل عدد سكانها في عام 2016 إلى 12 مليون نسمة، ويرجع الزيادة في النمو إلى الاحتفاظ بمعدل مواليد مرتفع (30 مولود لكل ألف شخص)، مع انخفاض معدل الوفيات (سبع وفيات لكل ألف شخص) نتيجة تحسن الخدمات الصحية [3].

يتم التخطيط الحضري للقاهرة باستخدام المناهج التقليدية والتي لا تأخذ في الاعتبار كافة العوامل البيئية، مما أدى إلى تراجع المساحات

جدول 1 مؤشرات نوعية الحياة في القاهرة عام 2023 المصدر: NUMBEO<sup>5</sup> [6]

مؤشر جودة الحياة	مؤشر القوة الشرائية	مؤشر الأمان	مؤشر الرعاية الصحية	مؤشر تكلفة المعيشة	مؤشر نسبة سعر العقار إلى الدخل	مؤشر وقت تنقل حركة المرور	مؤشر تلوث	مؤشر المناخ
81.4	22.9	50.0	45.5	24.1	11.9	50.2	91.5	88.5

عرف كينيدي وآخرون [12] الأيض الحضري بأنه مجموع العمليات التقنية الشاملة أي الإنتاج والاستهلاك وما يصاحبهما من التعاملات الاجتماعية والاقتصادية في المدينة، مما يؤدي إلى النمو وإنتاج الطاقة والحاجة لإدارة المخلفات بكافة صورها؛ لذلك استخدم وولمان [13] تحليل تدفق المواد (Material Flow Analysis) لأول مرة لبحث الأيض الحضري. حيث يعتبر تحليل تدفق المواد تقييماً منهجياً للمواد ومخزوناتهما وتتبع تدفقاتها داخل النظام المحدد بمرور الوقت وتغير المكان [14]. كما أن الغرض من تحليل تدفق المواد هو قياس مدى كفاءة استخدام الموارد والآثار المحتملة على البيئة [15].

يرمي الهدف 11 من أهداف التنمية المستدامة إلى رفع مرونة المدينة (Resilience) وذلك بتقليل تأثيرها على البيئة، من خلال الاهتمام بنوعية الهواء وإدارة المخلفات البلدية وغيرها من أنواع المخلفات الصلبة. بالإضافة إلى ذلك، يهدف تخطيط المدن إلى توفير الخدمات الاجتماعية والبنية التحتية للجميع [11].

تواجه مصر تحديات كبيرة في تحقيق الهدف 11 من أهداف التنمية المستدامة، حيث أوضح تقرير المتابعة إلى تحسين طفيف في مؤشرات التنمية المستدامة؛ فقد انخفضت نسبة السكان في الأحياء الفقيرة بشكل ضئيل في عام 2018. في عام ، تمكن 98.8 في المئة من السكان من

أدى النمو الحضري السريع في إقليم القاهرة الكبرى إلى مشاكل بيئية حادة ينبغي معالجتها، فعلى سبيل المثال لا الحصر، يعتبر نظام جمع المخلفات الصلبة غير مكتمل حيث يتم التخلص منها بواسطة الحرق أو إلقائها في الأراضي الفضاء والخربة، لذلك أكد تقرير وزارة البيئة أن 8.1 في المئة من انبعاثات الغازات الدفيئة سببها المخلفات والنفايات الصلبة، وهي السبب في قرابة 14 إلى 17 بالمئة من الجسيمات العالقة PM<sub>2.5</sub> و PM<sub>10</sub><sup>7</sup> في هواء القاهرة [7]؛ لذلك تخطط الحكومة لتحسين البنية التحتية لنظام إدارة المخلفات الصلبة، وتوسيع شبكات مياه الشرب والصرف الصحي مع تطوير نظم معالجة المياه العادمة [8]. يدفع النمو الحضري إلى زيادة الطلب على الأراضي والموارد الطبيعية، ودائماً ما يكون مصحوباً بتوسع في عمليات الإنتاج والاستهلاك [10]، [9]، وبالتالي تزيد كميات المتولدة من المخلفات الصلبة والسائلة مما يضاعف الضغوط على الموارد الطبيعية، فضلاً عن زيادة الطلب على الخدمات الاجتماعية، والبنية التحتية، وفرص العمل، والأراضي المرفقة والإسكان الميسور التكلفة [11]، مما يثير العديد من المشاكل الخاصة بالأبيض الحضري (Urban Metabolism) وضرورة الحفاظ على الموارد الطبيعية.

<sup>4</sup> لا يمكن لأي مدينة أن تضع نفسها في طريق النجاح والازدهار، إن لم تعتبر صحة بيئتها الطبيعية ونوعية حياة سكانها وتنمية اقتصادية مستدامة من أهم أولوياتها.

<sup>5</sup> Numbeo هي أكبر قاعدة بيانات لتكلفة المعيشة في العالم. هي أيضاً قاعدة بيانات عالمية من مصادر جماعية للبيانات المتعلقة بنوعية الحياة، بما في ذلك مؤشرات الإسكان، ومعدلات الجريمة، وجودة الرعاية الصحية، وجودة النقل، من بين إحصاءات أخرى.

<sup>6</sup> التي يقل قطرها عن 2.5 ميكرون

<sup>7</sup> التي يقل قطرها عن 10 ميكرون

<sup>1</sup> يتنبأ سيناريو الانبعاثات العالية بزيادة درجة الحرارة العالمية من 3.2 إلى 5.4 درجة مئوية بحلول عام 2100.

<sup>2</sup> حسب موقع منظمة الصحة العالمية، ما بين 1998-2017، توفي أكثر من 166 ألف شخص بسبب موجات الحر، بما في ذلك أكثر من 70 ألف لقوا حتفهم خلال موجة الحر عام 2003 في أوروبا.

<sup>3</sup> Arcadis NV هي شركة تصميم واستشارات عالمية للأصول الطبيعية والمبنية ومقرها في أمستردام، هولندا.

الأراضي من خلال تحليل تدفق المواد ومفهوم الأيض الحضري؛ وثانياً، ضرورة استخدام النمذجة الديناميكية في صناعة القرار، حيث إنها تقنية تسمح بتناول العديد من المتغيرات الاقتصادية والحضرية والسكانية والبيئية وإظهار تفاعل بعضها البعض، وذلك بغرض الحفاظ على بيئة المناطق الحضرية ورفاهية قاطنيها. يقدم الباحثون للمراء الحضريين والمخططين أداة علمية يمكن دمجها مع برامج نظم المعلومات الجغرافية، لتعريف أسباب المشاكل في الحضر، وتحديد الغايات المستهدفة، واستخلاص مؤشرات حضرية تسمح بالمتابعة والتقييم.

## 2- البيانات والمنهجية البحثية

يعتمد البحث على الإطار المفاهيمي للضغوط والدوافع والحالة والأثر والاستجابة (شكل 1) الذي يطلق عليه Drivers, (DPSIR) Pressures, State, Impact and Response، حيث تؤدي القوى الدافعة<sup>8</sup> إلى ضغوط على البيئة<sup>9</sup>، والتي تؤدي إلى تغيير حالة البيئة. تشمل التغيرات البيئية فقدان التنوع البيولوجي وتلوث الهواء والمياه والتربة، وهذا يؤثر على قدرة النظم الإيكولوجية لتقديم خدمات (Ecosystem Services) التي تعتمد عليها البشرية. تشمل خدمات النظم البيئية توفير المياه العذبة، والغذاء، والحماية من الأشعة فوق البنفسجية. تتأثر رفاهية الإنسان<sup>10</sup> بسبب التغيرات في خدمات النظم البيئية، نتيجة العوامل الديموغرافية والاجتماعية والاقتصادية والمؤسسية؛ بينما تشمل الاستجابة المحاولات الرسمية وغير الرسمية، إما للتكيف مع التغيرات في خدمات النظم الإيكولوجية، أو للحد من الضغوط البيئية [18].

من الناحية التطبيقية، يعتمد البحث على مفهوم الأيض الحضري لدراسة الروابط بين النمو الحضري والتغيرات البيئية في إقليم القاهرة الكبرى. يطبق البحث نهج تدفق المواد، حيث قام الباحثون بتجميع البيانات الخاصة بالقاهرة الكبرى من عدة جهات حكومية، مثل الجهاز المركزي للتعبئة العامة والإحصاء، والهيئة العامة للتخطيط العمراني، وهيئة المساحة المصرية، ووزارة البيئة. استخدم الباحثون بعض البيانات الدولية مثل خرائط الاستشعار عن بعد 2005 و2015 و2020 من وكالة الفضاء الأوروبية (The European Space Agency). استخدم الباحثون النمذجة الديناميكية باستعمال برنامج (Vensim) لبناء سيناريوهات مستقبلية، وكما قام الباحثون ببناء ثلاثة سيناريوهات بناءً على النمو السكاني المتوقع، ليكون الأساس للتنبؤ بالتغيرات في استعمالات الأراضي والغطاء الحضري وتوليد المخلفات الصلبة والسائلة، وذلك لتقدير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون والقدرة على تبريد المناطق الحضرية (Urban Cooling) [11].

التمتع بخدمات مياه الشرب النظيفة، في عام 2019، انخفض متوسط التركيز السنوي للجسيمات العالقة PM2.5، كان الرضا عن النقل الجماعي أقل في عام 2020. [16]، وعلى ذلك تشكك المؤشرات في قدرة مصر على تحقيق غايات الهدف 11 بحلول عام 2030.

أثار الخولي تساؤلاً حول سبب النجاح المحدود لمخططات الحكومة المُعدَّة لإقليم القاهرة الكبرى بغية التعامل مع القضايا الحضرية وتحقيق التنمية الاقتصادية والعدالة الاجتماعية. فقد قام بتحليل المخططات المعدة في الماضي ونتائجها وإلقاء الضوء على نقاط الضعف فيها، من خلال مراجعة التقارير الرسمية التي أعدتها الحكومة المصرية والجهات المانحة، والأبحاث المنشورة وغير المنشورة وكذلك أجرى مقابلات مع مسؤولين ممن شاركوا في صياغة وتنفيذ الخطط والسياسات الحضرية، ووجد أنه نادراً ما يتم تنفيذ المخططات؛ ولذلك لا يتم تحقيق العدالة الاجتماعية أو المكانية أو البيئية. كما أوضح أن الهيكل المؤسسي المسؤول عن اتخاذ القرار غالباً ما يكون مسؤولاً عن النجاح المحدود للمخططات الحضرية، وهو ما تسبب في تفاقم القضايا البيئية في إقليم القاهرة الكبرى. يهدف التخطيط الحضري المعاصر إلى تنمية حضرية مستدامة، ويتطلب ذلك استخدام تقنيات تخطيط مختلفة، مثل الأيض الحضري. حيث ذكر سابقاً أن القاهرة نمت وتطورت باتباع المناهج التقليدية التي تتناول الأبعاد المادية، وتهمل الجوانب الاقتصادية والاجتماعية والبيئية. حيث لا يأخذ معظم المخططين المصريين في الاعتبار التأثير البيئي أثناء إعداد الخطط الحضرية. كما أنهم لا يستخدمون مفهوم الأيض الحضري لتقييم الأثر البيئي من خلال تحليل تدفق المواد [17].

في بيئة محدودة الموارد، يجب تحسين إدارة الأنظمة الإيكولوجية وتعزيز الاقتصاد الدائري. [9]. لذا يحاول البحث الإجابة على الأسئلة التالية:

1. ما تأثير النمو الحضري السريع وتغير استخدامات الأراضي وغطاء الأراضي على توليد المخلفات وإنتاج الغازات الدفينة بإقليم القاهرة الكبرى؟
2. ما هي العواقب المؤثرة على البيئة وسكان إقليم القاهرة الكبرى؟
3. ما هي الإجراءات التي يجب اتخاذها من أجل مستقبل أكثر استدامة؟

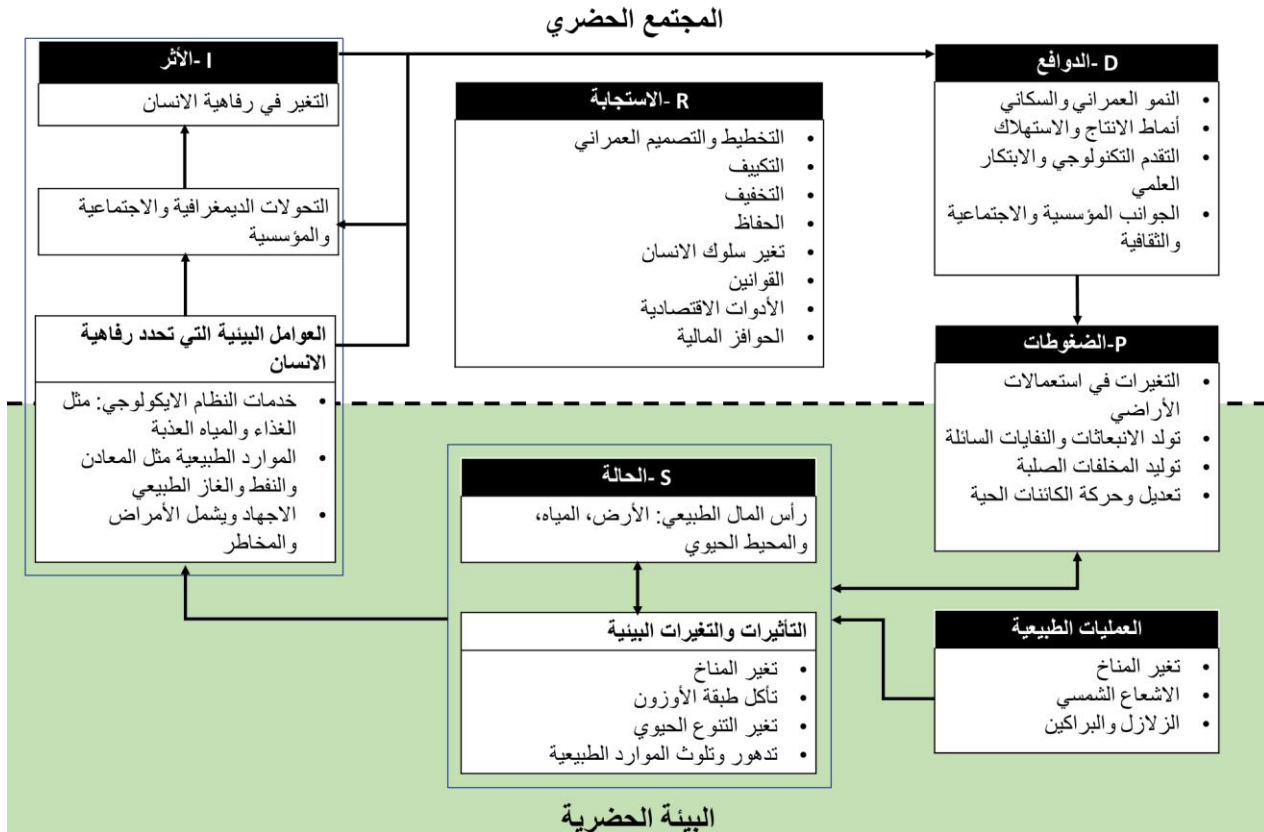
يستخدم الباحثون الأسلوب الكمي في بناء سيناريوهات النمو العمراني مع النمذجة الديناميكية في تقدير زيادة معدلات انبعاثات الغازات الدفينة والمخاطر البيئية المرتبطة بها في إقليم القاهرة الكبرى. يسعى الباحثون أولاً إلى تقدير انبعاثات الغازات الدفينة جراء التغيرات في استعمالات

<sup>10</sup> تتمثل رفاهية الإنسان في الصحة والأصول المادية والعلاقات الاجتماعية الجيدة والأمن.

<sup>11</sup> تبريد المناطق الحضرية (Urban cooling) هي قدرة المناظر الطبيعية على تقليل درجات الحرارة داخل المدن والحد من الجزر الحرارية للمدن

<sup>8</sup> تتمثل الدوافع في التغيرات الديموغرافية والعمليات الاقتصادية والاجتماعية.

<sup>9</sup> تتمثل الضغوطات على البيئة في تغير استخدام الأراضي، واستخراج الموارد، وانبعاثات الملوثات والمخلفات، وتعديل الكائنات الحية وحركتها.



شكل 1 الإطار المفاهيمي للضغوط والدوافع والحالة والأثر والاستجابة DPSIR، المصدر: [19] El-Kholei & Abido

ب قيمة ميل المنحني وهو ما يمثل التغير في تعداد السكان  
س عدد السكان في السنوات من 1966 حتى 2017  
استخدم الباحثون النموذج الأسّي المعدل (Modified Exponential)  
في السيناريو الثالث، معادلة 3، حيث تنص صيغة التنبؤ على أن السكان  
في سنة الهدف (س<sub>ت</sub>) يتم احتسابها بطرح معدل الشغور أي (ف<sup>ن</sup>)  
مضروباً في الطاقة الاستيعابية غير المستخدمة لإقليم القاهرة الكبرى  
(ح- س<sub>ت</sub>) وطرحها من الحد الأقصى للسعة (ح) [20]،  
معادلة 3

$$س_{ت+1} = ح - \left[ (ف^ن) \times (س - ح) \right]$$

حيث  
س<sub>ت+1</sub> إسقاط السكان في السنة (ت+ ن)  
س<sub>ت</sub> إسقاط السكان في السنة (ت)  
ف معدل الشغور  
ح الحد الأقصى للسعة

استخدم الباحثون أدوات التفسير الكمي التالية بعد حساب عدد السكان  
المتوقع للإجابة عن أسئلة البحث:

1. حيث استخدم الباحثون نماذج الشبكة العصبية الاصطناعية<sup>12</sup>  
(Artificial Neural Network)، والخلوية الديناميكية<sup>13</sup>  
(Cellular Automata) في المكون الإضافي (Plugin)، وطرق

يعد أساس السيناريو الأول هو ناتج نموذج النمو السكاني الخطي البسيط  
(Simple Linear) باستخدام سنة الأساس (ن)، ومعدل النمو (ج)  
لإسقاط السكان في السنة (ت+ن)، حيث (ت) هو زيادة بالسنة، معادلة  
1.

معادلة 1

$$س_{ت+ن} = س_0 + ج \times (ت) \times ن$$

$$حيث ج = (س_0 - س_1) \times ن^{-1}$$

حيث:

س<sub>ت+ن</sub> إسقاط السكان في السنة (ت+ ن)  
س<sub>ت</sub> إسقاط السكان في السنة (ت)  
س<sub>0</sub> إسقاط السكان في سنة الأساس، أي سنة (0)  
ج معدل النمو السكاني لكل وحدة زمنية (ن)  
ن عدد السنوات

يعتمد السيناريو الثاني على تقنية منحنى الملائمة (Curve Fitting)،  
حيث استخدم الباحثون نموذج الانحدار الخطي Linear  
(Regression)، معادلة 2، من خلال حساب اتجاه النمو السكاني بين  
عامي 1966 و 2017؛ لتوقع الزيادة السكانية في عامي 2030 و 2050.  
معادلة 2

$$ص = أ + ب \times س$$

حيث:

ص هي إسقاطات السكان لعامي 2030 و 2050  
أ التقاطع مع المحور الصادي

<sup>13</sup> يتمتع نموذج الأوتوماتيك الخلوية (CA) Cellular Automata بالقدرة  
على المحاكاة، بناءً على افتراض أن النمو الحضري السابق يؤثر على اتجاهات  
التحضر المستقبلية، بناءً على التفاعلات المحلية بين استخدامات  
الأراضي. [33]

<sup>12</sup> الشبكات العصبية الاصطناعية Artificial Neural Networks (ANN)  
هي خوارزمية تحليل البيانات غير الخطية التي تدرّب محركات النمو  
الحضري، وتراعي المتغيرات الأساسية المعقدة أثناء النمذجة [32]

6. استخدم الباحثون مخطط التدفق والمخزون (Stock-flow diagram)، والذي يساعد على تحويل مخطط الحلقة السببية إلى نموذج رياضي يمكن تفعيله لاحتمال النتائج من كل سيناريو، حيث يمثل المخزون القدرة على توليد أنماط التغيير، بينما يتسبب التدفق (المعدلات) في تغيير المخزون، حيث تعمل مخططات المخزون والتدفق كحلقة وصل بين نمذجة ديناميكيات النظام والمحاكاة. تصف مخططات المخزون والتدفق (أو المستوى والمعدل) بنية النظام بشكل أعمق من مخطط الحلقة السببية [23].

7. استعمل الباحثون التقييم المتكامل لخدمات النظم الإيكولوجية والمقايضات (InVEST)، والذي يتكون من أدوات لرسم خريطة مع تقدير كمية الخدمات البيئية ecosystem services التي تحافظ على حياة الإنسان ودعم رفاهيته وقيمتها بالدولار الأمريكي، مما يساعد في تقدير تأثير تغييرات النظام البيئي على البشر [24].

الجدير بالذكر أن البرامج والتطبيقات المستخدمة لا تدعم استخدام اللغة العربية، لذلك فإن عددًا من النتائج والأشكال تظهر باللغة الإنجليزية؛ كما أن هناك قطاعات وأنشطة إنسانية أخرى كالنقل والصناعة مسؤولة عن إنتاج الغازات الدفينة المسببة للاحتباس الحراري وتغير المناخ لم تستخدم في البحث. وقد استخدم الباحثون بيانات تاريخية التي وفرها الجهاز المركزي للتعبئة العامة والإحصاء في عمليات معايرة (Calibration) النموذج بغرض تأكيد صحة البيانات وموثوقيتها (Validity and Reliability of Data).

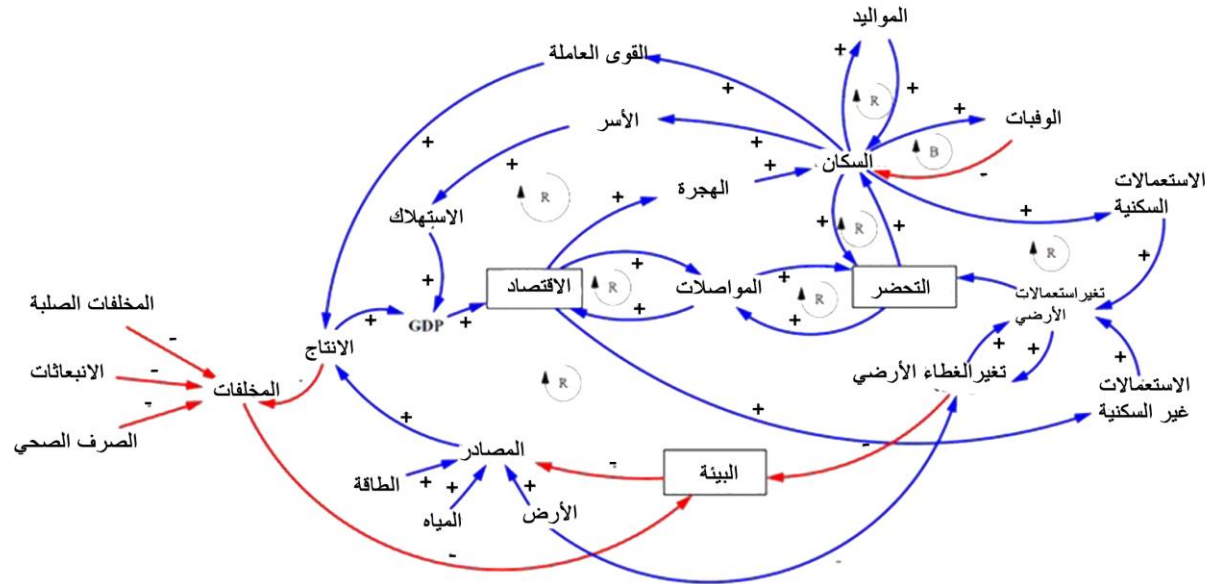
تقييم تغيير استخدام الأراضي<sup>14</sup> (MOLUSCE) لبرنامج QGIS إصدار 2.8.4؛ لتوقع أماكن وأنماط الامتداد الحضري المستقبلي، حيث استخدم الباحثون خرائط عام 2005 و2010 و2015 لمحاكاة الوضع عام 2020، ولمعايرة النموذج (Calibration) وإثبات صحة نتائج المحاكاة بنسبة تصل لحوالي 95 بالمئة.

2. في تحليل بيانات الخاصة بجملة الناتج المحلي، اعتمد الباحثون على تقنية ملائمة المنحنى (curve fitting)، حيث استخدم الباحثون النموذج الأساسي من خلال حساب اتجاه زيادة نمو الناتج المحلي الإجمالي بالجنيه المصري.

3. في تحليل آثار تولد المخلفات الصلبة، اعتمد الباحثون على نموذج 2006 والمنقح في عام 2019 Intergovernmental (Panel on Climate Change (IPCC))<sup>15</sup>؛ وذلك لتقدير كمية المخلفات البلدية والصناعية الصلبة وانبعثاتها.

4. تمكن الباحثون من تتبع التدفق والمخزون باستخدام مخططات التدفق (Sankey diagrams)، وتعد مخططات التدفق أحد عناصر النموذج الديناميكي إلى جانب السيناريوهات الثلاثة للإسقاطات السكانية.

5. استخدم الباحثون مخطط الحلقة السببية<sup>16</sup> (Causal Loop Diagram)، حيث يصور المخطط العلاقات بين المتغيرات الأساسية بصورة نص، والعلاقات السببية على صورة أسهم، كما يحدد المتغير الرئيس وتفاعلاته<sup>17</sup>، ويحدد العلاقات السببية بين المتغيرات [21]، [22]. لقد استخدم الباحثون مخطط الحلقة السببية لتحديد بنية النموذج والتفاعلات بين المتغيرات (شكل 2).



شكل 2 مخطط الحلقة السببية للعلاقات بين المتغيرات (المصدر: الباحثون)

بعضها على بعض. هذه المخططات فعالة للغاية في العثور على مواقع تدخل عالية ومنخفضة النفوذ في النظام، وفعالة كذلك في اكتشاف نمط التغذية الراجعة الكامن وراء النظام. وتوضح هذه المخططات أيضًا القيود الطبيعية للنظام، مما يسمح لنا بتشكيل توقعات أكثر واقعية حول قدرتنا على إحداث التغيير. [34]

<sup>17</sup> الرابط المشار إليه بالعلامة (+) يشير إلى علاقة إيجابية، حيث يؤدي زيادة المتغير السببي إلى زيادة المتغير التابع، والعكس صحيح. ويشير الرابط المشار إليه بالعلامة (-) إلى علاقة سلبية، حيث يؤدي زيادة المتغير السببي إلى انخفاض المتغير التابع أو العكس.

<sup>14</sup> يعد MOLUSCE مكون إضافي لـ QGIS باستخدام لغة الـ Python للمساعدة في الكشف عن التغييرات في استخدامات الأراضي والتحليلات المكانية الأخرى تم إنتاجه بواسطة NextGIS. ويستخدم Kappa كأداة تحقق إحصائية. تستخدم التوقع المبني على متابعة التغيير لتوقع النمو الطبيعي.

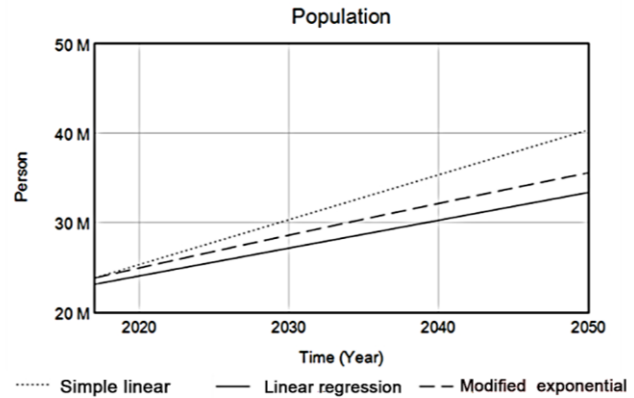
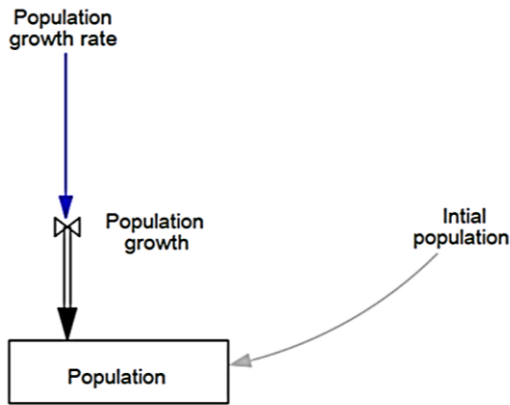
<sup>15</sup> الفريق الحكومي الدولي المعنى بتغير المناخ هو هيئة حكومية دولية تابعة للأمم المتحدة. مهمتها هي تعزيز المعرفة العلمية حول تغير المناخ الناتج عن الأنشطة البشرية. وأنشأت المنظمة العالمية للأرصاد الجوية وبرنامج الأمم المتحدة للبيئة الفريق الحكومي الدولي المعنى بتغير المناخ في عام 1988.

<sup>16</sup> تستخدم مخططات الحلقة السببية (CLDs) لوصف الأنظمة الديناميكية بشكل شامل، وتحديد كيفية تأثير المتغيرات (أي العوامل والمشاكل والعمليات)

يبلغ عدد سكان إقليم القاهرة الكبرى تقريبًا 30.3 و 40.3 مليون نسمة في عامي 2030 و 2050 على التوالي.

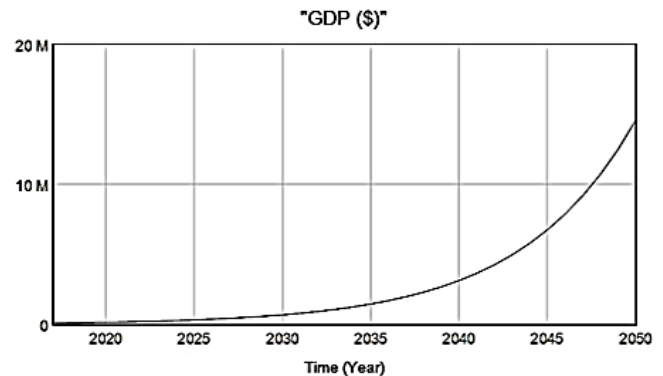
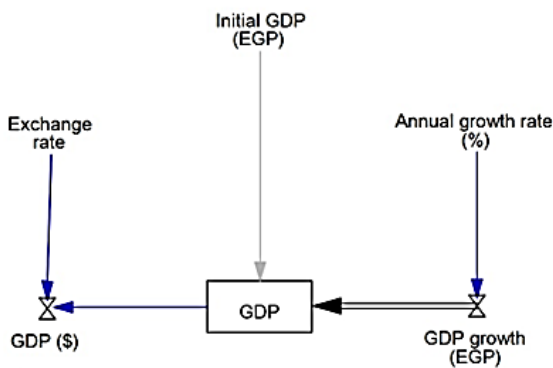
بالنسبة للسيناريو الثاني، فقد استخدم الباحثون نموذج الانحدار الخطي بمعدل زيادة سنويًا 310568 نسمة؛ وبالتالي، سيصل عدد السكان المتوقع إلى 27.14 مليون في عام 2030، و 33.35 مليون نسمة في عام 2050.

استخدم الباحثون النموذج الآسي المعدل في بلورة السيناريو الثالث، حيث تم تقدير الطاقة الاستيعابية لإقليم القاهرة الكبرى (ح) 18 بـ 132.05 مليون نسمة. لذلك نتوقع أن يصل تعداد السكان إلى 28.59 مليون نسمة في عام 2030 و 35.6 مليون نسمة في عام 2050، ويبين شكل 3 السيناريوهات الثلاث لإسقاطات السكان ومخطط التدفق والمخزون الموارد البشرية.



شكل 3 مخطط التدفق والمخزون للسكان وتأثيره 2050-2017 (المصدر: الباحثون)

و 273.11 تريليون جنيه مصري في عامي 2030 و 2050 على التوالي<sup>20</sup>. وقد استخدم الباحثون قيمة الدولار الأمريكي بـ 18.80 جنيهًا مصريًا<sup>21</sup> لتقدير الناتج المحلي الإجمالي، حيث توقع الباحثون أن ترتفع جملة الناتج المحلي من 90.05 مليار دولار أمريكي في عام 2017 إلى 0.67 تريليون دولار أمريكي، و 14.53 تريليون دولار أمريكي في عامي 2030 و 2050 على الترتيب (شكل 4).



شكل 4 مخطط التدفق والمخزون للناتج المحلي الإجمالي وتأثيره 2050-2017 (المصدر: الباحثون)

<sup>20</sup> بأسعار 2017

<sup>21</sup> تعد قيمة الدولار الأمريكي في التاريخ 2 يوليو 2022 هي 18.20 جنيه، وذلك في الفترة التي تمت بها الدراسة العملية للبحث.

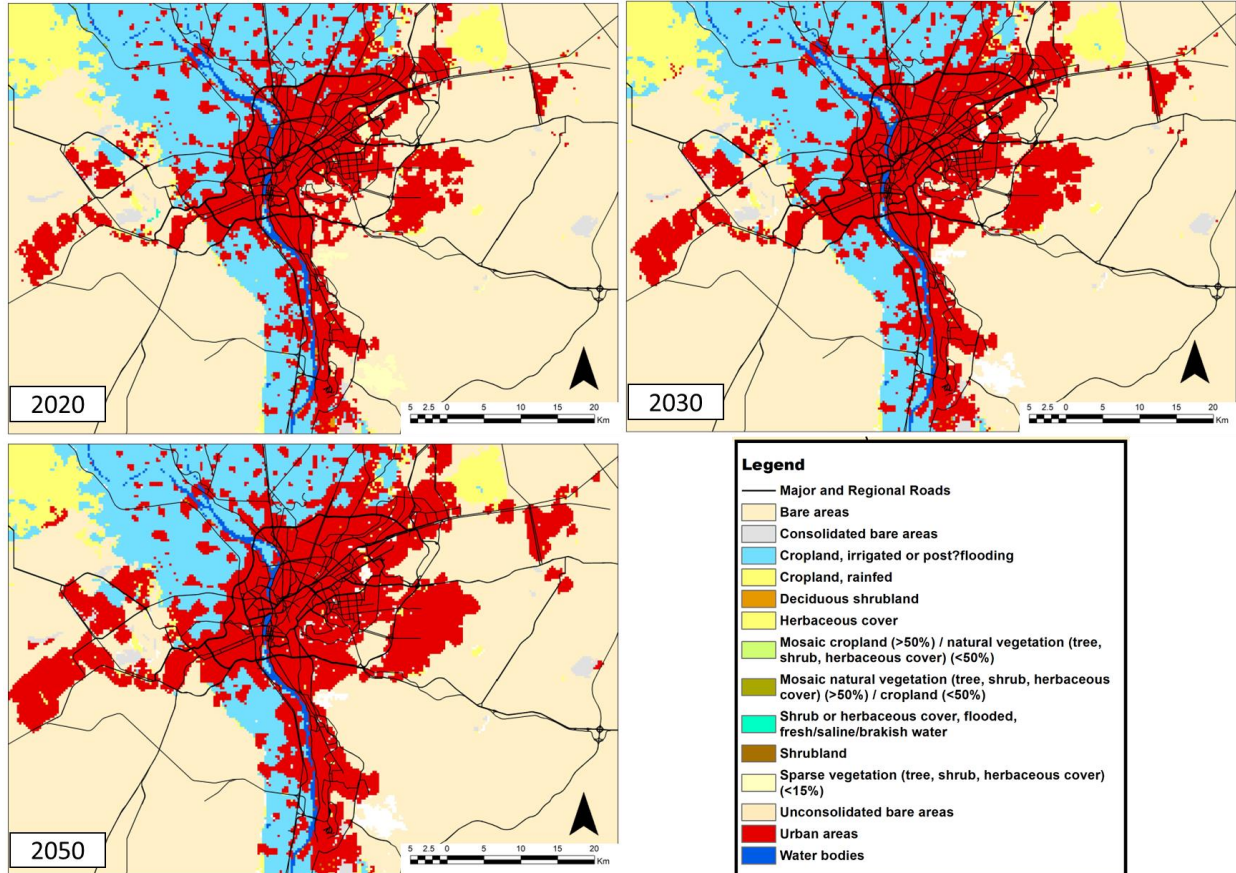
<sup>18</sup> تقدر الطاقة الاستيعابية (ح) بقيمة الكثافة الحالية مضروبة في المساحة الإجمالية لإقليم القاهرة الكبرى.

<sup>19</sup> بالأسعار الحالية

وذلك ناتج عن زيادة سنوية 3094.3 فدانا في الاستعمالات الحضرية وخاصة السكنية. تم توقع أنماط الغطاء الأرضي واستعمالات الأراضي (Land Cover-Land Use) لعامي 2030 و2050 (شكل 5) <sup>22</sup>.

### 3-3 المناطق الحضرية

أدى النمو السكاني والاقتصادي المُتّرد إلى تغيير في استعمالات الأراضي، ومن ثم في الغطاء الأرضي، حيث بلغت مساحة المناطق الحضرية في إقليم القاهرة الكبرى 211552 فدانا في عام 2017،



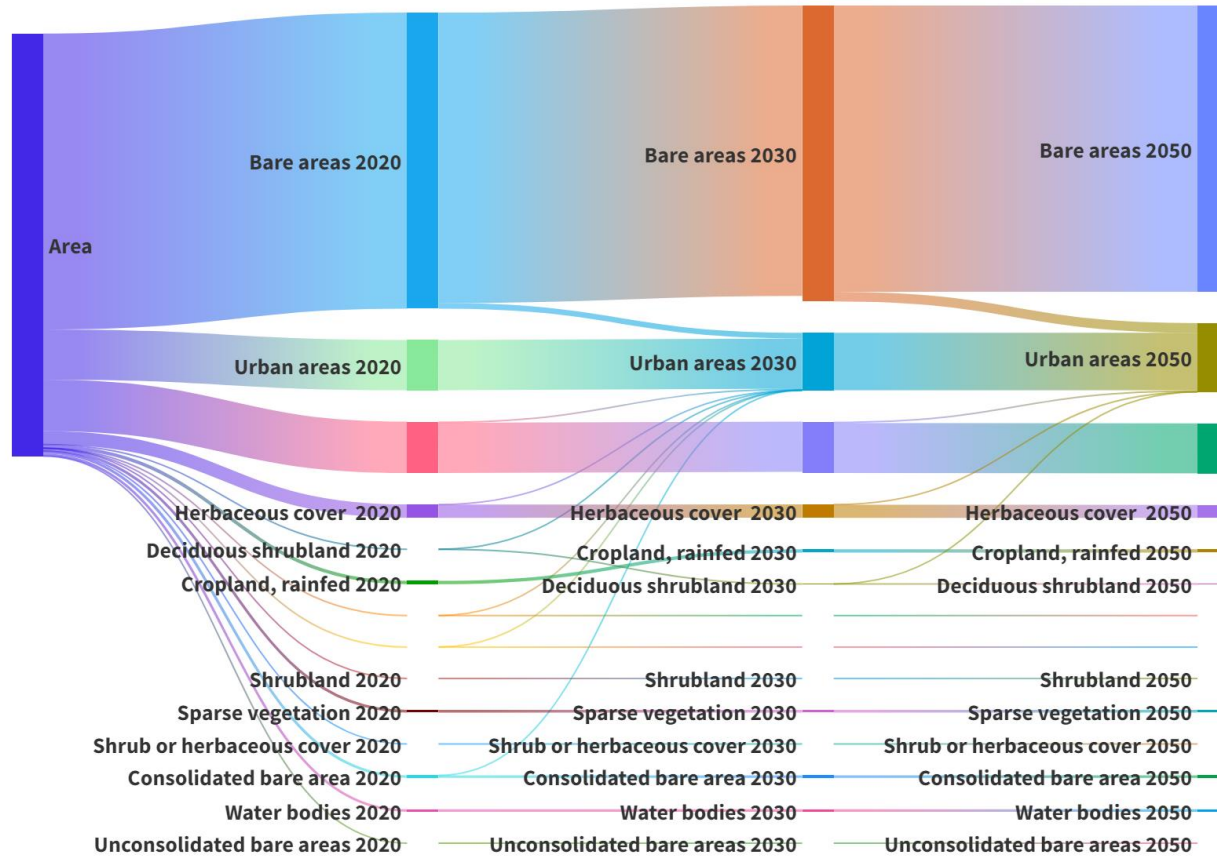
شكل 5 خريطة الغطاء الأرضي لإقليم القاهرة الكبرى للأعوام 2020 و2030 و2050 (المصدر: الباحثون)

يتغير الغطاء الأرضي بتغير استخدام الأراضي، حيث ستنمو المناطق السكنية من 70693.4 في عام 2017 فدان إلى 80964.6 و101507 فدان في عامي 2030 و2050 على الترتيب، كما بلغت الكثافة الصافية حوالي 352 شخصاً/فدان. في عام 2017، احتلت المناطق الصناعية 23990 فدان ومن المتوقع أن تشغل المناطق الصناعية 28727.8 و36017 فدان في 2030 و250 على التوالي. أما الأراضي المخصصة للاستخدامات التجارية، فقد شغلت 4358 فدان في 2017، وتشير النتائج إنها ستصل إلى 5218.6 فدان في 2030، و6546 فدان في 2050.

بناءً على خرائط الغطاء الأرضي لعامي 2010 و2020، فإن المساحة الكنتلة العمرانية في عامي 2030 و2050 ستصل إلى 32136.6 فدان و83490.8 فدان على الترتيب، وبنسبة 14 و37 في المئة من مساحة الإقليم على الترتيب أيضاً. ستزيد على ما كان في عام 2020، وسوف تتخفض مساحة الأراضي البور بمقدار 25,023.7 و68193.8 فدان في عامي 2030 و2050 على الترتيب، كما ستتخفض مساحة الأراضي الزراعية بمساحة 7070.6 و15254.2 فدان في عامي 2030 و2050 بسبب الزحف العمراني (شكل 6). وبالإضافة إلى ذلك، تشير النتائج إلى أن النمو الحضري سيكون على حساب كل من الأراضي الصحراوية والمناطق الزراعية.

القاهرة الكبرى قيمتها صفر، ولكن يمكن أن يكون لها قيمة في مكان آخر من العالم.

<sup>22</sup> مفتاح الخرائط العالمي. لهذا السبب، تُظهر بمفتاح الخريطة استخدامات وغطاء أراضي مثل الغابات، والمناطق المزروعة بالأمطار، وفي حالة منطقة



شكل 6 التغيير الغطاء واستخدامات الأراضي بين 2020 و 2030 و 2050 (المصدر: الباحثون)

2030، وسيترفع توليد المخلفات إلى 20167.1، و16674.2، و17772.1 في عام 2050 بالسيناريوهات الثلاثة وذلك بسبب الزيادة السكانية وتحسن الأحوال الاقتصادية. بناء على السيناريوهات، سيتراوح تراكم المخلفات في مواقع تجميع المخلفات في عام 2030 إلى 429292، و397827، و400116 ألف طن في السيناريوهات الثلاثة على افتراض أن سيناريو العمل كالمعتاد (Business-as-Usual)<sup>23</sup>، أي عدم التدخل لاستيعاب النفايات الصلبة البلدية.

على افتراض أن سيناريو العمل كالمعتاد سيرتفع التراكم في الشوارع في عام 2050 إلى 107323، و94957 و100029 ألف طن في السيناريوهات الأولى والثانية والثالثة.

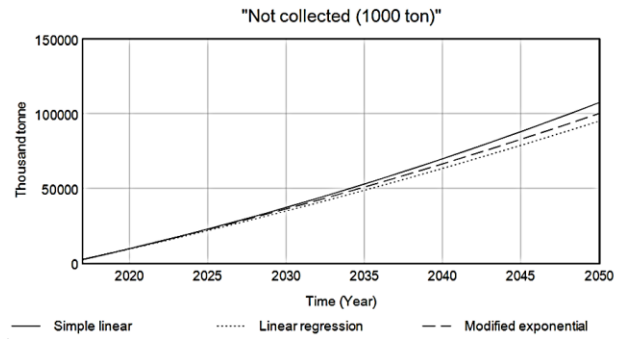
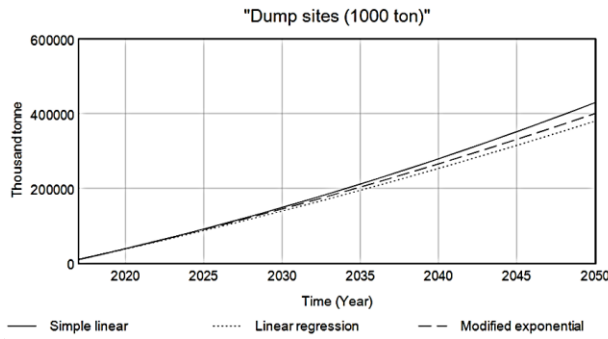
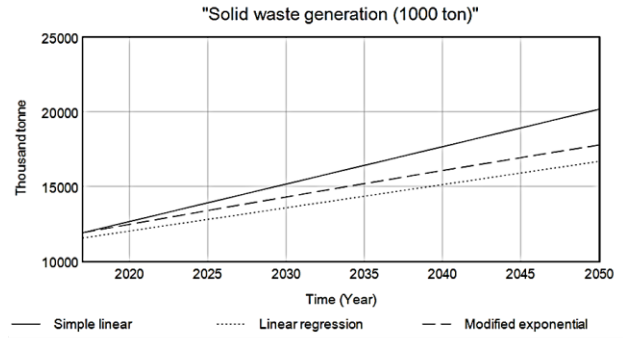
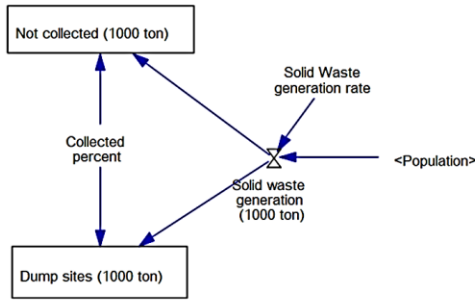
### 3-4 المخلفات الصلبة

وفقاً للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ [25] IPCC، أنتجت مصر 0.50 طناً لكل شخص سنوياً من المخلفات الصلبة في عام 2010، كما أوضحت وزارة البيئة [26] أن كفاءة تجميع المخلفات الصلبة تبلغ 80 بالمائة من إجمالي المخلفات المنتجة. باستخدام البيانات لبناء مخطط التدفق والمخزون لتوليد المخلفات (شكل 7).

حدد الباحثون مواقع تجميع المخلفات والمخلفات المتركمة بالشوارع كمخزون، وتوليد المخلفات كتدفقات في ثلاثة سيناريوهات: سيخلف إقليم القاهرة الكبرى ما يقرب من 15156.5، و13568.5، و14293.6 ألف طن من المخلفات المنزلية الصلبة بالسيناريوهات الثلاثة في عام

<sup>23</sup> سيناريو لأنماط النشاط المستقبلية يفترض أنه لن يكون هناك تغيير كبير في مواقف الناس وأولوياتهم، أو لن تحدث تغييرات كبيرة في التكنولوجيا أو الاقتصاد أو السياسات، بحيث يمكن توقع استمرار الظروف العادية دون تغيير.

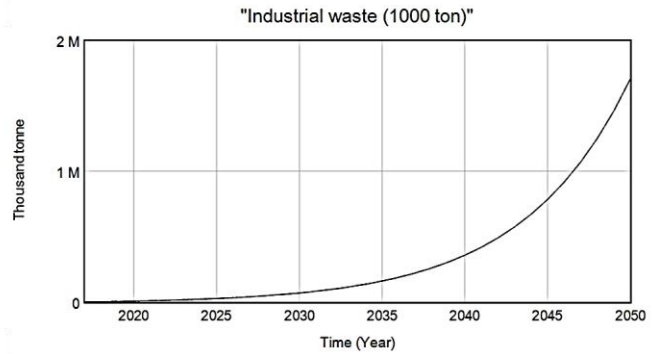
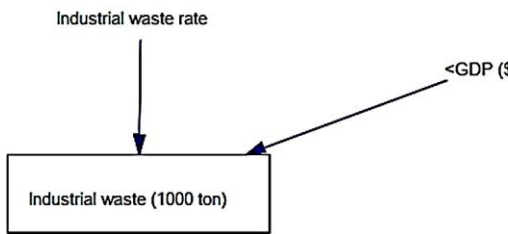




شكل 7 مخطط التدفق والمخزون لإنتاج المخلفات الصلبة وتأثيره 2017-2050 (المصدر: الباحثون)

هو 0.02 ألف طن/مليون دولار من جملة الناتج المحلّة. وقد وضع الباحثون مخططاً لتدفق المخزون وتوقع حجم المخلفات الصناعية في عام 2030، ليصل حجم تراكم المخلفات الصناعية إلى 69350.5 ألف طن، والتي سترتفع إلى 1.7 مليار طن في عام 2050 (شكل 8).

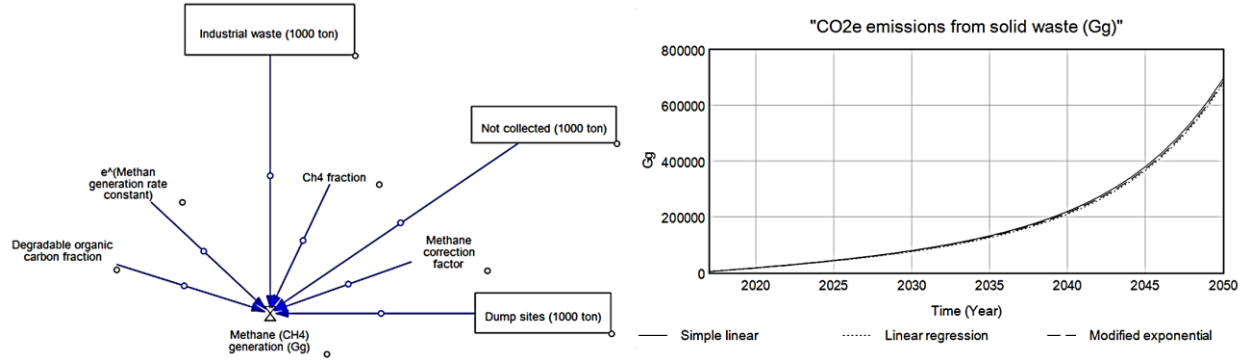
ووفقاً لشبكة تبادل المعلومات والخبرات الإقليمية للنفايات الصلبة في دول المشرق والمغرب العربي [27]، تنتج الصناعات المصرية ستة ملايين طن من المخلفات الصلبة سنوياً، بينما تشكل المخلفات الخطرة 260-500 ألف طن سنوياً؛ لذا، فإن معدل توليد المخلفات الصناعية



شكل 8 مخطط التدفق والمخزون لتوليد المخلفات الصلبة الصناعية وتأثيره 2017-2050 (المصدر: الباحثون)

بالحرق؛ حيث ولدت إجمالي المخلفات المتولدة والمتراكمة حوالي 47.9 جيجا جرام من الميثان في عام 2017، سترتفع إلى 898.12 جيجا جرام في عام 2030، و8270.62 جيجا في عام 2050 (شكل 9).

ووفقاً لتقارير IPCC، يتم إنتاج الميثان بسبب تحلل المواد العضوية في الظروف اللاهوائية، حيث تأكسد جزء من الميثان المتولد في مناطق تجميع المخلفات الصلبة غير المتحكم بها (Uncontrolled Dump Sites)، أو يتم استرداده كمصدر للطاقة، أو التخلص من النفايات

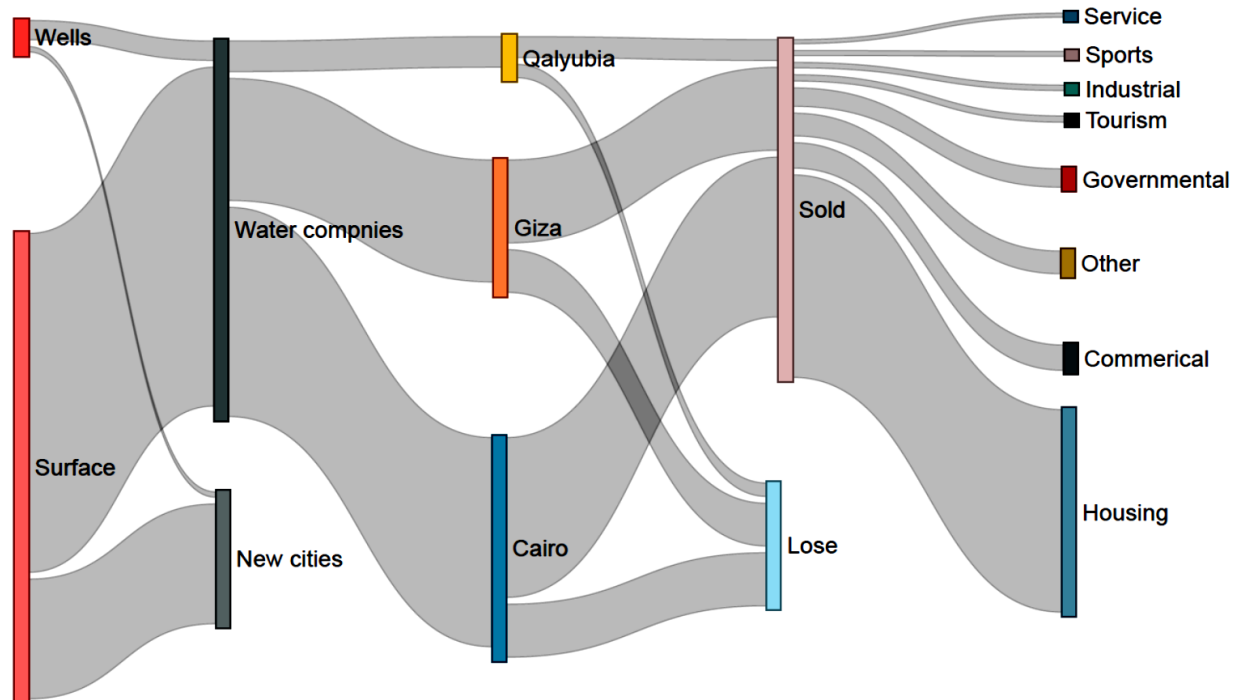


شكل 9 مخطط التدفق والمخزون الخاص بتوليد ثاني أكسيد الكربون من المخلفات وتأثيره 2017-2050 (المصدر: الباحثون)

الأساسي للمياه، حيث تبلغ حصته أربعة وتسعين بالمائة وتغطي الآبار ستة بالمئة (شكل 10). تتبع الشركات الثلاث خمسة آلاف مليون متر مكعب من مياه الشرب، وهو ما يمثل 74.62 من إنتاجها، وبعد الفاقد في المياه ناتجاً عن قدم الشبكات وامتدادها؛ واحتلت شركة الجيزة المرتبة الأولى في فقدان المياه بنسبة 44.2 بالمئة من إنتاجها، تليها شركتا القليوبية والقاهرة؛ كما سجلت شركة القاهرة للمياه أكثر حالات الكسر في شبكة لكل 100 كم، حيث بلغت 5151 مرة في 2018 وحده.

### 5-3 المياه والصرف الصحي

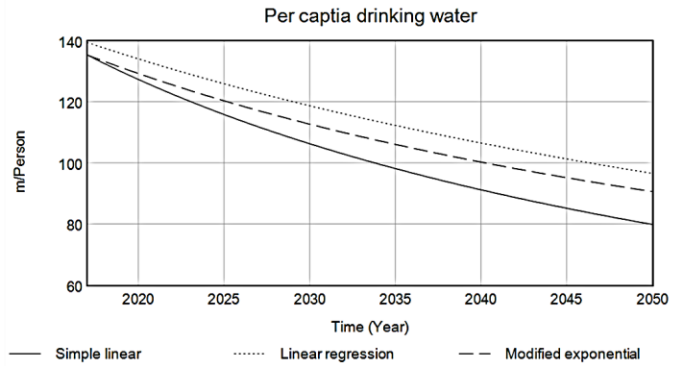
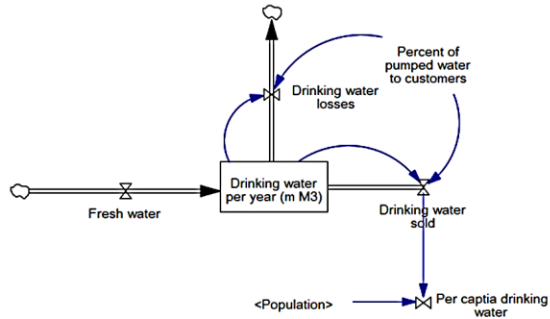
وفقاً للجهاز المصري لتنظيم المياه وحماية المستهلك [28] والجهاز المركزي للتعبئة العامة والإحصاء [29]، تغطي ثلاث شركات إلى جانب شركات المدن الجديدة حاجة إقليم القاهرة الكبرى من مياه الشرب النظيفة، حيث تقوم هذه الشركات بتحويل 6700 مليون متر مكعب سنوياً من المياه العذبة إلى مياه شرب. ويعد النيل المصدر



شكل 10 إنتاج إقليم القاهرة الكبرى من مياه الشرب بدءاً من المصدر وحتى الاستهلاك 2018/19 (المصدر: بناء على [29] و [28])

نصيب الفرد من مياه الشرب إلى 106.26 و 118.7 و 112.67 م<sup>3</sup>/سنوياً في السيناريوهات الثلاثة؛ ثم ينخفض نصيب الفرد من مياه الشرب في 2050 إلى 79.86، و 96.59، و 90.62 م<sup>3</sup>/سنوياً في السيناريوهات الأولى والثاني والثالث.

تم بناء مخطط تدفق المخزون لتوقع نصيب الفرد من مياه الشرب بإقليم القاهرة الكبرى (شكل 11)، حيث استخدم الباحثون مجموع مياه الشرب النظيفة كمخزون ومعدل البيع والفاقد لمياه الشرب كمدفق. في عام 2017، بلغ نصيب الفرد من مياه الشرب 133.54 م<sup>3</sup>/سنوياً، وهو ما سينخفض بسبب النمو السكاني. في عام 2030، من المتوقع أن يصل



شكل 11 مخطط التدفق والمخزون لمياه الشرب وتأثيره 2050-2017 (المصدر: الباحثون)

أساسية لمخاطبة البلديات وأصحاب المصلحة؛ لبلورة وتنفيذ استراتيجيات الحلول الطبيعية (Nature-based Solutions) ولاحتساب مؤشر تخفيف الاحترار (Heat Mitigation Index) <sup>24</sup>. تعد القدرة على التبريد الحضري إحدى النتائج المرتبطة بتغيير غطاء الأراضي واستخداماتها. كما يحدد نموذج التبريد الحضري مؤشر تخفيف الاحترار مكانيًا، والأماكن الأكثر صمودًا لدرجات الحرارة المرتفعة المرتبطة بالجزر الحرارية الحضرية (Urban Heat Island) <sup>25</sup>.

يوفر النموذج معلومات حول كيفية حساب الراحة الحرارية في المدينة من الأطراف إلى مركز المدينة. يوضح شكل 12 أن مؤشر التخفيف من الحرارة في المناطق الحضرية على مدار اليوم أقل عند الحافة بالمناطق الصحراوية وأعلى عند حافة المناطق الزراعية. كما تظهر الدراسة أنه في عام 2050 من المتوقع أن ينخفض مؤشر التخفيف من الحرارة عند الحافة الشمالية للمناطق الحضرية؛ بسبب الزحف العمراني على الأراضي الزراعية. كما يظهر التأثير الملموس للمساحات المفتوحة شبه الحضرية <sup>26</sup> على أطراف الكتلة العمرانية في تمتع سكان المدينة بالراحة الحرارية المطلوبة، كما أن مؤشر التخفيف من الحرارة ليلاً هو الأقل في المناطق الحضرية، حيث بلغ أقل من 0.1، كما ستزداد الجزر الحرارية مع النمو العمراني، مما قد يساعد في زيادة درجات الحرارة داخل الكتلة العمرانية للإقليم.

تجمع الشركات مياه الشرب والصرف الصحي بمحافظة الإقليم الثلاث 2970 مليون متر مكعب سنويًا من مياه الصرف العادمة، أي حوالي 59.4 بالمائة من مياه الشرب المباعة، كما يعالج حوالي 2635,1 مليون متر مكعب من خلال ثلاثة أنواع من محطات المعالجة: أولية وثانوية وثلاثية، والمنتشرة بالمدن الجديدة؛ بينما تعالج القليوبية 25 بالمائة من مياه الصرف المجمعة بمحطات معالجة ثانوية والمقدرة بـ 72.3 مليون متر مكعب. وتعالج المحطات الأولية بمحافظة الجيزة 70 بالمائة من مياه الصرف الصحي المجمع والمقدرة بـ 767.6 مليون متر مكعب. كما تعاني شبكة الصرف الصحي من العديد من المشاكل، حيث بلغت زيادة التدفق 4457 لكل 100 كم في شبكة الصرف الصحي بالقاهرة في عام 2018/2017، وذلك بسبب امتداد وتهالك الشبكات [28], [29]

استخدم الباحثون طريقة بسيطة تقديرية (Proxy) لاحتساب الانبعاثات من مياه الصرف الصحي؛ حيث ينتج كل 1000 متر مكعب من مياه الصرف الصحي المجمع حوالي 2.8 جيجا جرام من انبعاثات ثنائي أكسيد الكربون. لذلك، فإن انبعاث مياه الصرف الصحي هو حوالي 8315.4 باعتباره رقمًا ثابتًا.

### 3-6 التبريد الحضري

لا يزال قياس ونمذجة قدرة تبريد المناطق الحضرية في البحوث والمخططات الحضرية المصرية محدودة للغاية. حيث تعد معلومات

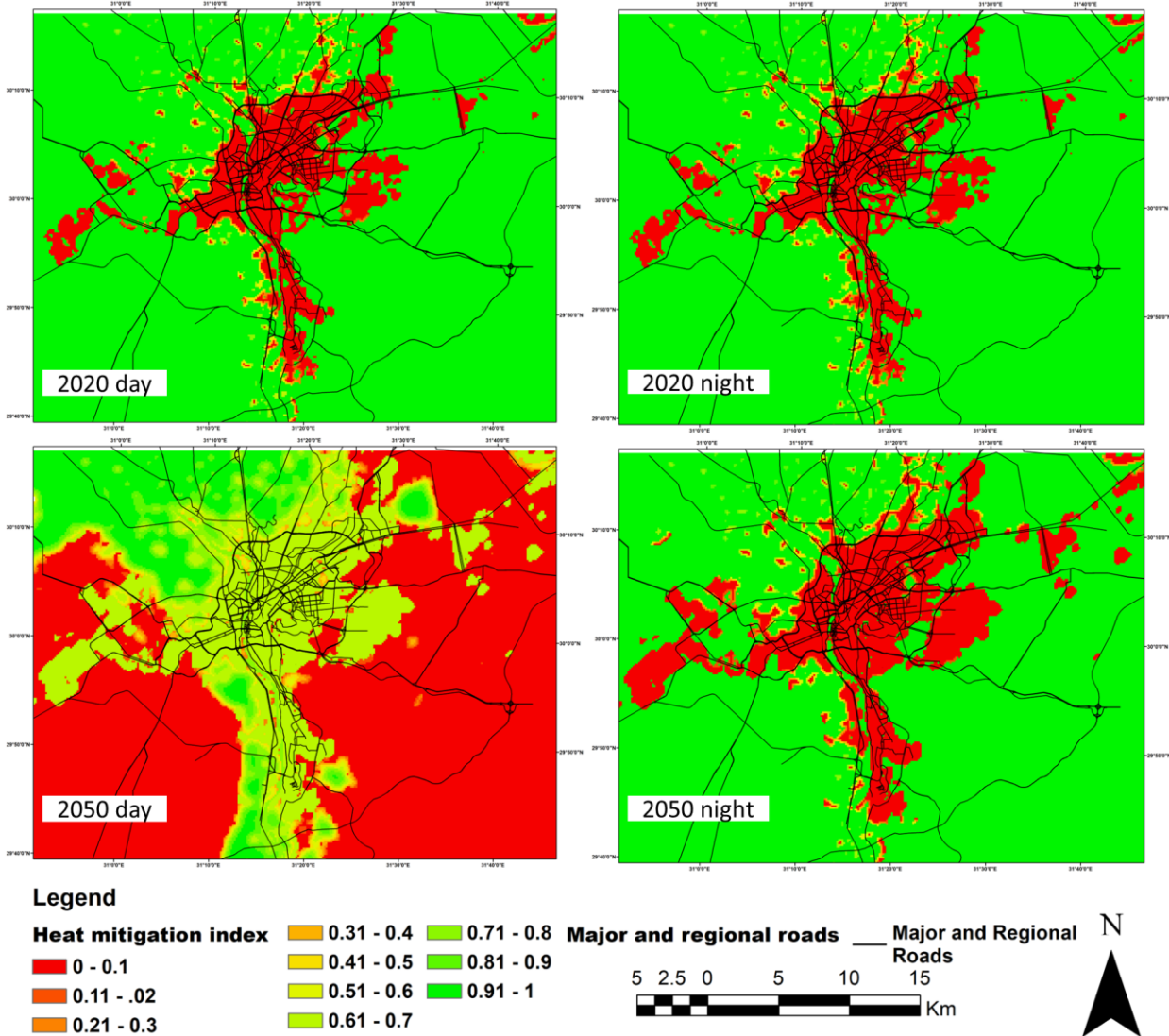
<sup>24</sup> يهدف مؤشر أداء التخفيف من حدة الحرارة في المناطق الحضرية إلى تزويد الحكومات المحلية بمجموعة واسعة من خيارات التخفيف من حرارة الجزر الحضرية المصممة خصيصًا لبعض المناخ المحلي والسياقات الحضرية.

<sup>25</sup> تحدث الجزر الحرارية الحضرية "عندما تستبدل المدن الغطاء الأرضي الطبيعي بتركيزات كثيفة من الأرصفة والمباني والأسطح الأخرى التي تمتص الحرارة وتحتفظ بها. يؤدي هذا التأثير إلى زيادة تكاليف الطاقة (مثل تكييف الهواء) ومستويات تلوث الهواء والأمراض والوفيات المرتبطة بالحرارة

<sup>26</sup> هي مناطق انتقال من استخدام الأراضي الريفية إلى استخدامات الأراضي الحضرية الواقعة بين الحدود الخارجية للمراكز الحضرية والإقليمية والبيئة الريفية.

<sup>24</sup> يهدف مؤشر أداء التخفيف من حدة الحرارة في المناطق الحضرية إلى تزويد الحكومات المحلية بمجموعة واسعة من خيارات التخفيف من حرارة الجزر الحضرية المصممة خصيصًا لبعض المناخ المحلي والسياقات الحضرية.

<sup>25</sup> تحدث الجزر الحرارية الحضرية "عندما تستبدل المدن الغطاء الأرضي الطبيعي بتركيزات كثيفة من الأرصفة والمباني والأسطح الأخرى التي تمتص



شكل 12 مؤشر التخفيف من الحرارة لإقليم القاهرة الكبرى في 2020 و2050 باستخدام InVEST في أوقات النهار (اليسار) والليل (اليمن) (المصدر: الباحثون)

تعد آثار تدهور نوعية الهواء وزيادة انبعاثات الغازات الدفيئة معروفة للجميع، حيث يؤدي تدهور نوعية الهواء إلى زيادة معدلات الأمراض والوفيات، بالإضافة إلى خسائر في إنتاجية العامل. وفي الوقت نفسه، يضر تدهور جودة الهواء بالتمتلكات والتراث الثقافي، حيث تتفاعل الانبعاثات مع مواد البناء، مما يتسبب في تدهور المعالم الأثرية، ويؤدي إلى خسائر في الإيرادات من صناعة السياحة. ويؤدي الإبقاء على المعدلات الحالية للغازات الدفيئة إلى أن القاهرة- ومصر عمومًا- قد لا تفي بمساهمات مصر المقصودة وطنيًا (Nationally Determined Contributions) المسجلة في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ بعد مؤتمر باريس 2015. توضح نتائج البحث أن ممارسات التخطيط الحضري الحالية من بين العقبات التي تعيق قدرة مصر على تحقيق الهدف 11 من أهداف التنمية المستدامة، كما أشار Sachs وآخرون (2022). ولا يبدو أن المخططات المنفذة تحقق النتائج البيئية المرجوة. ويبدو أن السبب في الوضع الحالي للمخططات هو الإطار المؤسسي، حيث أثر فشل التخطيط والإدارة الحضري في السيطرة على النمو الحضري السريع في إقليم القاهرة الكبرى سلبيًا على البيئة، وقلل من القدرة على تبريد المناطق الحضرية. ويعد تلوث الهواء ونقص المساحات الخضراء من

#### 4- المناقشة

ستظل الدوافع المحركة للتنمية والضغوط الناجمة عنها تضر بالموارد الطبيعية، حيث سيؤدي الزحف العمراني إلى تدمير الأراضي الزراعية، مصحوب بارتفاع تولد الملوثات. لن تتحسن حالة الهواء القاهرة ولن تنخفض مستوى انبعاثات الغازات الدفيئة، إذا استمر سكان القاهرة على النمط الحالي للإنتاج والاستهلاك مع غياب تدخلات لحماية البيئة.

قامت الدولة بتوسيع شبكات الطرق للحد من الازدحام المروري، وذلك من خلال إزالة خطوط الترام وجزر الشوارع الخضراء، وبناء الكباري، مما يساهم في زيادة انبعاثات الغازات الدفيئة، وتقليل التبريد الحضري بسبب زيادة حجم حركة المرور وإزالة المساحات الخضراء. ووفقًا لوكالة حماية البيئة الأمريكية [30]، يزداد الطلب على الكهرباء لتكييف الهواء بنسبة من واحد إلى تسعة بالمائة لكل درجتين فهرنهايت إضافيتين، مما يساهم في زيادة درجات الحرارة أثناء النهار وانخفاض التبريد الليلي، مما ينتج عنه ارتفاع معدلات الوفيات والأمراض المرتبطة بالحرارة، مثل الانزعاك العام، وصعوبات التنفس، والتشنجات، والإرهاق، وضربات الشمس غير المميتة.

وذلك بسبب تآكل المناطق الخضراء مع تحول الأراضي الزراعية بالإقليم لاستخدامات عمرانية، وسترتفع درجة حرارة الهواء عند أطراف المدينة وخاصة القريبة من المناطق الصحراوية التي تفتقر للأشجار والنباتات التي تساعد في تقليل درجات الحرارة، لذلك سيحتاج سكان القاهرة إلى تكييف الهواء مما يؤدي استهلاك المزيد من الطاقة، وقد تؤدي موجات الحرارة المرتفعة إلى زيادة في حالات الوفاة والأمراض المرتبطة وخاصة بين الطبقات الفقيرة والمتوسطة ممن يفتقرون لإمكانات الأنفاق على تركيب المكيفات وسداد فواتير الكهرباء.

ستكون القاهرة هي المدينة الأكثر تضرراً نتيجة النجاح المحدود للمخططات المعدة لإقليم القاهرة الكبرى للتخفيف من المشاكل الحضرية، وتحقيق المستهدف لتعزيز العدالة الاجتماعية والبيئية؛ حيث أدى التوسع الحضري السريع لإقليم القاهرة الكبرى إلى مشاكل بيئية خطيرة مثل تلوث الهواء وما يتبعه من خسائر اقتصادية واجتماعية، كما يزيد الزحف الحضري من مشاكل استهلاك الموارد الطبيعية وتولد المخلفات بكافة صورها، بسبب زيادة الطلب على الأراضي والموارد الطبيعية والطاقة اللازمة لعمليات الإنتاج والاستهلاك؛ وللاستدامة والتنمية، هناك حاجة إلى الحفاظ على الموارد الطبيعية من خلال مخططات تتكامل فيها الأبعاد الاقتصادية والاجتماعية والبيئية في إطار عمراني.

يهدف التخطيط الحضري المعاصر إلى تعزيز التنمية الحضرية المستدامة، مما يستلزم استخدام تقنيات تخطيط مختلفة عما كان يستخدم في الماضي، مثل توظيف مفاهيم الأيض الحضري وتحليل تدفق المواد مع النمذجة الديناميكية ونظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد؛ حيث اتضح من نتائج البحث إمكانية الأدوات البديلة في تحليل الواقع واستشراف المستقبل وبالتالي اقتراح الإجراءات التصحيحية (Corrective) والوقائية (Preventive).

#### 6- التوصيات

قام الباحثون ببناء نموذج لربط تأثير القرارات التخطيطية على البيئة العمرانية ومحيطها، وذلك باستخدام النمذجة الديناميكية ونظم المعلومات الجغرافية، وهذا بخلاف معظم نماذج التخطيط الثابتة المستخدمة لإسقاطات السكان والعمالة المرتبطة بنماذج استعمال الأراضي.

بتطبيق النموذج المقترح على إقليم القاهرة الكبرى، تم توقع الوضع المستقبلي للإقليم. إذا استمرت ممارسات التخطيط الحالية، فسوف لا يبدو مستقبل إقليم القاهرة الكبرى واعداءً بيئياً، إلا إذا تغيرت عملية صنع القرار الحالية. لذا تتطلب النتائج إعادة تقييم عملية التخطيط والممارسات وذلك للوصول إلى مستقبل أكثر استدامة.

لذا توصي الدراسة بأن تعتمد مخططات العمرانية على النمذجة الديناميكية ونظم المعلومات الجغرافية وأن تتحمل الهيئة العامة للتخطيط العمراني مسؤولية أكبر فيما يتعلق بالبيئة الحضرية، وأن يضع مخطوط المدن والممارسون في اعتبارهم أن العناصر البيئية للاستدامة الحضرية مرتبطة بالمناطق المجاورة للمدينة. يمكن للمخطط أن يستثمر في الحفاظ على المساحات الخضراء والحدائق العامة وذلك لجودة البيئة الحضرية، حيث أنه أمر هام لجودة الحياة.

#### إشادة

البحث جزء من خطة البحث لقسم الهندسة المعمارية بجامعة المنوفية ومستخرج من أطروحة الدكتوراه ولم يتلق الباحثون دعماً مالياً من أي جهة. يشكر المؤلفون المسؤولين الحكوميين الذين وفروا البيانات الحكومية. ولا يعكس البحث رأيهم

بين المشاكل التي يجب معالجتها بسبب ممارسات التخطيط والإدارة الحالية. لذا يؤكد البحث نتائج الخولي (2020a,2020b) حيث طالب الخولي بتغييرات جذرية في عملية التخطيط من خلال استخدام الأيض الحضري في تحديد المشكلة والنمذجة الديناميكية لتقييم البدائل.

تعد الطريقة المستخدمة في البحث مساهمة في نظرية التخطيط، حيث قام الباحثون باستخدام النمذجة الديناميكية ونظام المعلومات الجغرافية لتوقع مستقبل إقليم القاهرة الكبرى، مع افتراض استمرار الممارسات التخطيطية الحالية. وقد أظهرت النتائج أن المستقبل لا يبدو واعداً من الناحية البيئية، ما لم يتم اتخاذ تغيير جذري في طريقة صنع القرار المعتادة.

لوصول إلى مستقبل أكثر استدامة للإقليم، تؤكد النتائج على ضرورة إعادة النظر في عمليات التخطيط والممارسات، من الناحية التقليدية، حيث نادراً ما يعتمد التخطيط في مصر على استخدام النمذجة الديناميكية، وغالباً ما تكون معظم نماذج التخطيط لإسقاطات السكان والعمالة المرتبطة بنموذج استخدام الأراضي الاستاتيكي، وتستند البدائل المختارة عادة إلى معايير تصميمية (Design Requirements)؛ لذا يمكن أن تساهم النمذجة الديناميكية المرتبطة بتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في تعريف المشكلة، وتحديد الغايات، وتقييم البدائل، وتوقع الآثار المترتبة على قرار مزع اتخاذها، ومتابعة تنفيذ المخططات، وبالتالي يمكن أن تضمن نجاح الخطط المنفذة.

#### 5- الخلاصة

يبنى الهدف 11 من أهداف التنمية المستدامة على أن تقلل المدن من تأثيرها البيئي، وذلك من خلال تحسين نوعية الهواء بإدارة متكاملة لأعمال الإنتاج والاستهلاك مما يخفف تولد المخلفات الصلبة وما ينبعث منها من غازات.

تظهر النتائج أن تعداد سكان إقليم القاهرة الكبرى سيستمر في الزيادة، مما يضع ضغطاً على الموارد الطبيعية، كما سيصل الناتج المحلي الإجمالي إلى 12.54 تريليون جنيه في عام 2030، و273.11 تريليون جنيه في عام 2050.

يؤدي النمو السكاني والاقتصادي إلى تغيير المناظر الطبيعية الحضرية (Urban Landscape) والغطاء الأرضي؛ حيث بلغ إجمالي المناطق الحضرية في إقليم القاهرة الكبرى حوالي 211552 فدان في عام 2017، وقدر الباحثون الزيادة سنوية بحوالي 3094 فدان أغلبها للاستعمال السكني.

تسبب التغيرات في الغطاء الأرضي واستعمالات الأراضي في زيادة المخلفات المتولدة وانبعاثاتها، حيث تنتج انبعاثات قطاع المخلفات البلدية الصلبة من تحلل المواد العضوية في ظل الظروف اللاهوائية، وأغلب الانبعاثات من غاز الميثان. من المتوقع أن في 2050، سيشترك قطاع المخلفات في الغازات الدفيئة بـ 8270.62 جيغا جرام من الميثان، أي ما يعادل 694732 جيغا جرام من ثاني أكسيد الكربون، بينما قد يساهم التشجيع على استخدام الأساليب العلمية في عمليات إدارة المخلفات البلدية الصلبة على استخدام انبعاثات الميثان في إنتاج الطاقة، وبالتالي تحسين نوعية هواء القاهرة.

تتأثر مصر من ندرة المياه، حيث إن حصة مصر السنوية من النيل ثابتة (55 مليار متر مكعب)، لذلك، فإن الزيادة السكانية والتوسع الاقتصادي يؤثران على نصيب الفرد من مياه الشرب. وفي أسوأ السيناريوهات، سينخفض نصيب الفرد من مياه الشرب إلى 79.86 م<sup>3</sup>/ سنوياً في 2050 من 133.54 م<sup>3</sup>/ سنوياً في عام 2017، ويمكن زيادة نصيب الفرد من مياه الشرب بتجديد الشبكات لتقليل الفاقد وإعادة استخدام المياه المعالجة للاستخدامات الآمنة لصحة الإنسان والبيئة.

سوف يضر النمو الحضري بقدرة الأنظمة الإيكولوجية على التبريد وتخفيف الحرارة؛ قد يصبح التخفيف من الحرارة أقل في قلب المدينة،

[13] Wolman, A. 1965. "The Metabolism of Cities." *Scientific American* 213: 179–90. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0965-178> .

[14] Kalmykova, Yuliya, and Leonardo Rosado. 2015. "Urban Metabolism as Framework for Circular Economy Design for Cities." *Proceedings of the World Resources Forum 2015*, no. October. <http://publications.lib.chalmers.se/publication/232085-urban-metabolism-as-framework-for-circular-economy-design-for-cities>.

[15] Antikainen, Riina, Helena Dahlbo, Matti Melanen, and Markku Ollikainen. 2005. "Decision Support Approaches : Life Cycle Assessment ( LCA ) and Substance Flow Analysis ( SFA )." *Environment* 3: 1–17. [http://www.helsinki.fi/metsatieteet/tutkimus/sunare/63\\_Antikainen\\_etal.pdf](http://www.helsinki.fi/metsatieteet/tutkimus/sunare/63_Antikainen_etal.pdf) .

[16] Sachs, Jeffrey D., Guillaume Lafortune, Christian Kroll, Grayson Fuller, and Finn Woelm. 2022. "From Crisis to Sustainable Development: The SDGs as Roadmap to 2030 and Beyond. Sustainable Development Report." Cambridge .

[17] El-Kholei, Ahmed O. 2020. "Failed Planning: Lost Opportunities and Choices for The Future." *Open House International* 45 (4): 387–406. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/OHI-07-2020-0075> .

[18] Jäger, Jill, Maria Eugenia Arreola, Munyaradzi Chenje, László Pintér, Purna Raibhandari, J. Jäger, Maria Eugenia Arreola, Munyaradzi Chenje, László Pintér, and Purna Raibhandari. 2008. "Training Module 1, The GEO Approach to Integrated Environmental Assessment." *Resource Book: A Training Manual on Integrated Environmental Assessment and Reporting*. Vol. 14. Nairobi, Kenya and London, UK. [https://doi.org/10.1016/s0022-3182\(82\)80116-7](https://doi.org/10.1016/s0022-3182(82)80116-7) .

[19] El-Kholei, Ahmed O., and Mohammad S. Abido. 2022. "Bring Nature Back to the City; Keep Invasive Species Out." *Journal of Urban Research* 45 .

[20] Krueckeberg, Donald A., and Arthur L. Silvers. 1974. *Urban Planning Analysis: Methods and Models*. Wiley.

[21] Haraldsson, Hörður. 2004. "Introduction to System Thinking and Causal Loop Diagrams." *Idea* .

[22] Azad, Hamid Reza Lashgarian, Hadi Akbarzade Khorshidi, Seyed Hossein Hosseini, and Saeed Mirzamohammadi. 2010. "Fight or Flight: Using Causal Loop Diagram to Investigate Brain Drain in Developing Countries." *International Journal of Society Systems Science* 2 (3): 285. <https://doi.org/10.1504/ijsss.2010.033495> .

[23] Transentis Consulting. 2014. "Stock and Flow Diagrams." 2014 .

[24] Stanford University. n.d. "InVEST." Natural Capital Project.

## المراجع

[1] UNDP. 2021. "National Human Development Report 2021: Egypt." United Nations Development Programme. [https://www.eg.undp.org/content/egypt/en/home/library/human\\_development/egypt-human-development-report-2021.html](https://www.eg.undp.org/content/egypt/en/home/library/human_development/egypt-human-development-report-2021.html) .

[2] AlSayyad, Nezar. 2011. *Cairo, Histories of a City*. Vol. 369. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.4159/harvard.9780674060791> .

[3] World Population Review. 2022. "Cairo Population 2022 (Demographics, Maps, Graphs)." *World Cities*. 2022 .

[4] Lombrana, Laura Millan, Mirette Magdy, and Salma El Wardany. 2022. "Egypt's Barren Fields Are Dire Bellwether for Climate Summit." *Bloomberg News*. November 2022.

[5] Arcadis. 2022. "The Arcadis Sustainable Cities Index 2022 Prosperity beyond Profit," 1–44. [www.arcadis.com](http://www.arcadis.com).

[6] NUMBEO. 2023. "Quality of Life Index by City 2023." 2023. <https://www.numbeo.com/quality-of-life/rankings.jsp> .

[7] Ministry of Environment. 2018. "Egypt's First Biennial Update Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change".

[8] GOPP. 2012. "Greater Cairo Urban Development Strategy: Part I: Future Vision and Strategic Directions." <http://gopp.gov.eg/wp-content/uploads/2015/07/1CFV-EN.pdf>.

[9] Khalil, HebaAllah, and Ahmad Al-Ahwal. 2021. "Reunderstanding Cairo through Urban Metabolism: Formal versus Informal Districts Resource Flow Performance in Fast Urbanizing Cities." *Journal of Industrial Ecology* 25 (1): 176–92. <https://doi.org/10.1111/JIEC.13056> .

[10] Zhang, Chunbo, Mingming Hu, Liang Dong, Pengcheng Xiang, Qian Zhang, Jiangbo Wu, Bo Li, and Shiyong Shi. 2018. "Co-Benefits of Urban Concrete Recycling on The Mitigation of Greenhouse Gas Emissions and Land Use Change: A Case in Chongqing Metropolis, China." *Journal of Cleaner Production* 201: 481–98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.238>.

[11] UNEP. 2022. "UNEP - UN Environment Programme | GOAL 11: Sustainable Cities and Communities." 2022. <https://www.unep.org/explore-topics/sustainable-development-goals/why-do-sustainable-development-goals-matter/goal-11> .

[12] Kennedy, Christopher, John Cuddihy, and Joshua Engel-Yan. 2007. "The Changing Metabolism of Cities." *Journal of Industrial Ecology* 11 (2): 43–59. <https://doi.org/10.1162/jie.2007.1107> .

Social Justice?" Alternative Policy Solutions. June 16, 2020. <https://aps.aucegypt.edu/en/articles/455/does-urban-planning-in-egypt-address-environmental-issues-and-social-justice>.

[32] Chetry, Vishal, and Meenal Surawar. 2021. "Delineating Urban Growth Boundary Using Remote Sensing, ANN-MLP and CA Model: A Case Study of Thiruvananthapuram Urban Agglomeration, India." *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 49 (10): 2437–50. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01401-x>.

[33] Aburas, Maher Milad, Yuek Ming Ho, Mohammad Firuz Ramli, and Zulfa Hanan Ash'aari. 2016. "The Simulation and Prediction of Spatio-Temporal Urban Growth Trends Using Cellular Automata Models: A Review." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52: 380–89. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.007>.

[34] Luis, Francisco, and Gil Moncayo. 2019. "What Is a Causal Loop Diagram and What Is It Good For?" <https://www.marketlinks.org/resources/what-causal-loop-diagram-and-what-it-good>.

[25] IPCC. 2019. "COMBINE VOL 5 CHAPTER 3: Solid Waste Disposal." In 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 1–25.

[26] EEAA. 2017. "Egypt State of The Environment Report in 2015." [https://doi.org/10.1016/S0378-777X\(83\)80088-2](https://doi.org/10.1016/S0378-777X(83)80088-2).

[27] SWEEP. 2014. "Country Report on The Solid Waste Management in EGYPT 2013." <http://www.sweep-net.org/country/egypt>.

[28] EWRA. 2019. "The Tenth Annual Report of the Egyptian Water Regulatory and Consumer Protection Agency(EWRA) 2017/2018." Egyptian Water Regulatory and Consumer Protection Agency. Cairo, Egypt.

[29] CAPMAS. 2020. "Annual Bulletin Pure Water & Sanitations Statistics 2018/2019." Cairo, Egypt.

[30] EPA. 2021. "Heat Island Impacts." Environmental Protection Agency US. 2021. <https://www.epa.gov/heatislands/heat-island-impacts>.

[31] El-Kholei, Ahmed O 2020. "Does Urban Planning in Egypt Address Environmental Issues and