النموذج الهجين للبرمجة متعددة الأهداف والبرمجة الذكية في دعم اتخاذ القرار

–دراسة تحليلية في ضوء تجارب دولية والمدن الذكية–

The Hybrid Model from the Integration of Multi-Objective Programming and Intelligent: Programming in Decision-Making Support -An Analytical Study Based on International Experiences and Smart City Applications-

يسلي تنهينان، جامعة الجزائر3 (الجزائر)، yesli.tynhinane@univ-alger3.dz

تاريخ الاستلام: 2026/01/14 تاريخ القبول: 2026/03/24 تاريخ النشر: 2026/03/27

ملخص:

تهدف الدراسة إلى ابراز دور البرمجة متعددة الأهداف في دعم اتخاذ القرار المعقد، مع التركيز على تعزيز فعاليتها من خلال دمجها مع تقنيات البرمجة الذكية ضمن نماذج هجينة. تظهر النتائج أن النماذج الهجينة تساهم في تحسين دقة وجودة القرارات عبر تحقيق توازن أفضل بين الأهداف المتعارضة وزيادة القدرة على التعامل مع التعقيد وعدم اليقين. كما بينت الدراسة أن استخدام الخوارزميات الذكية يعزز دقة ومرونة الحلول. وتوصي الدراسة بتعزيز التكامل بين النماذج الرياضية والذكاء الاصطناعي، تحسين جودة البيانات، توسيع نطاق تطبيق النماذج الهجينة في دعم اتخاذ القرار الاستراتيجي.

كلمات مفتاحية: برمجة متعددة أهداف، برمجة ذكية، نماذج هجينة، دعم اتخاذ قرار معقد.

تصنيفات JEL : C61، C45،C63 ، C44.

Abstract:

This study explores the synergy between multi-objective programming and intelligent techniques within hybrid models to optimize complex decision-making. Findings indicate that these hybrid systems improve decision quality by effectively balancing conflicting objectives and navigating high-uncertainty environments. Furthermore, intelligent algorithms enhance the precision and flexibility of outcomes. The research advocates for deeper integration of AI with mathematical modeling,

improved data quality, and the expanded deployment of hybrid frameworks in strategic decision-making.
Keywords: Multi-Objective Programming, Intelligent Programming, Hybrid models, Support for complex decision-making.
Jel Classification Codes: C61, C45, C63, C44.

1. مقدمة:

يعد مجال بحوث العمليات أحد الركائز الأساسية في علوم الإدارة، لما يوفره من أساليب كمية لاتخاذ القرار وتحسين أداء النظم الإنتاجية والخدمية. ومن بين أهم فروع بحوث العمليات البرمجة الخطية وعلى وجه الخصوص البرمجة متعددة الأهداف، والتي تسمح بمعالجة المشكلات التي تتطلب تحقيق أكثر من هدف في آن واحد، وذلك من خلال البحث عن حلول توازنيه تحقق مستويات مختلفة من المفاضلة بين الأهداف المتنافسة.

تعتبر البرمجة متعددة الأهداف أداة تحليلية فعالة لمعالجة مشكلات تخصيص الموارد، تحسين إدارة العمليات، التخطيط، والتحكم في سلاسل الإمداد. وقد امتد دور هذه التقنيات إلى دعم اتخاذ القرارات الاستراتيجية من خلال دمج أساليب تحليل البيانات المتقدمة وتقنيات الذكاء الاصطناعي، مثل البيانات الضخمة (Big Data)، التعلم الآلي (Machine Learning)، والتعلم العميق (Deep Learning).

ساهمت تقنيات البرمجة الخطية متعددة الأهداف في تحسين الجودة وإدارة المخاطر، من خلال تطبيق مفاهيم مثل إدارة الجودة الشاملة، تحليل المخاطر، وبناء النظم المرنة التي تعزز الابتكار وتطوير المنتجات. وقد ازدادت أهمية هذه النماذج مع التوجه الحديث نحو دمجها بتقنيات الذكاء الاصطناعي، لما يتيح من قدرات على التعلم، التكييف، وتحسين الحلول في ظروف تسودها عدم التأكد والتغير المستمر. وعلى ضوء ما سبق قمنا بطرح الإشكالية التالية:

كيف يمكن للنماذج الهجينة للبرمجة (متعدد الأهداف–الذكية) من تحسين فعالية جودة اتخاذ القرارات المعقدة؟.

بغية الالمام بالموضوع وامكانية معالجة الإشكالية والاجابة عليها قمنا بتجزئتها إلى الأسئلة الفرعية التالية:

- ما الأسس النظرية للنماذج الهجينة بين البرامج متعددة الأهداف والذكية في دعم القرارات المعقدة؟
- كيف تعزز البرمجة الذكية قدرة النموذج الهجين على التعامل مع التعقيد وعدم اليقين؟
- ما هي أهم التحديات التي تقف أمام تطبيق النماذج الهجينة بين البرامج متعددة الأهداف والذكية؟
- ما هي الدروس المستفادة من التجارب الدولية للمدن الذكية في تطبيق النماذج الهجينة؟

للإجابة على الإشكالية المطروحة والأسئلة الفرعية تم صياغة الفرضيات التالية:

- تعتمد النماذج الهجينة على أسس نظرية متكاملة لدعم القرارات المعقدة.
- إن دمج البرمجة الذكية يعزز من قدرة النماذج الهجينة على التعامل مع التعقيد وعدم اليقين.
- يقف أمام تطبيق النماذج الهجينة مجموعة من التحديات المرتبطة بجودة البيانات، المهارات التقنية والتحليلية، امكانية دمج الأساليب.
- تظهر التجارب الدولية للمدن الذكية مدى فعالية النماذج الهجينة في تحسين القرارات المعقدة.

تكمن أهداف وأهمية الدراسة فيما يلي:

تكمن أهمية الدراسة في إبراز دور البرمجة متعددة الأهداف كنموذج فعال لدعم اتخاذ القرار المعقد، خاصة في ظل تعقد الأهداف وتعارضها، مع تسليط الضوء على أهمية دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحسين جودة القرارات ورفع كفاءتها. أما فيما يخص أهداف الدراسة، فقد تم تلخيصها في النقاط التالية:

- تحليل الإطار المفاهيمي للبرمجة متعددة الأهداف ودورها في اتخاذ القرار المعقد.
- ابراز دور الخوارزميات الذكية في تحسين أداء نماذج البرمجة متعددة الأهداف.
- توضيح آليات الدمج بين البرمجة متعددة الأهداف والبرمجة الذكية.
- تقديم رؤية تحليلية من أجل المساهمة في تطوير نماذج دعم القرار المستقبلية.

ساد في هذا المقال المنهج الوصفي التحليلي، من خلال تحليل الإطار المفاهيمي للبرمجة متعددة الأهداف والبرمجة الذكية، ودراسة آلية الدمج بين التقنيتين. كما استندنا للمنهج المقارن عند تحليل بعض التجارب الدولية، بهدف استخلاص أوجه التشابه والاختلاف وتحديد الدروس المستفادة.

2. الأسس النظرية والمنهجية للبرمجة متعددة الأهداف والبرمجة الذكية

يهدف هذا الجزء إلى وضع الإطار النظري وتوضيح كيفية تحول نماذج البرمجة الخطية متعددة الأهداف من أساليب الأوزان البسيطة إلى خوارزميات تطورية وهجينة قادرة على صياغة جبهة باريتو. حيث يمثل هذا الدمج بين الأسس الرياضية والقدرات الذكية الركيزة الجوهرية لاتخاذ قرارات مثالية.

1.2. البرمجة متعددة الأهداف كأداة لدعم القرار المعقد:

تعد البرمجة متعددة الأهداف أحد الامتدادات الحديثة للبرمجة الخطية، حيث تمثل إطارا رياضيا مرنا وواقعيا لمعالجة المسائل القرارية المعقدة، مع مراعاة تعدد الأهداف، تشابك المتغيرات، وتنوع القيود (Mehrdad Tamiz، 1998).

يعرف نموذج البرمجة الخطية بالأهداف بأنه يسمح باعتبار في آن واحد عدة أهداف المراد الوصول إليها في إشكالية اختيار أحسن حل ضمن الحلول الممكنة (Blaid Aouni، 2001).

وقد طبقت البرمجة الخطية متعددة الأهداف على العديد من المجالات: كإدارة المخزونات، إدارة الموارد المالية، التسويق وإدارة الجودة، النقل، إدارة الموارد البشرية، وغيرها من المجالات المتعددة. كما تعددت نماذج البرمجة بالأهداف حسب طبيعة المشكلة والأهداف المراد تحقيقها مع أخذ بعين الاعتبار الأولويات والأهمية لكل هدف نذكر من بين هذه البرامج:

- البرمجة متعددة الأهداف المرجحة.
- نموذج متعدد الأهداف الليكسيكوغرافية.
- البرمجة متعددة الأهداف الكمبرومازية.

تكمن أهمية البرمجة الخطية متعددة الأهداف في اتاحة إمكانية التعبير عن الأهداف في صورة رتب أو أولويات، كما أنها تسعى إلى تحقيق مجموعة من الأهداف في آن واحد سواء كانت متناسقة أو متعارضة، وتسعى كذلك إلى تخفيض الانحرافات بين الأهداف المحققة والأخرى المستهدفة إلى أدنى حد ممكن.

فيما يلي عرض لتطور مناهج البرمجة متعددة الأهداف عبر الزمن:

الجدول رقم (01): تطور مناهج البرمجة متعددة الأهداف خلال الفترة 1950–2025

	المنهجيات الأساسية	الاسهامات والقيود

البرمجة الرياضية خمسينات–ثمانينات القرن العشرين	أساليب التحويل إلى هدف واحد، مثل أسلوب الأوزان، يتم تحويل المشكلات متعددة الأهداف الى مشكلات متتابعة أحادية الهدف.	تعتمد على تحديد الأوزان مسبقا، وتواجه صعوبات في التعامل مع وجهة باريتو عالية الأبعاد.
الخوارزميات التطورية تسعينات–بداية 2000	ادخال مفهوم هيمنة بارتو، الفرز غير المهيمن، العمليات الجينية للبحث الشامل	أتاحت التوليد الآلي لمجموعة من الحلول غير المهيمنة، لكنها عانت من ضعف ضغط الاختيار في المسائل عالية الأبعاد.
تكامل الاستراتيجيات الهجينة 2010–2000	الجمع بين استراتيجيات التفكيك، الاختيار القائم على المؤشرات، وتوجيه الحلول بنقاط مرجعية لتحسين التقارب والتحكم في التنوع.	حسنت توزيع الحلول، تفكيك فضاء الأهداف، والاختيار القائم على الحجم الفائق، لكنها حساسة لضبط المعاملات.
التعامل مع وجهة باريتو المعقدة 2020–2010	النمذجة التقريبية، والأليات التكيفية لمعالجة وجهة باريتو غير منتظمة، متعدد الأنماط أو الديناميكية.	عززت القدرة على التكيف مع وجهة باريتو المعقدة، لكنها تتطلب كلفة حسابية مرتفعة.
الأمثلية المؤتمتة 2025–2020	مج تقنيات التعلم الآلي (مثل التطور العصبي والتعلم المعزز) لتكييف المعاملات وتحقيق أمثلية آنية.	قللت تدخل البشري وعززت التكيف مع البيئات الديناميكية، إلا أن قابلية التفسير ما تزال تمثل تحديا.

المصدر: Yifan Chen, Weng Howe Chan, Eileen Lee Ming Su, and Qi Diao, Multi-Objective optimization for smart citie: A systematic review of algorithms, challenges, and future directions, PeerJ Comput science, 11, 3042, 2025, p11.

نلاحظ من خلال الجدول أعلاه الذي يعرض تطور مناهج البرمجة الخطية متعددة الأهداف أنه يعكس تطور من النماذج الرياضية التقليدية وصولا إلى الأنظمة المؤتمتة المدعومة بالذكاء الاصطناعي والتعلم المعزز. ويلاحظ انتقال التركيز من مجرد إيجاد حلول–باريتو إلى تحسين القدرة التكيفية والتعامل مع البيئات الديناميكية المعقدة. مما يعزز كفاءة اتخاذ القرار في المدن الذكية.

2.2. البرمجة الذكية كمدخل حديث لدعم القرار المعقد: تهتم منهجية الذكاء الاصطناعي بتطوير تقنيات لحل المشكلات الرياضية الصعبة، وتتضمن مجموعة غنية من صيغ تمثيل النماذج للتعامل مع مجموعة واسعة من المشكلات الواقعية، كنماذج البرمجة المقيدة، النماذج المنطقية، لغات البرمجة البيانية والدالية، ونماذج Bayesian. بصفة عامة يمكن القول ان تقنيات الذكاء الاصطناعي توفر صيغ متنوعة وذات مرونة عالية لمشاكل معقدة. وجاءت فكرة الربط بين البرمجة متعددة الأهداف والبرمجة الذكية عبر

الخوارزميات الجينية، الشبكات العصبية الاصطناعية، والبحث الذكي، كونها تساعد على تحسين النموذج وتطويره الى نموذج هجين أكثر فعالية ودقة (سلمان، 2024).

يعتمد الذكاء الاصطناعي على منهجية التعلم الآلي والذي يهتم بتطوير تقنيات الحاسوب من خلال تعلم البيانات واكتساب المعارف دون الحاجة الى البرمجة الصريحة، مما يساهم في اكتساب الخبرة وتحسين الأداء والوقت.

غالبا ما يتم الاعتماد على برامج ذكية لتقنيات الذكاء الاصطناعي من أجل رفع من جودة النتائج وكفاءتها لما يلعبه من دور محوري كمدخل لدعم القرار المعقد، ويمكن تلخيص أهمها في النقاط التالية:

- **النمذجة التنبؤية (Predictive Modeling)**: بدلا من اتخاذ القرار بناء على بيانات تاريخية فقط، يتم التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لتقليل المخاطر واستباق المواقف.
- **التعامل مع التعارض الديناميكي**: غالبا ما يحدث في المشكلات المعقدة أين يؤدي تحسين هدف إلى ضرر هدف آخر، تتدخل البرمجة الذكية من أجل إيجاد نقطة توازن مثلى.
- **تقليل التحيز البشري**: تساهم البرمجة الذكية في عقلنة القرار الحضري من خلال توفير بدائل مبنية على حقائق رقمية، مما يقلل من الخطأ البشري، ويرفع كفاءة التخطيط.

من بين أدوات وتقنيات البرمجة الذكية في دعم القرار أبرزها:

- الشبكات العصبية الاصطناعية لنمذجة العلاقات غير الخطية والتنبؤية.
- دعم المتجهات للتنبؤ الدقيق في ظل محدودية البيانات والضوضائية.
- الخوارزميات السربية من أجل إيجاد حلول في فضاءات معقدة.
- الخوارزميات التطورية لحل مشكلات متعددة الأهداف.
- النماذج الهجينة بهدف تحسين برامج متعددة الأهداف.

حيث لوحظ استباقية في تطبيق هذه الأدوات من قبل دول متقدمة كونت مدن ذكية تهدف إلى تحسين مختلف قطاعاتها: النقل، الطاقة، والتخطيط الحضري، والتي برزت كفاءة هذه التقنيات من خلال نشرها الواسع للنتائج المحققة من جراء تطبيقها.

3. النماذج الهجينة للبرمجة متعددة الأهداف والبرمجة الذكية في تجارب دولية للمدن ذكية

يستعرض هذا الجزء آليات دمج البرمجة متعددة الأهداف مع تقنيات الذكاء الاصطناعي، مع الوقوف على كفاءة هذه النماذج من خلال تحليل تطبيقات واقعية في مدن عالمية رائدة، مع تسليط الضوء على قدرة النماذج في تحقيق توازن ديناميكي بين متطلبات الاقتصاد والبيئة.

1.3. آلية دمج البرمجة متعددة الأهداف والبرمجة الذكية ودورها في اتخاذ القرار:

هناك العديد من الآليات لدمج البرمجة متعددة الأهداف مع أساليب الذكاء الاصطناعي أي البرمجة الذكية، وذلك في سياق التنبؤ والتحسين متعدد الأهداف. سوف نوضح البعض منها فيما يلي (Musa Alhaji Ibrahim، 2022):

1.1.3. آلية التحسين متعدد الأهداف:

تستخدم هذه الآلية لمعالجة مشكلات اتخاذ القرار التي تتسم بتعدد الأهداف المتعارضة كتقليل التكاليف، تعظيم الجودة، وتدنئة زمن الإنتاج، حيث يصعب الوصول إلى حل أمثل يحقق جميع الأهداف في آن واحد باستخدام أسلوب البرمجة متعددة الأهداف التقليدية.

تقوم الفكرة الجوهرية لهذه الآلية على دمج الذكاء التحسيني (Intelligent Optimization)، مع تحليل متعدد المعايير لتحويل المشكلة من صيغة متعددة الأهداف إلى مؤشر مركب واحد يعكس الأداء الكلي للنظام، ويسمح بالمقارنة والاختيار الأمثل. وذلك من خلال تطبيق الطرق التالية:

- **طريقة Taguchi**: تعد احدى أدوات الذكاء التحسيني شبه التجريبي، يعمل على (A Zainudin، 2019):

- تصميم التجارب (Decision of Experiments-DOE) باستخدام المصفوفات المتعامدة (Orthogonal Arrays).
- تقليل عدد التجارب المطلوبة مع الحفاظ على تمثيل فعال لتأثير المتغيرات.
- دراسة تأثير عوامل القرار (Decision Variables)، على عدة مخرجات في آن واحد.

تساعد هذه الطريقة على تقليل التعقيد الحسابي، مع إمكانية التعامل مع عدم اليقين والضوضاء (Noise factors)، وتوفير بيانات منظمة تستخدم لاحقا في التحليل متعدد الأهداف.

- **تحليل الترابط الرمادي (Grey Relational Analysis-GRA)**: (Sandra Gajevic، 2024) بعد الحصول على نتائج متعددة لكل تجربة ذات عدة أهداف، يليه دور GRA لمعالجة تعدد الأهداف عبر ثلاثة مراحل أساسية والمتمثلة في:

- معايرة البيانات (Normalization): من خلال توحيد مقاييس الأهداف المختلفة حتى تصبح قابلة للمقارنة.
- حساب معاملات الترابط الرمادي: من خلال قياس درجة قرب كل تجربة من الحل المثالي باستخدام معامل الترابط الرمادي لكل هدف على حدة.
- حساب الدرجة الرمادية الكلية (Grey Relational Grade-GRG): وهي عبارة عن متوسط او مجموع مرجح لمعاملات الترابط لجميع الأهداف.

2.1.3. آلية البرمجة الذكية (Support Vector Regression-SVR):

تعتمد هذه الآلية أساسا على نماذج الذكاء الاصطناعي القائمة على التعلم الآلي للتنبؤ بالقيم الناتجة عن عملية التحسين متعددة الأهداف (Ru Liu، 2021). حيث في حالة دمجها مع آلية Taguchi وGRA، يمثل الناتج المركب (GRG)، الهدف النهائي الذي نود التنبؤ به. والهدف الأساسي هو إنشاء نموذج ذكي يمكنه التنبؤ بالأداء الأمثل للنظام بناء على متغيرات القرار، بدون الحاجة لإعادة تنفيذ التجارب أو التحسينات المكلفة.

يمثل (SVR) خوارزمية تعلم آلي تستخدم التنبؤ بالقيم المستمرة، ويتميز بالقدرة على التعامل مع العلاقات غير الخطية بين المتغيرات. كما يساعد على (Ru Liu، 2021):

- نمذجة العلاقة بين المتغيرات ونتيجة التحسين.
- التعامل مع البيانات المعقدة وغير الخطية.
- التعلم من البيانات.

تكمن أهمية (SVR) كونه لب البرمجة الذكية في النظام الهجين، حيث يساهم في تحسين أدائه كلما توفرت بيانات جديدة من التجارب أو العمليات، وعدم اعتماده على النماذج الرياضية الصريحة، وإمكانية التعامل مع الأنظمة الواقعية المعقدة، مع بروز فعاليتها في المشكلات الواقعية غير المهيكلة والتي

تحتوي على ضوضاء، بيانات ناقصة، أو علاقات غير خطية بين المتغيرات (Muhammad Fulki Fadhillah, 2021).

يمكن إيجاد تقنيات أخرى من غير (SVR) والتي تعمل بنفس المنهجية نذكر منها:

- الشبكة العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Network-ANN).
- تحسين سرب الجسيمات (Particle Swarm Optimization-PSO).
- تحسين صقور هاريس (Harris Hawks Optimization-HHO).

3.1.3. آلية الدمج الهجين (Hybrid Integration Mechanism):

تهدف هذه الآلية إلى جمع بين آلية التحسين متعدد الأهداف (Taguchi-GRA) وآلية التعلم الذكي (SVR)، للحصول على نموذج متكامل قادر على التنبؤ والتحسين في آن واحد. يصبح هذا النموذج الهجين يتميز بقوة التحليل التجريبي والقدرة الذكية على التنبؤ، من خلال استخدام نتائج التحسين متعدد الأهداف لتدريب نموذج التعلم الآلي، ثم استخدامها للتنبؤ بأفضل الحلول مستقبليا. تسمح هذه المنهجية ب (Musa Alhaji Ibrahim, 2022):

- توفير الوقت والتكاليف المرتبطة بإعادة التجارب.
- الوصول إلى فضاء الحلول بشكل أسرع وأكثر فعالية.
- تحسين المستمر للأداء عن طريق إعادة تدريب النموذج فور توفر بيانات جديدة لتعزيز الدقة.

الجدول رقم (02): يلخص طرق الدمج بين الآليات من أجل الحصول على نموذج هجين فعال

الآلية	منهجية الآلية	طبيعة الاستفادة
Taguchi-GRA	تصميم التجارب وحساب GRG لكل تجربة لتجميع الأهداف المتعددة في مؤشر واحد	تحسين أداء البرامج متعددة الأهداف من خلال الحصول على أفضل توازن بين الأهداف المتضاربة
SVR or ANN	التعلم من البيانات المتاحة للتنبؤ بالنتائج المستقبلية لأي تغير جديد	تقليل التجارب المكلفة من خلال التنبؤ قبل التجربة العملية
HHO or PSO	تحسين مجموعة المتغيرات لتصل إلى أعلى GRG دون الحاجة لإعادة التجارب جميعها	تسمح بالتعامل مع التعقيد والضوضاء

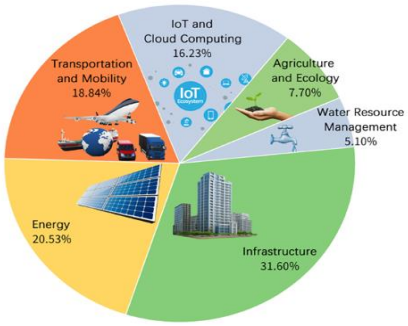
المصدر: من إعداد الباحثة من خلال المعطيات السابقة.

2.3. تحليل فعالية النماذج الهجينة (متعدد الأهداف–الذكية) في سياق التجارب الدولية للمدن الذكية:

تعد المدن الذكية أنظمة معقدة واسعة النطاق، لما تواجهه من تحديات تتعلق بالبنية التحتية، الازدحام المروري، الأداء الاقتصادي، وإمكانية الوصول على الخدمات الصحية، إضافة الى هذه التحديات الكبيرة، تعاني المدن الكبرى من آثار تغير المناخ والتلوث البيئي. ما يجعلها مصدرا لتحديات عملية جوهرية تتعلق بعمليات التحسين المنسق متعدد الأهداف. وتوفر هذه البرمجة إمكانية معالجة التحديات الحضرية الرئيسية المتعلقة بتخصيص الموارد، جدولة الخدمات، وتحسين الكفاءة التشغيلية، وذلك من خلال استخدام النماذج الرياضية والاستراتيجيات الخوارزمية. غير أن فعاليتها تتراجع في البيئات عالية التعقيد وعدم اليقين. وقد اسهمت البرمجة الذكية المعتمدة على خوارزميات التطورية وتقنيات الذكاء الاصطناعي في تجاوز هذه القيود من خلال تعزيز قدرات الاستكشاف وأدى هذا التكامل إلى بروز النماذج الهجينة التي تجمع بين الصرامة الرياضية والمرونة الحسابية بما يحسن جودة الحلول ويدعم اتخاذ القرار.

خلال دراسة مراجعة منهجية عن استخدام تقنيات التحسين متعدد الأهداف عبر نماذج هجينة مدعومة بالبرمجة الذكية في تطبيقات على المدن الذكية حول التخطيط والاستدامة تبين ما يلي (Yifan Chen, 2025):

الشكل رقم (01): توزيع الاهتمام البحثي لقطاعات المدن الذكية



المصدر: Yifan Chen, opcit, P14

من خلال الدائرة النسبية أعلاه التي تحلل الاهتمام البحثي للقطاعات المدن الذكية، تظهر القطاعات المهيمنة والمتمثلة في:

- البنية التحتية: بنسبة 31.60% والتي تحتل المرتبة الأولى، ما يعكس أنها الأساس المادي للمدينة والأولوية القصوى في أبحاث التحسين، حيث أي تطور ذكي يتطلب بيئة تحتية مرنة وقابلة للتكييف.
- الطاقة: بنسبة 20.53%، تأتي في المرتبة الثانية، يعكس هذا التركيز العالي على استدامة الموارد، ودمج الطاقة المتجددة كجزء أساسي من كفاءة المدن الذكية.

أما باقي القطاعات:

النقل والتنقل بنسبة 18.84% يركز على تقليل الازدحام وتحسين انسيابية المرور، أما قطاع التكنولوجيا والمتمثل في انترنت الأشياء والحوسبة السحابية بنسبة 16.23% والذي يمثل الدماغ التقني للمدينة الذكية، فتعكس النسبة المئوية أهمية تدفق البيانات في اتخاذ قرارات لحظية لتحسين أداء بقية القطاعات.

أما القطاعات الناشئة والمكملة المتمثلة في الزراعة والبيئة بنسبة 7.70% وإدارة المياه 5.10% فتشير الى استقرار الحلول التقليدية في هذه القطاعات والحاجة الى المزيد من الأبحاث لدمج تقنيات التحسين لنماذج متعددة الأهداف بشكل أوسع.

بعدها تم قياس درجة تداخل بين هذه القطاعات ومدى تركز السببية والتفاعلات بينها من خلال حساب مصفوفة الارتباط التالية:

الجدول رقم (03): مصفوفة لمعامل الارتباط بين مختلف القطاعات السابقة

القطاع	البنية التحتية	الطاقة	النقل والتنقل	انترنت الأشياء والحوسبة السحابية	الزراعة والإدارة البيئية	إدارة موارد المياه
البنية التحتية	0	10	15	8	3	2
الطاقة	10	0	9	10	2	1
النقل والتنقل	15	9	0	11	2	3
انترنت الأشياء والحوسبة السحابية	8	10	11	0	1	2
الزراعة وإدارة البيئة	3	2	2	1	0	4

0	4	2	3	1	2	إدارة موارد المياه

المصدر: Yifan Chen, opcit, P14

من خلال مصفوفة الارتباط أعلاه نلاحظ أن أقوى ترابط بقيمة (15) يجمع بين النقل والتنقل مع البنية التحتية، ما يشير إلى أن تحسين أحدهما يؤثر بشكل جذري ومباشر على الآخر.

كما يظهر ترابط مرتفع بقيمة (11) بين انترنت الأشياء والنقل والتنقل، ما يعكس أهمية التقنيات الذكية في إدارة حركة المرور، مع ترابط متوازن بقيمة (10) بين الطاقة وكل من البنية التحتية وانترنت الأشياء.

أما القطاعات الأقل تفاعلا فتبرز في قطاع إدارة موارد المياه والزراعة بأقل تداخل مع القطاعات التقنية الأخرى.

كخلاصة يمكن القول انه يوجد توجه عالمي نحو البحث في تطبيق النماذج الذكية وخاصة الهجينة لما لها من أثر إيجابي وفعال في تحقق الأهداف ودعم اتخاذ القرارات الاستراتيجية وحتى ذات بعد تنموي مستدام وذلك الى جانب التقنيات الكلاسيكية كالبرامج متعددة الأهداف في حل المشاكل المعقدة وفي حالة عدم اليقين.

وفي هذا السياق، برزت العديد من التجارب الدولية التي جسدت فعليا دمج حلول البرمجة الذكية مع أساليب التحسين متعدد الأهداف لمعالجة التحديات الحضرية المعقدة في المدن الذكية. وتشمل هذه التجارب تطبيقات متنوعة في مجالات إدارة النقل والطاقة، التخطيط الحضري، ودعم القرار، حيث أظهرت كيف يمكن للنماذج الهجينة التي تجمع بين الذكاء الاصطناعي والتحسين متعدد الأهداف أن تساهم في تحسين الكفاءة التشغيلية وتحقيق الاستدامة الحضرية. وفيما يلي عرض بعض التجارب الناجحة في جدول ملخص كما يلي:

الجدول رقم (04): عرض تجارب دولية لتطبيق النماذج الهجينة (RO-AI) وفعاليتها

مجال التطبيق	الدولة	التجربة	التقنيات الذكية والتحسين متعدد الأهداف	النتائج والأثر التطبيقي	المؤشرات الاحصائية

إدارة الطاقة الذكية	جامعة ساتاباما بالهند (Pradeep K, 2017)	تحسن تشغيل أنظمة الطاقة المتجددة	Swarm Intelligence + MOO (PSO)	تحقيق توازن بيت تقليل التكلفة وتعظيم كفاءة الإنتاج الطاقوي	خفض تكلفة التشغيل بـ 42%، رفع كفاءة الطاقة بـ 30%
النقل والمرور الحضري	سنغافورة ((MDDI), 2024)	تخطيط النقل متعدد الاهداف	ANN-RNN + MOO	تحسين انسيابية المرور وتقليل الازدحام مع الحفاظ على الاستدامة	تقليل زمن الازدحام بـ 25%، ودقة تنبؤ المرور > 90%
إدارة النقل الذكي	طوكيو اليابان (Nakamura T, 2019)	إدارة الطلب المروري والخدمات الحضرية	AI-based Decision Models + MOO	دعم قرارات ديناميكية مرتبطة بالطلب الزمني وتقليل الانبعاثات	خفض الانبعاثات بـ 18%، تحسين الأداء المروري بـ 20%
التوأم الرقمي للمدينة	فبورنسيا ايطاليا (Guerri G, 2021)	Digital Twin للتخطيط الحضري	Digital Twin + AI + MOO	اختبار السيناريوهات الحضرية قبل التنفيذ الفعلي وتقليل المخاطر	تقليل مخاطر القرار بـ 35% قبل التنفيذ
التخطيط البيئي الحضري	ألمانيا (Schuteze T, 2021)	تخطيط بيئي طويل الأجل	Smart /AI-sdriven Model	تحقيق توازن مرحلي بين التنمية الاقتصادية وحماية البيئة	خفض الانبعاثات CO_2 حتى 40% بحلول 2030

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على نتائج دراسات سابقة.

يبين الجدول أعلاه التجارب السابقة لمختلف الدول في مجال النماذج الهجينة القائمة على دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مع التحسين متعدد الأهداف (AI+MOO)، مع عرض الآليات المستخدمة والهدف المرجو من كل تجربة. لقد بينت التجارب تحقق نتائج كمية ونوعية ملموسة، فكل تجربة برزت آثارها على عدة مستويات:

- تحسين جودة القرارات: من خلال اختبار السيناريوهات قبل التنفيذ الفعلي، ما ساعد على اتخاذ قرارات حضرية أكثر دقة واستباقية. كما أظهرت قدرة النماذج على موائمة أهداف متعددة مثل: الكفاءة الاقتصادية، والاستدامة البيئية.
- تقليل التكاليف والمخاطر: تقليل التكاليف التشغيلية وتحسين كفاءة الطاقة، يوضح الأثر المالي المباشر، كما أظهر التوأم الرقمي فاعليته على تقليل المخاطر التشغيلية والبيئية قبل تنفيذ المشاريع فعليا.
- تحقيق توازن بين أهداف متعارضة: حيث أظهرت التجارب قدرة النماذج على إدارة تضارب الأهداف، مثل الكفاءة مقابل الاستدامة أو النمو الاقتصادي مقابل حماية البيئة.

كخلاصة يمكن القول أن تحليلات دمج البرمجة متعددة الأهداف وتقنيات الذكاء الاصطناعي في المدن الذكية ليست مجرد أداة تقنية، بل تمثل نهجا استراتيجيا لتحسين اتخاذ القرار الحضري وتحقيق الاستدامة مع نتائج قابلة للقياس إحصائيا.

وفي نفس السياق من أجل إنجاح عملية الدمج بن التقنيتين، يمكن اقتراح منصة معالجة البيانات للمدن الذكية كحل ذكي قائم على الحوسبة السحابية، لتوفير إطار موحد لمعالجة بيانات المدن الذكية، وتتضمن المسؤوليات التالية:

- جمع البيانات من مختلف معدات التقاط البيانات الموزعة على أرجاء المدينة.
- تحليل البيانات من خلال اكتشاف الأخطاء والقيم المتطرفة، والتمييز بين البيانات الطبيعية وغير الطبيعية.
- اتخاذ القرار بالاعتماد على نتائج التحليل للتقييم، اقتراح الحلول وأخذ الاعتبارات طويلة الأجل، لدعم متخذ القرار.

- **التحديات والقيود التي تقف أمام تطبيق النماذج الهجينة في المدن الذكية:**

يمكن عرض مجموعة من التحديات والقيود التي تقف أمام تطبيق النماذج الهجينة في المدن الذكية ملخصة في النقاط التالية(Ismael Khaleel Khlewee, 2025) :

- الحاجة الكبيرة إلى بيانات تاريخية وآنية تتمتع بالجودة والدقة لدعم التحليل واتخاذ القرار.
- ضرورة استخدام بيانات تنبؤية لتجاوز محدودية التحليل التقليدي.
- بعض تطلعات المدن الذكية نظرية غير واقعية أو صعبة التحقيق على أرض الواقع.
- سرعة تزايد حجم البيانات لا يعني بالضرورة تحسين جودتها وإثرائها، علما انه يتطلب وقت لمعالجتها وموارد حاسوبية كبيرة ما قد يكون مكلفا.
- تجزئة البيانات بين المؤسسات تعيق التكامل وترفع من محدودية تبادل البيانات من حيث السرعة والاكتمال ومستوى التفصيل.

- العوائق التنظيمية رغم الدعوات لشفافية البيانات، والحاجة الى سياسات تشريعية تفرض تبادل الفعال للبيانات.

4. تحليل سيناريوهات تحسين النقل الحضري لتقليل انبعاثات CO_2 في الجزائر العاصمة

تواجه الجزائر العاصمة تحديات كبيرة في مجال النقل الحضري حيث يؤدي الاعتماد المكثف على السيارات الخاصة إلى ازدحام مروري مستمر وتباطؤ حركة المرور، مما يؤثر سلبا على جودة الحياة اليومية للسكان. وفق بيانات (Traffic in Algiers) 2024 يبلغ متوسط زمن التنقل اليومي في اتجاه واحد حوالي 50 دقيقة، مع زيادة ملحوظة خلال أوقات الذروة الصباحية والمسائية. بالإضافة الى ارتفاع نسبة المركبات الخاصة بالمقارنة بالنقل العام، حيث تمثل سيارات الركاب نحو 55% من التنقلات، في حين يشكل المترو والتراموي معا حوالي 15% فقط من التنقلات اليومية.

وعليه تتزايد الحاجة إلى تبني استراتيجيات مستدامة للنقل الحضري توازن بين تحسين الكفاءة المرورية وخفض الانبعاثات، انسجاما مع التوجهات الوطنية نحو التنمية المستدامة وتحسين جودة الهواء. وفي هذا الإطار يقترح تحويل محركات النقل الجماعي العاملة بالوقود الأحفوري إلى محركات تعتمد على الهيدروجين الأخضر، في ضوء المشروع الوطني الذي أطلق أواخر 2025 من طرف وزارة التعليم العالي والبحث العلمي (العلمي)، باعتباره خيارا منخفض الانبعاثات وملائما للمدن ذات الكثافة المرورية المرتفعة. كما يدعم هذا التوجه بتطبيق حلول تنظيم مروري ذكية لتقليل زمن التنقل والانبعاثات في آن واحد.

إن النماذج الهجينة للبرمجة متعددة الأهداف والبرمجة الذكية تعد أداة فعالة داعمة لعملية اتخاذ القرار، وتمكن من اقتراح حلول عملية قابلة للتطبيق، مع تقديم تقديرات علمية لتأثير كل إجراء على الانبعاثات وزمن التنقل من خلال بناء نموذج افتراضي يهدف إلى:

- تقليل الانبعاثات من النقل الحضري.
- تحسين زمن التنقل اليومي للمواطنين دون تكاليف عالية للبنية التحتية.

من أجل ذلك تم ضبط ثلاث سيناريوهات التالية:

السيناريو الأول: الوضع الحالي

يعتمد حوالي 55% من سكان الجزائر العاصمة على السيارات الخاصة في تنقلاتهم، بينما يشكل النقل العام مثل المترو والتراموي حوالي 15% فقط من وسائل التنقل. حيث التحديات الرئيسية:

- ازدحام مروري متزايد، خاصة خلال ساعات الذروة الصباحية والمسائية.
- استهلاك مرتفع للوقود وانبعاثات CO_2 نتيجة توقف المركبات وحركة المرور البطيئة.
- الضغط على البنية التحتية الحالية للنقل العام، مما يقلل من كفاءته ويزيد من الزمن الكلي للتنقل.

السيناريو الثاني: تحسين النقل الجماعي

زيادة الاعتماد على وسائل النقل الجماعي النظيف بالهيدروجين الأخضر وتقليل الاعتماد على السيارات الخاصة من خلال:

- زيادة عدد الحافلات النظيفة بالهيدروجين الأخضر بنسبة 20% ما يساهم في تقليل الانبعاثات الضارة وتحسين كفاءة النقل، ودعم البنية التحتية لمحطات تزويد الهيدروجين في المحاور الرئيسية.
- تعزيز التكامل بين وسائل النقل (ميترو–تراموي–حافلات هيدروجينية) لتسهيل التنقل السلس وتوفير بدائل عملية للسيارات الخاصة.
- النتائج المتوقعة: انخفاض زمن التنقل، خفض الانبعاثات اليومية من CO_2، وتقليل الضغط على الطرقات الرئيسية.

السيناريو الثالث: النقل الذكي والمشاركة

يهدف هذا السناريو إلى تطبيق استراتيجيات ذكية لتقليل عدد المركبات على الطرق مع تعزيز مشاركة المركبة بين الركاب:

- تشجيع الركوب التشاركي من خلال حوافز مالية أو أولوية استخدام مسارات مخصصة للمركبات المشتركة.
- تحسين إشارات المرور الذكية لتقليل أوقات التوقف عند التقاطعات وتخفيف الازدحام في النقاط الحرجة.

- استخدام التكنولوجيا لتعزيز التنقل الذكي، مثل تطبيقات الهاتف لتنسيق الرحلات المشتركة وتتبع حركة الحافلات.
- النتائج المتوقعة: خفض أكبر للانبعاثات، تقليل عدد المركبات في أوقات الذروة، وزمن تنقل أكثر انتظاما.

من أجل مقارنة بين السناريوهات تم الاعتماد على بيانات زمن تنقل اليومي، تقديرات وزارة النقل الجزائرية لعدد المركبات واستخدام النقل العام، تقديرات لانبعاثات اليومية CO_2، اعتمادا على استهلاك الوقود لكل نوع من المركبات. (Algeria Carbon Doxide (co2) Emissions from Transport ((Energy):

الجدول رقم (05): مقارنة النتائج المتوقعة من السيناريوهات الثلاثة

السيناريو	زمن التنقل اليومي (دقيقة)	الانبعاث CO_2 اليومي (طن)	الملاحظات
الوضع الحالي	50	12.8	-
النقل الجماعي المحسن	42	9.8	تقليل الانبعاثات بـ 23%
النقل الذكي والمشاركة	40	9.2	تقليل الانبعاثات بـ 28%

المصدر: من إعداد الباحثة

هذه الأرقام تقديرية لكنها واقعية ومبنية على بيانات منشورة واستراتيجيات النقل الجماعي والتشاركي المعتمدة عالميا.

- تبين النتائج أن تحسين النقل الجماعي يؤدي إلى تقليل زمن التنقل والانبعاثات بشكل ملموس.
- تطبيق النقل الذكي وحوافز المشاركة يعطى فائدة إضافية، مع استثمار أقل مقارنة بإنشاء بنية تحتية جديدة.

بالرغم من أن النتائج المعروضة في الجدول (05) تعتمد جزئيا على تقديرات كمية، إلا أنها تستند إلى معطيات واقعية مستمدة من مؤشرات النقل الحضري في الجزائر العاصمة، وتقارير دولية حول أنماط التنقل والانبعاثات في المدن النامية. ويهدف هذا النهج التقديري إلى محاكاة سلوك النظام الحضري في ظل محدودية البيانات التفصيلية المتاحة، وهي إشكالية شائعة في دراسات المدن الذكية في الدول النامية.

كما أن الفروقات المسجلة بين السيناريوهات الثلاثة تعكس اتجاهات منطقية ومدعومة في الأدبيات، حيث يؤدي تعزيز النقل الجماعي إلى تقليل الاعتماد على المركبات الخاصة، وهو ما ينعكس مباشرة على خفض الانبعاثات وتحسين زمن التنقل. في حين أن إدماج الحلول الذكية، مثل المشاركة في الركوب وإدارة المرور الذكية، يوفر مكاسب إضافية دون الحاجة إلى استثمارات بنيوية كبيرة.

تجدر الإشارة إلى أن محدودية الوصول إلى قواعد بيانات حضرية مفصلة على المستوى المحلي شكلت أحد القيود الرئيسية للدراسة، مما استدعى الاعتماد على تقديرات مبنية على مصادر دولية ومؤشرات عامة. ومع ذلك، فإن هذا الأسلوب يعد مقبولا في الدراسات الاستكشافية (Exploratory Studies)، خاصة عندما يكون الهدف هو بناء نموذج مفاهيمي قابل للتطوير لاحقا باستخدام بيانات ميدانية.

1.4. محاولة بناء نموذج رياضي لمعالجة مشكلة النقل الحضري في الجزائر العاصمة:

قبل صياغة النموذج الرياضي، من المهم توضيح المنطق العام الذي يقوم عليه. تهدف الدراسة إلى توزيع أنماط النقل الحضري بين ثلاث بدائل رئيسية: السيارات الخاصة، النقل الجماعي، والنقل الذكي التشاركي، بحيث يتم تحقيق توازن بين هدفين متعارضين هما: تقليل الانبعاثات وتحسين زمن التنقل.

وعليه، يقوم النموذج على تحديد النسب المثلى لكل نمط نقل، مع الأخذ بعين الاعتبار القيود الواقعية مثل الميزانية والسياسات العمومية. ويتم ذلك من خلال استخدام البرمجة متعددة الأهداف التي تسمح بمعالجة هذه المفاضلة بطريقة كمية ومنهجية.

سوف نحاول بناء نموذج رياضي لمعالجة مشكلة النقل الحضري في الجزائر العاصمة بهدف تخطيط نقل مستدام:

حيث نفرض أن متغيرات القرار:

x_1:نسبة الاعتماد على السيارات الخاصة. x_2: نسبة الاعتماد على النقل الجماعي (مترو، الترامواي، حافلات).

x_3: نسبة الاعتماد على النقل الذكي التشاركي. حيث: $0 \leq x_i \leq 1$ و $x_1 + x_2 + x_3 = 1$

نفرض معاملات متغيرات القرار التالية:

e_1, e_2, e_3: معدل انبعاث CO_2 لكل نمط نقل (طن/يوم) مع: $e_2 \approx 0$ انبعاث تشغيلي مباشر شبه منعدم.

t_1, t_2, t_3: متوسط زمن التنقل لكل نمط (دقيقة).

C_2: تكلفة تعزيز النقل الجماعي. C_3: تكلفة تطبيق النقل الذكي. B: الميزانية المتاحة.

مع افتراض:

$e_1 > e_2 > e_3$ أي أنه كلما حسنا طريقة التنقل كلما أدى لتحسين في الانبعاثات CO_2.

$t_1 > t_2 > t_3$ أي أنه كلما حسنا طريقة التنقل كلما أدى لتحسين في متوسط زمن التنقل.

دالة الهدف من نوع تدنئة لبروز رغبة تحسين خطة التنقل عن طريق تدنئة عاملين أساسين ألا وهما الزمن المتوسط للتنقل وانبعاثات CO_2 والدوال الممثلة للأهداف مصاغة على الشكل التالي:

- الهدف الأول: تقليل الانبعاثات الكلية: $\text{Min } Z_1 = e_1x_1 + e_2x_2 + e_3x_3$
- الهدف الثاني: تقليل زمن التنقل: $\text{Min } Z_2 = t_1x_1 + t_2x_2 + t_3x_3$

بالاعتماد على نموذج متعدد الأهداف لتدنئة الانحرافات عن الأهداف المرجوة يتم صياغة دالة الهدف:

لنفرض أن: Z_1 : المستوى المستهدف للانبعاثات الكلية. Z_2 : المستوى المستهدف لزمن التنقل.

والمتغيرات: d_1^-, d_1^+ : الانحرافات السالبة والموجبة للهدف الأول. d_2^-, d_2^+ : الانحرافات السالبة والموجبة للهدف الثاني. وعليه تصبح دالة الهدف من الشكل التالي:

الهدف الأول: تقليل الانبعاثات الكلية: $G_1 = e_1x_1 + e_2x_2 + e_3x_3 + d_1^- - d_1^+$

الهدف الثاني: تقليل زمن التنقل: $G_2 = t_1x_1 + t_2x_2 + t_3x_3 + d_2^- - d_2^+$

بما أن الهدفين من نوع Min، فإننا نهتم فقط بالانحرافات الموجبة (أي تجاوز المستوى المستهدف)، وبالتالي تكون دالة الهدف على الشكل التالي: $\text{Min } Z=d_1^+ + d_2^+$

كما يمكن إعطاء أوزان مختلفة للأهداف وذلك حسب أولويات المدينة تماشيا مع خطط الدولة الاستراتيجية ففي حالة توفر أولويات يمكن إضافة أوزان للمتغيرات حسب الأهمية التي يكتسبها كل هدف في الخطة العامة لاستراتيجيات الدولة: حيث: w_1: وزن هدف الانبعاثات. w_2: وزن هدف زمن التنقل.

لتصبح الصياغة النهائية لدالة الهدف كما يلي: $\text{Min } Z=w_1d_1^+ + w_2d_2^+$

تحت القيود: $z_1 = e_1 \quad _1 + e_2 \quad _2 + e_3 \quad _3 + d_1^- - d_1^+$

$$z_2 = t_1 \quad _1 + t_2 x_2 + t_3 x_3 + d_2^- - d_2^+$$
$$x_j \geq 0$$
$$d_i^-, d_i^+ \geq 0$$

إضافة للقيود السابقة يشترط على النموذج احترام القيود التالية:

قيد التوازن في توزيع أنماط النقل: $x_1 + x_2 + x_3 = 1$

قيد الميزانية: $C_2 \quad _2 + C_3 \quad _3 \leq B$

قيد الحد الأدنى للنقل الجماعي (سياسة عامة): $x_2 \geq \alpha$ حيث α: تمثل الحد الأدنى المستهدف للنقل الجماعي.

قيد تقليل الاعتماد على السيارات الخاصة: $x_1 \leq \beta$ حيث β: الحد الأقصى المقبول لسيارات الركاب.

الصياغة النهائية المدمجة للنموذج: $\text{Min Z} = w_1 d_1^+ + w_2 d_2^+$

تحت القيود: $z_1 = e_1 x_1 + e_2 x_2 + e_3 x_3 + d_1^- - d_1^+$

$$z_2 = t_1 x_1 + t_2 x_2 + t_3 x_3 + d_2^- - d_2^+$$
$$x_1 + x_2 + x_3 = 1$$
$$C_2 x_2 + C_3 x_3 \leq B$$
$$x_2 \geq \alpha$$
$$x_1 \leq \beta$$
$$x_i \geq 0$$
$$d_i^-, d_i^+ \geq 0$$

من خلال الصياغة السابقة، يمكن تفسير النموذج كما يلي:

- تمثل المتغيرات x_1, x_2, x_3 نسب توزيع وسائل النقل داخل المدينة .
- يعبر الهدف الأول عن البعد البيئي من خلال تقليل الانبعاثات، بينما يعكس الهدف الثاني البعد الاجتماعي المرتبط بزمن التنقل .
- تسمح متغيرات الانحراف بقياس مدى الابتعاد عن الأهداف المرغوبة، وهو ما يوفر مرونة في اتخاذ القرار بدل فرض حل مثالي صارم .
- تعكس القيود المفروضة الإطار الواقعي للنظام، مثل محدودية الميزانية وضرورة دعم النقل الجماعي .

وبالتالي، فإن النموذج لا يهدف فقط إلى إيجاد حل رياضي، بل إلى دعم صانع القرار عبر اقتراح توزيع متوازن وقابل للتطبيق.

2.4. محاولة تحسين النموذج الرياضي بالاعتماد على التقنيات الذكية:

إن الصياغة السابقة للمشكلة حسب البرنامج المصاغ بصفة تقليدية للبرمجة متعددة الأهداف تفترض أن المتغيرات e_i و t_1 عبارة عن ثوابت، لكن في الواقع في الجزائر العاصمة زمن التنقل يتغير حسب الكثافة المرورية، والانبعاثات ترتفع مع الازدحام، ما يجعل العلاقة غير خطية تماما. إذن النموذج خطي وساكن بينما النظام الحضري ديناميكي وغير خطي، لذلك قمنا باقتراح تحسين الصيغة الرياضية باستخدام تقنية من تقنيات الذكاء الاصطناعي data-driven modeling بدون خوارزميات معقدة، حيث تكمن الفكرة في جعل المعاملات "ذكية" بدل تحويل النموذج كله ليصبح النموذج من النوع Goal Programming + Estimated Behavioral Functions، وذلك على الشكل التالي:

القيام بتحسين طريقة تقدير z_1 و z_2 من خلال جعل المعاملات تعتمد على الكثافة المرورية بحيث:

بدلا من اعتبار: *ثابت* $t_i =$ نجعلها دالة تابعة لكثافة الزمن: $t_i = f_i(D)$

حيث: $D =$ كثافة المرور الحضري أو نسبة السيارات الخاصة x_1 لإنها المصدر الأساسي للازدحام.

وتصبح دالة زمن التنقل المعدلة بالازدحام: $t_1(D) = t_1^0(1 + \gamma D)$

حيث: t_1^0 زمن التنقل دون ازدحام. γ : معامل حساسية الازدحام.

أما النقل الجماعي: $t_2(D) = t_2^0(1 + \eta D)$ و $t_3(D) = t_3^0$

وتصبح دالة الانبعاثات المعدلة: $e_1(D) = e_1^0(1 + \delta D)$ و $e_2(D) = e_2^0$ و $e_3(D) = e_3^0$

حيث: δ معامل زيادة الانبعاث بسبب التوقف المتكرر. وعليه إعادة صياغة دوال الأهداف.

الهدف الأول (الانبعاثات): $Z_1 = e_1(D)x_1 + e_2x_2 + e_3x_3$

أي: $Z_1 = e_1^0(1 + \delta x_1)x_1 + e_2x_2 + e_3x_3$

الهدف الثاني (زمن التنقل): $Z_2 = t_1(D)x_1 + t_2(D)x_2 + t_3x_3$

أي: $Z_2 = t_1^0(1 + \gamma x_1)x_1 + t_2^0(1 + \eta x_1)x_2 + t_3x_3$

تتيح هذه الطريقة للنموذج عكس ديناميكية المرور وقابليته للتطبيق في بيئات ذات موارد محدودة مثل الجزائر العاصمة، حيث تعاني البيانات من نقص ودقة محدودة، مما يصعب تطبيق النماذج الهجينة المتقدمة بخوارزميات معقدة. وتجدر الإشارة إلى أن هذه المنهجية ما زالت في مراحلها التجريبية، وغالبية التجارب

الدولية أجريت في مدن ذكية تمتلك بنى تحتية متطورة. تهدف الدراسة التطبيقية الحالية إلى إبراز أهمية هذا النوع من النماذج في دعم استراتيجيات الاستدامة، مع طموح لتعزيز الدراسات الميدانية المستقبلية في هذا المجال.

5. الخاتمة:

خلصت الدراسة إلى أن البرمجة متعددة الأهداف أداة فعالة لدعم اتخاذ القرار المعقد، حيث تمكن من التعامل مع تعدد الأهداف وتعارضها، وتقدم حلول متوازنة لصانع القرار، وأظهرت النتائج أن النماذج الهجينة، الناتجة عن دمج البرمجة متعددة الأهداف مع تقنيات البرمجة الذكية، تعزز دقة وجودة القرارات، وترفع من القدرة على مواجهة التعقيد وعدم اليقين، مع تحسين مرونة الحلول باستخدام خوارزميات ذكية.

كما أكدت الدراسة على أهمية هذا الدمج في سياق التجارب الدولية للمدن الذكية، حيث ساهمت في تحسين فعالية السياسات العامة وتحقيق توازن بين الكفاءة الاقتصادية، الاستدامة البيئية، واحتياجات المجتمع. ومن خلال تحليل دراسة هذه التجارب، تمكننا من توضيح كيف يمكن للنماذج الهجينة أن تشكل أداة ذكية ومرنة لدعم اتخاذ القرار المعقد خاصة في بيئات تتسم بالديناميكية، مع تسليط الضوء على التكامل بين الأساليب الرياضية والتحليل الذكي كعنصر أساسي لتعزيز جودة القرار.

وقد خلصت الدراسة بمجموعة من النتائج التالية:

نتائج الدراسة:

- كشفت الدراسة أهمية النماذج الهجينة التي تجمع بين البرمجة متعددة الأهداف والبرمجة الذكية، وأكدت على أنها تمثل أداة فعالة لدعم القرارات المعقدة، وذلك من خلال الجمع بين الصرامة الرياضية والقدرة على التكيف مع الأحداث المتسارعة خاصة التي تسود البيئة الاقتصادية.
- تعزز دمج البرمجة الذكية الى جانب البرمجة متعددة الأهداف قدرة النموذج الهجين على معالجة حالات أكثر تعقيد والتي تسودها ظروف عدم اليقين، من خلال التكيف مع البيانات المتغيرة، التنبؤ بالنتائج المستقبلية، وإدارة المخاطر، ما يجعل القرارات أكثر مرونة وفعالية.
- استخدام النماذج الهجينة يحسن دقة وجودة القرارات، خاصة في المشكلات التي ذات التعامل مع أهداف متعارضة أو متعددة أصحاب المنفعة، من خلال توفير حلول متوازنة بدل اعتماد حل وحيد.

- بالرغم من الجوانب الإيجابية التي تضحى بها النماذج الهجينة إلا أنها تواجه مجموعة من التحديات المرتبطة بجودة البيانات (المدخلات)، العمليات الحسابة المعقدة، كفاءة تحليل نتائجها.
- من خلال تحليل التجارب السابقة تبين أهمية النماذج الهجينة لما توفره من معايير وأدوات لتطوير نماذج أكثر فعالية وقابلة للتطبيق على أرض الواقع، يمكن أن يفتح آفاق مستقبلية.
- أظهرت الدراسة التحليلية لتجارب المدن الذكية أن دمج البرمجة المتعددة الأهداف مع الذكاء الاصطناعي يحسن من جودة القرارات ويوازن بين الكفاءة الاقتصادية والاستدامة البيئية، مع إتاحة إمكانية الوصول إلى سياسات أكثر تكاملا وواقعية.
- تعتبر النماذج الهجينة أداة استراتيجية لتحسين اتخاذ القرارات المعقدة، والتي يمكن توظيفها في عدة مجالات كالتخطيط الحضري، إدارة الموارد، الطاقة، النقل، والخدمات العامة، ما يساهم في رفع كفاءة السياسات وتقليل المخاطر.

التوصيات:

- تعزيز اعتماد النماذج الهجينة كأدوات أساسية في نظم دعم اتخاذ القرار، لما توفره من قدرة على تحقيق التوازن بين الأهداف المتعارضة وتحسين جودة القرارات في البيئات المعقدة.
- أهمية التكامل المنهجي بين الأسلوب الصارم وتقنيات الذكاء الاصطناعي، ما يسمح ببناء نماذج أكثر مرونة وقابلة للتكيف مع التغيرات الديناميكية.
- التركيز على تطوير نظم جمع البيانات، وتحسين جودتها ودقتها، باعتبارها المدخل الأساسي في النماذج الهجينة، خاصة في ظل البيئات التي تتسم بالتدفق المستمر للمعلومات.
- ضرورة اشراك صانع القرار في مراحل تصمم النماذج الهجينة وتقييم مخرجاتها، من أجل ضمان توافق الحلول المقترحة مع الأولويات الاستراتيجية.
- الحرص على تكثيف البرامج التكوينية والتدريبية في مجالات البرمجة متعددة الأهداف والذكاء الاصطناعي، من أجل تعزيز كفاءات الكوادر البشرية، وإمكانية المؤسسة الاستفادة من النماذج الهجينة.

- الاستفادة من التجارب الدولية الناجحة في مجال المدن الذكية، عبر نقل أفضل الممارسات ومحاولة تكييفها مع السياق المحلي، مع مراعاة الخصوصيات الاقتصادية، الاجتماعية، والمؤسساتية.
- تشجيع واستثمار البحوث المستقبلية نحو النماذج الهجينة ودمج التقنيات المتقدمة، بهدف تطوير نظم دعم القرار أكثر ذكاء واستدامة.

6. المصادر والمراجع:

- منى شاكر سلمان، (2024)، تحسين البرمجة الخطية باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي: دراسة تجريبية، مجلة الإدارة والاقتصاد، المجلد 79، العدد 143، ص60.
- كمال بداري، وزير التعليم العالي والبحث العلمي، صناعة محرك يشتغل بالهيدروجين الأخضر
- A Zainudin, C k Sia, P Ong, O L Narong, M A Azian and W K Lee, (2019), Performance Properties Optimization of Triaxial Ceramic-Palm Oil Fuel Ash by Employing Taguchi Grey Relational Analysis, The International Journal of Integrated Engineering, Vol 0, No 0, P260.
- Blaid Aouni, Ossama Kettani, Goal Programming Model: Aglorious history and a Promising FUTURE, (2001), European Journal of Operational Research, Elsevier Science, P226.
- Guerri G, Petri A, (2021), Digital Twin for Urban Planning in Florence AI-based Scenarios and Multi-Objective Optimization, International Journal of Smart Cities and Urban Engineering, P.15-14.
- Ismael Khaleel Khlewee, Kassem Hamze, Tirus Muya, (2025), AI in Smart Cities: A Review of Urban Data Processing, Prediction, and Optimization Techniques, Estidamaa, P36.
- Mehrdad Tamiz, Dylan Jones, Carlos Romero, (1998), Goal Programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art, European Journal of Operational Research, Elsevier, Volume 111, Issue 3, P579.
- Ministry of Digital Development and information (MDDI), (2024), Smart Nation 2.0: A Thriving Digital Future for All, Government of Singapore, P30-45.
- Muhammad Fulki Fadhillah, Saro Lee, Chango-Wook Lee, and Yu-Chul Park, (2021), Application of Support Vector Regression and Metaheuristic Optimization Algorithms for Groundwater Potential Mapping in Gangneung-si, South Korea, Remote sensing, 13, 1196, P9.
- Nakamura T, Suzuki K, (2019), Al-based Decision Models for Sustainable Traffic Management in Tokyo Metropolitan Area, Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, planning, and Operations, P8-9.

- Pradeep K, Prem Jacob T, (2017), CGSA ccheduler: A multi-objective-based hybrid approach for task scheduling in cloud environment, Information Security Journal: A Global Perspective, Vol 24, N 4, P10-12.
- Ru Liu, Jianbing Peng, Yanqiu Lang, Saro Lee, Mahdi Panahi, Wei Chen, and Xia Zhao, (2021), Hybrids of Support Vector Regression WITH Grey Wolf Optimizer and Firefly Algorithm for Spatial Prediction of landslide Susceptibility, Remote sensing, 13, 4966, P7-8.
- Sandra Gajevic, Ana Markovic, Sas Milojevic, Aleksandar Asonja, Lozica Ivanovic, and Blaza Stojanovic, (2024), Multi-Objective Optimization of Tribological characteristics for Aluminum Composite using Taguchi Grey and TOPSIS Approaches, Lubricants, 12, 171, P2.
- Schuteze T, Chelleri L, (2021), Dynamic Muli-Objective Optimization for Urban Environmental Planning: A Case Study of German Sustainable Cities, Journal of Clearner Production, P.11-12.
- Yifan Chen, Weng Howe Chan, Eileen Lee Ming Su, and Qi Diao, (2025), Multi-Objective optimization for smart citie: A systematic review of algorithms, challenges, and future directions, PeerJ Comput science, 11, 3042, p11-14.
- Musa Alhaji Ibrahim, (2022), Hybrid Artificial Intelligence Models with Multi Objective Optimization for Prediction of Tribological Behavior of Polytetrafluoroethylene Matrix Composites, Applied Sciences, 8671, P11-12-17. Via website: *https://www.mdpi.com/2076-3417/12/17/8671?utm*, Access date: 27/11/2025.
- Traffic in Algiers, Algeria, Compare Algiers with Another City, Via website: https://www.Numbeo.com Access date: 19/02/2026.
- Algeria Carbon Doxide (co2) Emissions from Transport (Energy), Via website: https://www.ycharts.com Access date: 20 /02/2026.