African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)
Online ISSN: 2957-644X
Volume 5, Issue 3, 2026
Page No: 279-289
Website: *https://aaasjournals.com/index.php/ajapas/index*
ISI 2025: 1.126 **SJIFactor 2024: 6.752** **معامل التأثير العربي: 1.62**

A Multi-Criteria Methodology for Geometric Redesign and Traffic Efficiency Enhancement of the Misrata Port Entrance: A Case Study

Abdulmonem Alkabeer [1*], Mahmod Aldeek [2]
[1,2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Misurata University, Libya

منهجية متعددة المعايير لإعادة التصميم الهندسي وتحسين الكفاءة المرورية لمدخل ميناء مصراتة: دراسة حالة

عبد المنعم الكبير [1*]، محمود الديك [2]،
[2،1] قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة مصراتة، ليبيا

*Corresponding author: *menem.kabeer@eng.misuratau.edu.ly*

Received: May 04, 2026	Accepted: August 04, 2026	Published: August 13, 2026

Abstract
Port entrances represent critical nodes within transportation networks due to the interaction between heavy vehicle movements and passenger vehicle traffic, which can negatively affect operational efficiency, increase delays, fuel consumption, and vehicle emissions. This study aims to develop a multi-criteria framework for the geometric redesign and traffic performance improvement of the Misrata Port entrance in Libya.
The proposed methodology is based on three integrated components. First, a comparative geometric evaluation was conducted between the originally planned conventional design, represented by a traditional roundabout, and the proposed unconventional alternative using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). Second, the traffic control system of the intersection associated with the port entrance was assessed according to the traffic signal warrants specified in the Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD). Third, microscopic simulation models were developed using PTV VISSIM to evaluate the operational performance of both designs based on key performance indicators, including control delay, travel time, average speed, and number of stops.
The results of the multi-criteria evaluation demonstrated the superiority of the proposed design, achieving a weighted score of 75% compared with 25% for the conventional design, owing to its higher capability in improving capacity, and enhancing operational flexibility. Furthermore, the traffic control assessment revealed that the intersection located after the port gate does not satisfy the warrants for traffic signal installation according to MUTCD 2009, supporting the implementation of a simpler and more efficient control strategy. The microscopic simulation results confirmed that the proposed design achieved substantial improvements in operational performance. Control delay was reduced from 49 to 5.3 seconds per vehicle, representing an improvement of 89.2%, resulting in an enhancement of the Level of Service (LOS) from D to A. Additionally, total travel time decreased by 60%, the number of stops was reduced by 91.3%, while the average operating speed increased by 46.6%. The study concludes that integrating geometric redesign, decision analysis tools, and microscopic simulation provides an effective framework for supporting engineering decisions related to port entrance improvements, particularly in environments characterized by high proportions of heavy vehicles and complex traffic patterns.

Keywords: Geometric Redesign; Multi-Criteria Decision Analysis; Microscopic Simulation; PTV VISSIM; MUTCD; Port Entrances; Level of Service.

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الملخص
تمثل مداخل الموانئ البحرية نقاطًا حرجة في شبكات النقل بسبب التداخل بين حركة المركبات الثقيلة وحركة المركبات الخاصة، مما يؤدي إلى انخفاض الكفاءة التشغيلية وزيادة التأخير واستهلاك الوقود والانبعاثات. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير منهجية متعددة المعايير لإعادة التصميم الهندسي وتحسين الأداء المروري لمدخل ميناء مصراتة في ليبيا.
اعتمدت المنهجية المقترحة على ثلاثة محاور: أولاً، إجراء تقييم هندسي مقارن بين التصميم التقليدي المخطط مسبقاً والمتمثل في جزيرة دوران والتصميم البديل غير التقليدي باستخدام تحليل القرار متعدد المعايير .ثانيًا، تدقيق نظام التحكم المروري للتقاطع المرتبط بالمدخل وفق مبررات دليل التحكم المروري الأمريكي MUTCD ثالثًا، بناء نماذج محاكاة ميكروسكوبية باستخدام برنامج PTV VISSIM لتقييم الأداء التشغيلي للتصميمين اعتمادًا على مؤشرات التأخير، وزمن الرحلة، ومتوسط السرعة، وعدد مرات التوقف.
أظهرت نتائج التقييم متعدد المعايير تفوق التصميم المقترح بحصوله على درجة مرجحة بلغت 75% مقارنة بـ25% للتصميم التقليدي، نتيجة قدرته الأعلى على تحسين السعة والمرونة التشغيلية. كما أظهر تحليل نظام التحكم أن التقاطع بعد بوابة الميناء لا يستوفي مبررات تركيب إشارة ضوئية وفقMUTCD 2009 ، مما يدعم استخدام نظام تحكم أبسط وأكثر كفاءة.
وأثبتت نتائج المحاكاة أن التصميم المقترح حقق تحسنًا جوهريًا في الأداء التشغيلي؛ حيث انخفض تأخير التحكم من 49 إلى 5.3 ثانية/مركبة بنسبة تحسن بلغت 89.2%، وتحسن مستوى الخدمة من LOS D إلى LOS A كما انخفض إجمالي زمن الرحلة بنسبة 60%، وعدد مرات التوقف بنسبة 91.3%، بينما ارتفع متوسط السرعة التشغيلية بنسبة 46.6%.
تؤكد الدراسة أن دمج إعادة التصميم الهندسي مع أدوات تحليل القرار والمحاكاة الميكروسكوبية يوفر إطارًا فعالًا لدعم القرارات الهندسية المتعلقة بتطوير مداخل الموانئ، خاصة في البيئات التي تتميز بارتفاع نسبة المركبات الثقيلة وتعقيد أنماط الحركة.

الكلمات المفتاحية: إعادة التصميم الهندسي، تحليل القرار متعدد المعايير، المحاكاة الميكروسكوبية، VISSIM، MUTCD، مداخل الموانئ، مستوى الخدمة.

1. مقدمة Introduction

تُعد الموانئ البحرية أحد أهم مكونات منظومة النقل والخدمات اللوجستية، إذ تمثل حلقة الوصل الرئيسة بين شبكات النقل البحري والبري، وتؤدي دورًا محوريًا في دعم التجارة الدولية والتنمية الاقتصادية [1] .ومع النمو المستمر في حركة التجارة العالمية وزيادة أحجام البضائع المنقولة، شهدت الموانئ ارتفاعًا ملحوظًا في أعداد الشاحنات المترددة عليها، مما أدى إلى زيادة الضغوط التشغيلية على مناطق الوصول والمداخل [2]. وأصبحت مداخل الموانئ من أكثر العناصر تعرضًا للاختناقات المرورية نتيجة لتداخل حركة الشاحنات الثقيلة مع المركبات الأخرى، ومحدودية الطاقة الاستيعابية للبنية التحتية القائمة، الأمر الذي ينعكس على مستوى الخدمة من خلال زيادة أزمنة الانتظار وتأخير الرحلات واستهلاك الوقود والانبعاثات، إضافة إلى التأثير في السلامة المرورية [2،3].
وقد أكدت العديد من الدراسات أن ازدحام الموانئ، وخاصة الناتج عن وصول شاحنات الحاويات، يمثل تحديًا عالميًا يؤثر بصورة مباشرة على كفاءة تشغيل الموانئ. فقد أشار Saharidi و (2018) Konstantzos إلى أن تدفقات الشاحنات المتزايدة تعد من أهم أسباب الاختناقات في المناطق المحيطة بالموانئ [4] . كما أوضح Essi وآخرون (2021) أن بوابات الموانئ تمثل نقاط اختناق رئيسة في منظومة التشغيل، حيث يؤدي التدفق المستمر للشاحنات إلى تكوين طوابير طويلة وزيادة أزمنة الانتظار[5].
ونتيجة لذلك، اتجهت العديد من الدراسات إلى تطوير أساليب مختلفة لتحليل وتحسين أداء مداخل الموانئ، حيث أصبحت المحاكاة (Simulation) من أكثر الأدوات استخدامًا في دراسة أنظمة النقل واللوجستيات، نظرًا لقدرتها على تمثيل الأنظمة المعقدة وتحليل تأثير السيناريوهات المختلفة قبل تنفيذها ميدانيًا. كما ترتبط نماذج المحاكاة بصورة وثيقة بمبادئ نظرية الطوابير(Queuing Theory) ، والتي تستخدم لتحليل أزمنة الانتظار، وأطوال الطوابير، ومستويات الخدمة.
وفي هذا السياق، تناول Li وآخرون (2016) العلاقة بين أداء الجانب البري للميناء ومستويات الازدحام، حيث طور الباحثون نموذج محاكاة هجين يجمع بين النموذج الجغرافي الديناميكي (Dynamic Geographical Model) ونموذج الطوابير القائم على الأحداث المنفصلة (Discrete-Event Queue Model) وقد استخدم النموذج لتقييم الظروف المرورية في مجموعة من السيناريوهات الافتراضية، مع التركيز على تعقيدات تخطيط الجانب البري للموانئ الواقعة تحت قيود تشغيلية ومرورية مختلفة [6] .

كما أجرى Chamchang و Niyomdecha (2021) دراسة في ميناء سونغكلا (Songkhla) في تايلاند، حيث استخدما نموذج محاكاة قائمًا على نظرية الطوابير لتقييم استراتيجيات تحسين أداء بوابات الدخول، في ظل الزيادة المستمرة في أعداد الشاحنات. وقامت الدراسة بتحليل خمسة سيناريوهات مختلفة، تضمنت اختلاف أعداد المسارات

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

وأنماط التشغيل، باستخدام مؤشرات أداء شملت زمن انتظار الشاحنات وطول الطوابير. وأظهرت النتائج أن مشاركة البوابات بين العمليات المختلفة(Gate Sharing) ، إضافة إلى فصل بعض الإجراءات التشغيلية، يمكن أن تحقق تحسنًا ملحوظًا في إدارة الازدحام بتكلفة أقل مقارنة بتوسعة البنية التحتية. [7]

وفي إطار تحسين انسيابية الوصول إلى الموانئ، تناولت دراسة Ben Daya و Audy (2024) مشكلة إدارة حركة الوصول أثناء تنفيذ مشروع توسعة كبرى لميناء تروا ريفيير (Port of Trois- Rivières) في كندا. واعتمدت الدراسة على تحليل السيناريوهات باستخدام نماذج المحاكاة لتقييم تأثير الزيادة المتوقعة في حركة شاحنات الإنشاء والبضائع على أداء بوابات الدخول. وقد أظهرت النتائج أهمية تقييم قدرة البنية التحتية الحالية والمستقبلية على استيعاب التدفقات المرورية، كما أوصت بتحسين تخطيط المداخل وتعزيز التنسيق بين إدارة الميناء والجهات المسؤولة عن شبكة الطرق المحيطة. [8]

وعلى الرغم من أهمية هذه الدراسات، إلا أن معظمها ركز بصورة أساسية على إدارة حركة الشاحنات وتحسين تشغيل بوابات الموانئ من خلال السياسات التشغيلية أو زيادة كفاءة إجراءات الخدمة، بينما لم تتناول بصورة كافية تأثير التصميم الهندسي لمنطقة مدخل الميناء والتقاطعات المرتبطة بها باعتبارها عنصرًا رئيسيًا في تحديد مستوى الأداء المروري.

وفي المقابل، شهد مجال هندسة المرور تطورًا ملحوظًا في استخدام التصاميم البديلة غير التقليدية للتقاطعات (Unconventional Alternative Intersection Designs - UAIDs) بهدف تحسين السعة التشغيلية وتقليل التأخير مع الحاجة إلى تدخلات إنشائية محدودة مقارنة بإعادة إنشاء التقاطعات التقليدية بالكامل. وقد أثبتت العديد من الدراسات فعالية هذه التصاميم في تحسين أداء التقاطعات الحضرية في ظل ظروف مرورية مختلفة.

فقد أوضح Ahn وآخرون (2009) أن استبدال التقاطعات المزودة بالإشارات الضوئية بالدوارات المرورية يمكن أن يؤدي إلى تقليل استهلاك الوقود والانبعاثات نتيجة انخفاض عدد التوقفات وتحسن انسيابية الحركة. [9] كما أشار Boubaker (2016) إلى أن التصميم الهندسي للتقاطع ونظام التحكم المروري يؤثران بصورة مباشرة على استهلاك الطاقة وانبعاثات المركبات، بسبب تأثيرهما على تغيرات السرعة وعدد مرات التوقف. [10]

كما قام Hadidi وآخرون (2022) بتقييم مجموعة من البدائل غير التقليدية للتقاطعات التقليدية المزودة بإشارات ضوئية في مدينة عمّان بالأردن باستخدام المحاكاة الميكروسكوبية. وشملت البدائل المدروسة:

Median U-Turn، Superstreet، Jughandle، و.Single Quadrant Interchange

وقد تم تطبيق هذه التصاميم على شارع شاكر بن زيد الشرياني، ثم تقييم أدائها باستخدام مؤشرات مستوى الخدمة (LOS) وأظهرت النتائج أن تصميم Jughandle فقط حقق تحسنًا محدودًا في مستوى الخدمة، حيث ارتفع الأداء من المستوى F إلى المستوىE ، مما يؤكد أن نجاح هذه التصاميم يعتمد بدرجة كبيرة على خصائص الحركة المرورية وتوزيع التدفقات. [11] .

وفي دراسة Kvašňovská وآخرين (2022) تم تقييم الأداء التشغيلي والبيئي للتصاميم البديلة غير التقليدية للتقاطعات باستخدام المحاكاة الميكروسكوبية. واتخذت الدراسة تقاطع Tight Diamond Interchange في مدينة برنو بجمهورية التشيك حالة تطبيقية، حيث تمت مقارنة الوضع الحالي مع تصميمي Diamond Diverging Interchange (DDI) و Michigan Urban Diamond Interchange (MUDI) . واستخدم الباحثون برنامج PTV VISSIM لمحاكاة الحركة المرورية بعد معايرة النموذج باستخدام بيانات ميدانية، بينما تم استخدام برنامج MEFA لتقدير الانبعاثات. وأظهرت النتائج أن التصاميم البديلة ساهمت في تحسين السعة وتقليل التأخير والانبعاثات، مما يؤكد إمكانية استخدامها لتحقيق أهداف الاستدامة المرورية. [12]

كما درس Chen وآخرون (2023) أداء التصميمات الهندسية المختلفة لمخارج الطرق السريعة متعددة المسارات باستخدام المحاكاة الميكروسكوبية، بهدف معالجة الاختناقات الناتجة عن تغيرات المسارات وتأثير الشاحنات الثقيلة. واعتمدت الدراسة على نموذج محاكاة باستخدام برنامج PTV VISSIM تمت معايرته ببيانات ميدانية، وقارنت بين التصميم التقليدي، واستراتيجية فصل حركة المركبات الخاصة عن الشاحنات(PVTS) ، وتصميم هندسي محسن لتقليل تغيرات المسارات. وأظهرت النتائج أن التصميمات المحسنة حققت تحسنًا في الأداء التشغيلي تراوح بين 10% و20% مقارنة بالتصميم التقليدي. [13]

وفي دراسة حديثة، تناول Luo وآخرون (2025) تقييم مجموعة من التصاميم البديلة للتقاطعات المزودة بإشارات مرورية ثلاثية المراحل باستخدام المحاكاة الميكروسكوبية. وشملت البدائل المدروسة تصميم Median U-Turn (MUT)، و(Continuous Flow Intersection (CFI، وتصميمًا هجينًا يجمع بين MUT وCFI، بالإضافة إلى بدائل أخرى تهدف إلى تقليل تعارضات الحركة المرورية. واعتمدت الدراسة على برنامج PTV VISSIM لتقييم الأداء التشغيلي باستخدام مؤشرات التأخير وعدد التعارضات ومستوى الخدمة، وأظهرت النتائج أن التصاميم البديلة حققت أداءً

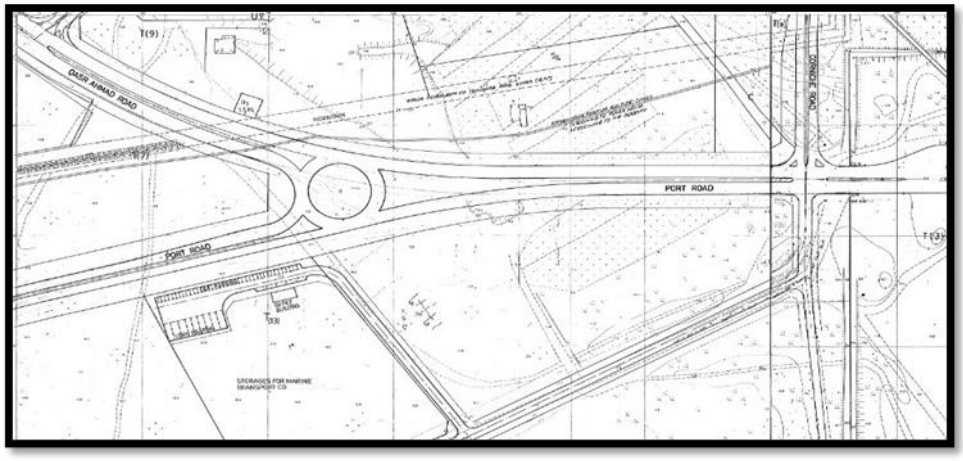
 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

أفضل من التقاطع التقليدي، مع قدرة بعض البدائل على تقليل التعارضات وتحسين الكفاءة التشغيلية. وأكدت الدراسة أن اختيار التصميم المناسب يعتمد على خصائص الحركة المرورية والقيود الهندسية للموقع. [14]
على الرغم من القيمة العلمية الكبيرة للدراسات السابقة وما قدمته من إسهامات مهمة في تحسين تشغيل الموانئ وتطوير التصاميم الهندسية للتقاطعات، فإن طبيعة المواقع المدروسة والظروف التشغيلية تختلف من ميناء إلى آخر، مما يجعل نتائجها غير قابلة للتطبيق المباشر في جميع البيئات. كما أن معظم هذه الدراسات ركزت على جانب محدد، سواء إدارة تشغيل البوابات أو تقييم بدائل تصميمية للتقاطعات، في حين أن الدراسات التي تجمع بين إعادة التصميم الهندسي لمدخل الميناء، وتحليل مبررات التحكم المروري، وتقييم الأداء باستخدام المحاكاة الميكروسكوبية ضمن إطار واحد ما تزال محدودة، ولا سيما في الدول النامية.
وبناء على ما تقدم، تسعى هذه الدراسة إلى تطبيق منهجية متكاملة تتلاءم مع الظروف المحلية لمدخل ميناء مصراتة، وذلك من خلال دمج التحليل الهندسي للموقع، وتقييم مبررات التحكم المروري وفق دليلMUTCD والمحاكاة الميكروسكوبية باستخدام برنامج PTV VISSIM ، بهدف مقارنة أداء التصميم السابق مع تصميم هندسي مقترح اعتمادًا على مجموعة من مؤشرات الأداء التشغيلية، تشمل متوسط التأخير، ومتوسط السرعة، وزمن الرحلة، وعدد مرات التوقف، بما يسهم في تقديم إطار عملي يمكن الاستفادة منه عند تطوير مداخل الموانئ ذات الخصائص المرورية المشابهة

2. المنهجية Methodology

2.1 منطقة الدراسة والتصاميم الهندسية

يعتبر مدخل المنطقة الحرة نقطة مرورية حيوية وحساسة في نفس الوقت لها خصوصيتها، حيث تتمثل أهميتها في الحركة الكبيرة للنقل التجاري بالإضافة لقربها من منطقة سكنية، مما يستدعي وضع تخطيط وتصميم يلبي كافة الاحتياجات (تفادي الازدحام، عزل الميناء وخصوصيته، مراعاة وصول السكان إلى المنطقة المجاورة)، ويضمن كفاءة الحركة المرورية من حيث الانسيابية وقلة التأخير، وكذلك من حيث السلامة وقلة الحوادث، إذ يعتبر هذان العاملان (التأخير والحوادث) أهم عاملين لتخطيط وتصميم أو تقييم أنظمة التقاطعات [15] .ولأجل تحقيق هذه الأهداف قامت سلطات الميناء بعمل تحوير في نظام التحكم القديم والذي هو عبارة عن جزيرة دوران تقليدية Roundabout بقطر 51 متر تقريباً، حيث تم استبدال التصميم القديم بنظام أكثر تعقيداً وتداخلاً يتكون من تقاطع بعد بوابة الميناء ذو اتجاه واحد على الفرعي one - way، الغرض منه خدمة المرور العابر إلى الممطقة السكنية (قصر أحمد)، ثم دوار كبير على شكل لمبة كهربائية يليه منطقة نسج في آخر الدوار weaving Area للربط مع طريق النقل الثقيل. والشكلان (1) و(2) يبينان التصميم القديم والتحوير الجديد على التوالي.



شكل (1) جزيرة دوران تقليدية والتي تمثل المخطط السابق

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

شكل (2) التحوير المقترح (نظام غير تقليدي)

2.2 البيانات والمدخلات

تتطلب عملية التحليل والمحاكاة إدخال مجموعة كبيرة من البيانات مثل عدد وأبعاد الحارات، الحجوم، تركيبة المرور ونسبة الشاحنات الثقيلة في كل فرع. ويمكن الرجوع إلى الشكل (2) لمعرفة التخطيط الأرضي وعدد الحارات بالتحوير المقترح،حيث تم بناء النموذج الهندسي للتصميم المقترح اعتمادًا على المخططات الهندسية المعتمدة للموقع، وفيما يخص الأحجام المرورية وتركيبة المرور فقد تم الاعتماد على الحصر المروي المقدم من إدارة الشؤون الفنية بالميناء والذي تظهر بالجدولين (1)، (2). حيث يبين الجدول الأول الحجوم الكلية للمركبات والشاحنات ومنه يمكن بسهولة معرفة نسبة المركبات الثقيلة Heavy Vehicle %، في حين يعرض الجدول الثاني الحركات التفصيلية الثلاث اليمين والطوالي واليسار للمركبات ككل.

جدول (1) الحجوم الكلية (مركبة/ساعة) وتركيبة المرور

تركيبة المرور	السيارات	الشاحنات الثقيلة	نسبة الشاحنات %
القادم من الثقيل	454	328	42
قصر أحمد رئيسي	572	335	37
قصر أحمد فرعي	127	3	2.3
خارج من الميناء	878	325	27

جدول (2) حجم المروري (مركبة /ساعة) لحركات الأفرع

نوع الحركة	اليمين		طوالي		اليسار	
اسم الفرع	السيارات	الشاحنات	السيارات	الشاحنات	السيارات	الشاحنات
القادم من الثقيل	335	243	49	35	70	50
قصر أحمد رئيسي	111	190	215	367	15	9
قصر أحمد فرعي	20	0	80	2	30	0
خارج من الميناء	16	6	450	166	413	152

2.3 منهجية التحليل والتقييم

تم في هذه الدراسة اتباع ثلاث أساليب للتحليل والتقييم تمثلت في التالي:

التقييم الهندسي باستخدام تحليل القرار متعدد المعايير و ذلك من خلال إجراء مقارنة منهجية بين المخطط السابق والتحوير المقترح، اعتمادًا على المخططات والرسومات الهندسية. وقد تم تحديد مجموعة من المعايير الهندسية والتشغيلية المستمدة من مبادئ وأدبيات تصميم الطرق وهندسة المرور، والتي شملت مدى تلبية التصميم للاحتياجات التشغيلية، وإمكانية فصل حركة المرور الثقيل عن المركبات الأخرى، والأبعاد الهندسية والسعة الاستيعابية، وسهولة المناورة،

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

بالإضافة إلى بساطة التصميم وسهولة استيعابه من قبل مستخدمي الطريق. وتم تقييم كل بديل من خلال مصفوفة قرار تعتمد على أوزان نسبية للمعايير ودرجات استيفاء لكل بديل، بهدف تحديد التصميم الأكثر توافقًا مع متطلبات الموقع.

تقييم نظام التحكم المروري وفق مبرراتMUTCD ويتمثل في التدقيق والتصميم لنظام التحكم المروري للتقاطع الأول، والذي هو عبارة عن طريق رئيسي خارج من بوابة الميناء مع طريق فرعي ذو اتجاه واحد، الغرض منه تفادي الازدحام عند البوابة وخدمة مرور منطقة قصر أحمد، وقد وُجد أن التقاطع لا يحتاج إلى إشارة ضوئية وفقاً لمبررات دليل MUTCD، وبالتالي تم اقتراح نظام تحكم من المستوى الثاني بوضع إشارة قف على الفرعي وتركيب حاجز حديدي لمنع مرور الشاحنات الثقيلة .

المحاكاة المرورية، وشملت محاكاة ونمذجة على برنامج VISSIM لكل من المخطط السابق والتحوير الغير تقليدي لمعرفة أداء كل منهما، ويعد برنامج VISSIM أحد أكثر برامج المحاكاة المرورية المجهرية (Microscopic Traffic Simulation)استخدامًا في مجالات هندسة النقل والمرور، ويُستخدم على نطاق واسع من قبل الباحثين والجهات الاستشارية وهيئات النقل لتقييم أداء شبكات الطرق والتقاطعات قبل تنفيذها ميدانيًا. يعتمد البرنامج على نماذج سلوك السائقين وتفاعل المركبات، مثل: نموذج متابعة المركبات (Car-Following Model) للاستجابة النفسية والفيزيائية للسائقين، كما يوفر البرنامج إمكانية اختبار بدائل التصميم الهندسي وخطط التحكم المروري، وتحليل مؤشرات الأداء التشغيلية مثل متوسط التأخير، وطول الطوابير، ومتوسط السرعة، وزمن الرحلة، وعدد مرات التوقف، الأمر الذي يجعله أداة فعالة لتقييم كفاءة البدائل الهندسية ودعم اتخاذ القرار في تخطيط وإدارة الحركة المرورية [16]

3. التحليل والنتائج Analysis and Results

3.1 التقييم الهندسي باستخدام تحليل القرار متعدد المعايير

تتضمن هذه المرحلة إجراء تقييم مقارن كمي وهندسي بين المخطط السابق والتحوير الجيومتري غير التقليدي المقترح. ولضمان الموضوعية وتحقيق الحيادية العلمية، تم تبني أسلوب تحليل القرار متعدد المعايير (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA) عبر طريقة الوزن المرجح، لتقييم مدى تلبية كل بديل للمحددات والأسس الهندسية الحاكمة . وقد تم تحديد المعايير التشغيلية وأوزانها النسبية بناءً على آراء الخبراء المحليين من استشاريين وأكاديمين والمهندسين التابعين للموانئ ووزارة المواصلات، وخلصت آراء الخبراء إلى ترتيب الأولويات الاستراتيجية لشبكة النقل في منطقة الدراسة وفقًا للآتي:

1. إمكانية فصل حركة المرور الثقيل عن المرور الخفيف (الوزن النسبي 30 %) ، حيث إن التصميم الجيد هو الذي يمنع أو يقلل التداخل المروري قدر الإمكان تفادياً للتأخير والحوادث.
2. الأبعاد الجيومترية والسعة الاستيعابية (الوزن النسبي: 25%): ويرتبط بعدد حارات المرور، وأبعادها التصميمية، ومناطق النسج (Weaving Areas) التي تمنح الشبكة مرونة وسعة مرورية أعلى تتيح للمركبات حرية المناورة الآمنة
3. بساطة التصميم وسهولة القيادة (الوزن النسبي: 25%): يمثل هذا المعيار المقايضة التشغيلية (Trade-off)؛ حيث يقيس مدى ألفة التصميم وسهولة استيعابه من قِبل السائقين، إذ تمتاز التصاميم التقليدية ببساطتها وانخفاض ارتباك السائق، في حين تتطلب التصاميم المبتكرة مناورات هندسية أكثر تعقيدًا لتحقيق كفاءة أعلى.
4. تلبية الاحتياجات التصميمية (الوزن النسبي 20 %) : وتتمثل في الرغبة بعزل بوابة الميناء تفادياً للازدحام والتداخل مع السكان المجاورين لما للميناء من خصوصية، مع إيجاد طريق بديل يخدم سكان المنطقة بدلاً من التقاطع السابق الذي كان يصب في بوابة الميناء.

وفي هذا الإطار، تم تطبيق نظام تقييم رقمي مباشر؛ حيث يمنح البديل درجة (1) إذا كان مستوفيًا للمعيار الهندسي، ودرجة (0) في حال عدم قدرته على تلبية المتطلب. يوضح الجدول (3) مصفوفة تحليل القرار واستخراج الدرجة النهائية المرجحة لكل بديل عبر ضرب درجة الاستيفاء في الوزن النسبي للمعيار.

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

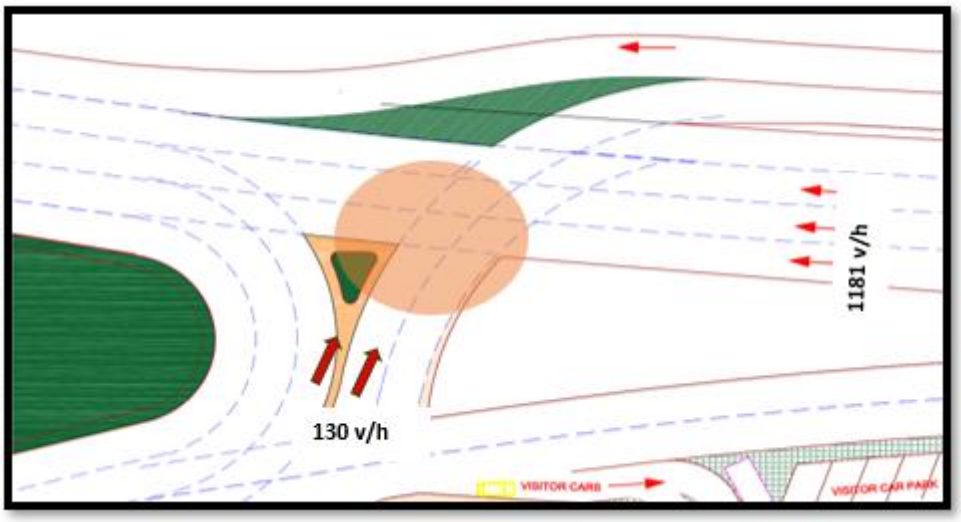
جدول (3) مصفوفة تحليل القرار متعدد المعايير القائمة على أوزان الخبراء المحليين

ت	معيار التقييم	الوزن المرجح	المخطط السابق	التحوير المقترح
1	فصل المرور الثقيل	% 30	0	1
2	الأبعاد الجيومترية والسعة	% 25	0	1
3	بساطة التصميم وسهولة القيادة	% 25	1	0
4	تلبية الاحتياجات	% 20	0	1
-	**الدرجة النهائية المرجحة**	**% 100**	**% 25**	**% 75**

تُثبت مخرجات مصفوفة القرار المعتمدة على تفضيلات الخبراء المحليين والموضحة في الجدول (3) التفوق الهندسي الحاسم للتحوير غير التقليدي المقترح بحيازته لـ 75%من إجمالي الأوزان التفضيلية، مقابل 25% فقط للمخطط السابق .

3.2 تقييم نظام التحكم المروري وفق مبررات MUTCD

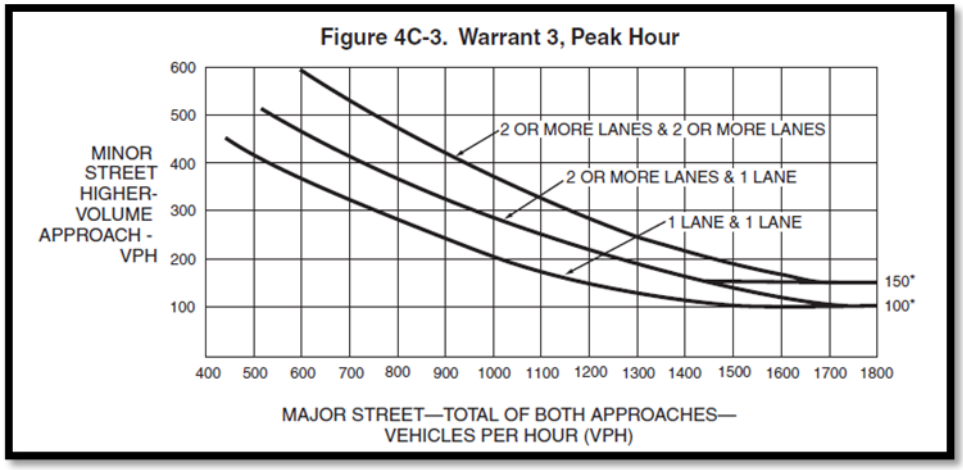
على الرغم من النقاط الإيجابية التي تحصل عليها التحوير المقترح، إلا وجود تقاطع من جهة الميناء يستدعي التدقيق عليه بحذر؛ إذا كما هو معلوم أن مناطق التقاطع تعد من أكثر المناطق الحرجة على شبكات الطرق؛ حيث إن أي تأثير عندها سينعكس إيجاباً أو سلباً على أداء الشبكة بالكامل. وقد تم في هذه المرحلة التدقيق على التقاطع الأول الذي يقع بعد بوابة الميناء والذي يربط الطريق الرئيسي الخارج من بوابة الميناء مع طريق فرعي ذو اتجاه واحد لخدمة المرور الداخل للمنطقة المجاورة، يبين الشكل (3) مخطط كروكي للتقاطع موضحا عليه الحجوم المرورية، والذي يربط الطريق الرئيسي الخارج من بوابة الميناء مع طريق فرعي ذو اتجاه واحد، عملية التقييم هنا تمثلت في تحليل الوضع المروري للتقاطع لاختيار نظام التحكم المناسب، حيث كما هو معلوم تقسم مستويات التحكم المروري على التقاطعات السطحية إلى ثلاث مستويات رئيسية: المستوى الأول: القواعد الأساسية للطرق Basic rules of the road، المستوى الثاني: تعيين حق الأولوية باستعمال إشارات قف، أعطي الأولوية Direct assignment of right -of way- using yield or stop signs، المستوى الثالث- الإشارات المرورية Traffic Signalization. تتدرج المستويات الثلاث السابقة في تكلفتها وبساطتها وفعاليتها في التحكم من الأدنى إلى الأعلى، حيث تعتبر الإشارة الضوئية أشد وأعلى مستويات التحكم المروري، وبسبب تكلفتها العالية وغيرها من السلبيات مثل: إمدادات الطاقة، والمنشآت الداعمة، بالإضافة للتأخير الحاصل، فمن المهم ألا يتم وضع إشارة ضوئية إلا عند الضرورة، حيث ينبغي ألا تركب إلا بعد فشل أنظمة التحكم السابقة. ويعتبر الدليل الأمريكي لأجهزة التحكم المروري MUTCD The Manual on Uniform Traffic Control Devices (2009) أكثر المراجع تفصيلاً لما يعرف بمبررات وضع الإشارة الضوئية warrants، حيث قام بتحديد ثماني مبررات واحدة منها على الأقل ينبغي أن تتحقق ليكون وضع الإشارة الضوئية مبرراً ومسموحاً به، وللتفصيل أكثر تنظر المراجع [15، 17، 18]



الشكل (3) تقاطع بوابة الميناء مع طريق فرعي (اتجاه واحد)

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ونظراً لأن كل مبرر يحتاج إلى دراسة مرورية خاصة، فقد تم الاكتفاء بحجم المرور عند ساعة الذروة ، وبالتالي يمكن اعتماده لمعرفة ما إذا كان وضع إشارة ضوئية مبررا ومسموحا به أم لا. وحيث إن المرور الكلي على الشارع الرئيسي (الخارج من الميناء) 1181 مركبة/ساعة، والمرور على الشارع الفرعي 130 مركبة/ساعة، وبتطبيق مبرر ساعة الذروة من خلال المنحنى الوارد بالشكل (4) حسب منهجية دليل MUTCD 2009 وباعتبار عدم وجود تخفيض، مع وجود أكثر من حارتين نجد أن ساعة الذروة لا تلبي المواصفات، وبالتالي فإن التقاطع لا يحتاج إلى إشارة ضوئية .



شكل (4) منحنى ساعة الذروة لمبرر تركيب الإشارة الضوئية

3.3 المحاكاة المرورية الميكروسكوبية

في هذه المرحلة تم بناء نموذجين أحدهما للمخطط السابق والثاني للتحوير المقترح وذلك لمحاكاة حركة المرور على برنامج النمذجة العددية VISSIM، وذلك لغرض الحصول على مقاييس أداء تعطي مؤشراً لإمكانية قبول أو رفض التصميم الجديد، وقد تم تقسيم هذه المرحلة إلى مرحلتين :

الأولى: محاكاة المخطط السابق والذي هو عبارة عن جزيرة دوران تقليدية بقطر 50 متر وحارتين لجميع الأفرع.

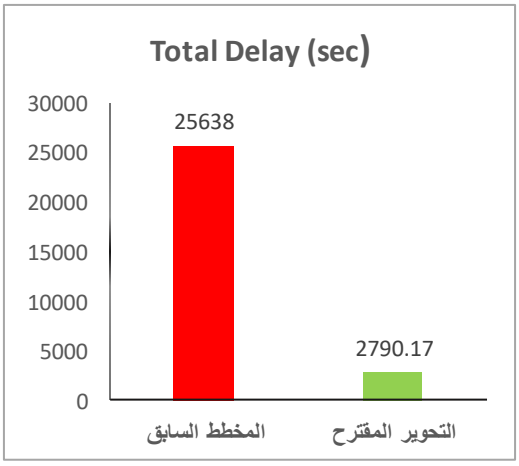
الثانية: محاكاة التحوير غير التقليدي ككل بحيث يعمل كشبكة واحدة.

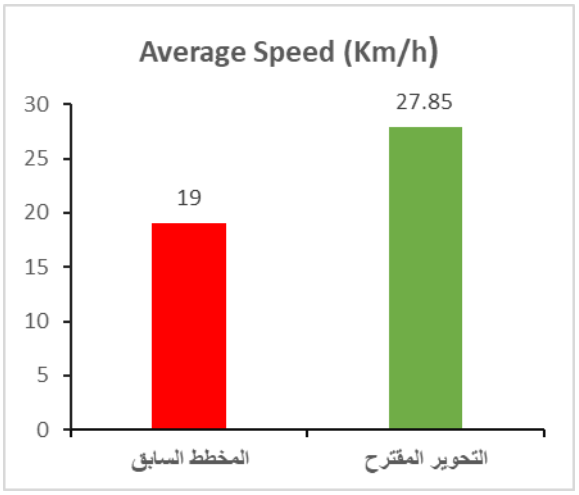
بعد إعداد النماذج وإدخال البيانات المرورية والهندسية تم الحصول على مقاييس الأداء Measure of performance والتي تظهر بالجدول (4)، كما تم عرض مقارنات بين التصميمين بالشكل (5).

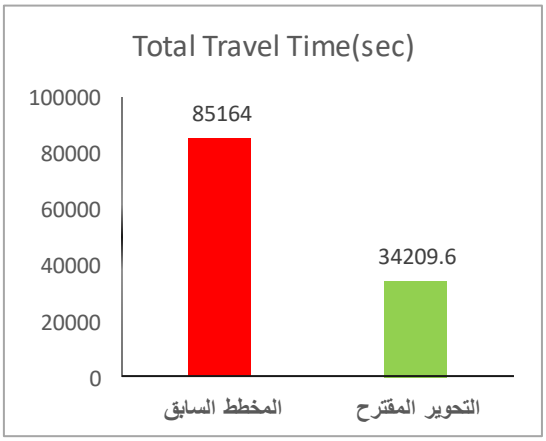
جدول (4) نتائج المحاكاة للمخطط السابق والتحوير المقترح

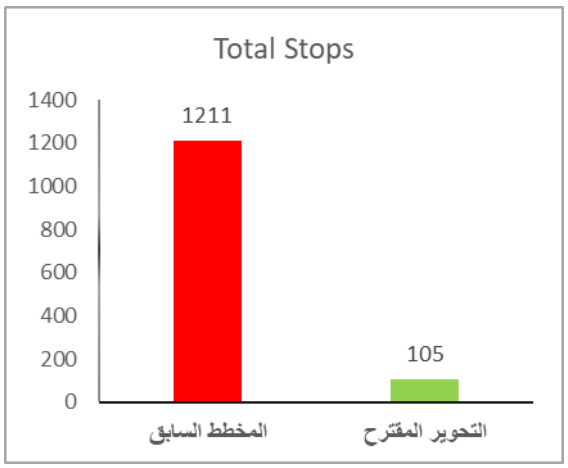
مقياس الأداء MOS	التحوير المقترح	المخطط السابق	نسبة التحسين
Average Speed (Km/h)	27.85	19	46.6 +
Total Delay (sec)	2790.17	25638	89.12-
Total Stops	105	1211	91 -
Total Travel Time (sec)	34209.6	85164	60 -
Control Delay	5.3	49	89.2 -
LOS	A	D	تحسن

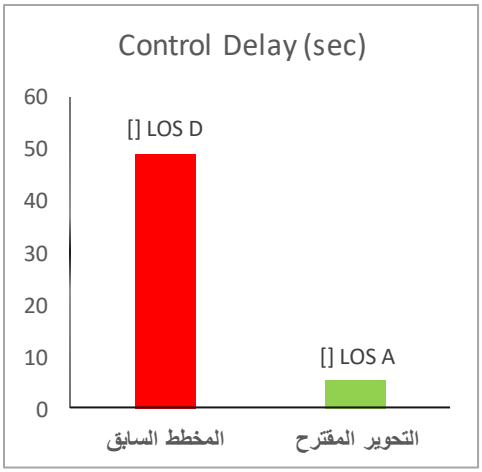
 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).











شكل (5) مقاييس الأداء للمخطط السابق والتحوير المقترح

أظهرت النتائج أن التحوير غير التقليدي حقق تحسناً ملحوظاً في الأداء التشغيلي للتقاطع مقارنة بالمخطط السابق. فقد انخفض متوسط تأخير التحكم (Control Delay) من 49 ثانية/مركبة إلى 5.3 ثانية/مركبة، بنسبة تحسن بلغت 89.2%، وهو ما انعكس مباشرة على تحسن مستوى الخدمة من LOS D إلى LOS A وفقاً لمعايير دليل السعة الأمريكي HCM. كما ارتفع متوسط سرعة التشغيل من 19 كم/ساعة إلى 27.85 كم/ساعة، أي بزيادة تقارب 46.6%، مما يشير إلى تحسن واضح في انسيابية الحركة المرورية. وانخفض إجمالي التأخير من 25638 ثانية إلى 2,790 ثانية بنسبة 89.12 %، كما انخفض إجمالي زمن الرحلة من 85,164 ثانية إلى 34,210 ثانية بنسبة 60 %، بالإضافة إلى

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ذلك، انخفض عدد مرات التوقف الكلي من 1,211 إلى 105 توقفات، أي بنسبة تحسن بلغت 91.3%، وهو ما يعكس انخفاضاً كبيراً في التوقفات غير الضرورية وتحسناً في استمرارية حركة المركبات.
وتؤكد هذه النتائج أن التصميم المقترح أسهم بصورة فعالة في تحسين كفاءة التشغيل، وتقليل الازدحام، ورفع مستوى الخدمة، وتحقيق انسيابية مرورية أعلى مقارنة بالتصميم السابق.

4. المناقشة Discussion

أظهر تحليل القرار متعدد المعايير أن التصميم المقترح يمتلك قدرة أعلى على تلبية المتطلبات التشغيلية والاستراتيجية لمنطقة الميناء، حيث حصل على 75% من الوزن النسبي مقارنة بـ25% للتصميم السابق. ويعود ذلك بصورة رئيسية إلى قدرة التصميم الجديد على فصل حركة الشاحنات الثقيلة عن المركبات المتجهة إلى المنطقة السكنية، وتتوافق هذه النتيجة مع ما أشارت إليه الدراسات السابقة حول تأثير تنظيم تدفقات الشاحنات وتحسين البنية الهندسية للمداخل في تقليل الاختناقات وتحسين كفاءة الجانب البري للموانئ.
كما أظهر تقييم نظام التحكم المروري وفق MUTCD 2009 أن تركيب إشارة ضوئية عند التقاطع الفرعي لا يمثل الحل الأمثل، حيث لم يتحقق مبرر حجم المرور خلال ساعة الذروة. وتوضح هذه النتيجة أهمية اختيار مستوى التحكم المناسب قبل اللجوء إلى الحلول ذات التكلفة العالية؛ إذ إن إضافة إشارة ضوئية في موقع لا يحتاج إليها قد تؤدي إلى زيادة التأخير وتقليل كفاءة الحركة بدلاً من تحسينها.
أما نتائج المحاكاة الميكروسكوبية فقد أكدت الفعالية التشغيلية للتصميم المقترح، حيث أدى تقليل نقاط التعارض وتحسين توزيع الحركات إلى انخفاض تأخير التحكم بنسبة 89.2%، وهو تحسن انعكس مباشرة على انتقال مستوى الخدمة من LOS D إلى LOS A. كما أن الانخفاض الكبير في عدد التوقفات بنسبة 91.3% يمثل مؤشرًا مهمًا على تحسن استمرارية الحركة، خصوصًا في المواقع التي تحتوي على نسبة مرتفعة من الشاحنات الثقيلة، لأن تقليل عمليات التوقف والتسارع المتكرر يساهم مستقبلًا في خفض استهلاك الوقود والانبعاثات.
وعلى الرغم من النتائج الإيجابية، فإن تطبيق التصاميم غير التقليدية يتطلب مراعاة عامل قابلية الفهم من قبل السائقين، خصوصًا خلال المرحلة الانتقالية بعد التنفيذ. لذلك يوصى مستقبلاً بإجراء تقييم ميداني بعد التنفيذ الفعلي.

5. الخلاصة

قدمت هذه الدراسة منهجية متعددة المعايير لتقييم وتحسين الأداء المروري لمدخل ميناء مصراتة، من خلال دمج التحليل الهندسي للتصميم، وتقييم نظام التحكم المروري وفق متطلبات دليلMUTCD 2009 ، إضافة إلى استخدام المحاكاة الميكروسكوبية بواسطة برنامج .PTV VISSIM وقد أتاحت هذه المنهجية إطارًا علميًا ومنهجيًا لمقارنة التصميم السابق مع البديل التصميمي المقترح.
أظهرت نتائج التقييم الهندسي أن التحوير المقترح يحقق توافقًا أفضل مع متطلبات الحركة المرورية مقارنة بالمخطط السابق، خاصة من حيث تلبية الاحتياجات التصميمية، وتحسين فصل حركة الشاحنات الثقيلة عن المركبات الأخرى، وزيادة عدد الحارات وتحسين إمكانية المناورة داخل منطقة التقاطع. وعلى الرغم من أن التصميم المقترح يتميز بدرجة أعلى من التعقيد الهندسي، إلا أن المزايا التشغيلية الناتجة عنه تجعله أكثر ملاءمة لطبيعة الحركة المرورية في مدخل الميناء.
كما أوضح تقييم نظام التحكم المروري أن التقاطع الواقع بعد بوابة الميناء لا يحقق مبررات تركيب إشارة ضوئية وفق متطلبات دليلMUTCD 2009 ، ولذلك فإن تطبيق نظام تحكم أبسط يتمثل في إعطاء الأولوية للطريق الرئيسي باستخدام إشارة قف على الطريق الفرعي، مع تنظيم حركة الشاحنات الثقيلة، يعد حلاً أكثر ملاءمة من الناحية التشغيلية والاقتصادية.
وأكدت نتائج المحاكاة الميكروسكوبية باستخدام برنامج VISSIM فعالية التصميم المقترح في تحسين الأداء التشغيلي مقارنة بالمخطط السابق. فقد انخفض تأخير التحكم من 49 ثانية/مركبة إلى 5.3 ثانية/مركبة، مما أدى إلى تحسن مستوى الخدمة من LOS D إلى LOS A. كما ارتفع متوسط سرعة التشغيل من 19 كم/ساعة إلى 27.85 كم/ساعة، وانخفض إجمالي التأخير وزمن الرحلة وعدد مرات التوقف بصورة ملحوظة، وهو ما يعكس تحسن انسيابية الحركة وتقليل الاختناقات المرورية.
وبشكل عام، أثبتت الدراسة أن دمج إعادة التصميم الهندسي مع معايير التحكم المروري والمحاكاة الميكروسكوبية يمثل منهجية فعالة لدعم القرارات الهندسية المتعلقة بتطوير مداخل الموانئ وتحسين كفاءتها التشغيلية. كما يمكن تطبيق هذا

 Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الإطار على مواقع مشابهة تعاني من تداخل حركة الشاحنات الثقيلة مع حركة المركبات الأخرى. ويوصى في الدراسات المستقبلية بتوسيع التقييم ليشمل الجوانب البيئية مثل استهلاك الوقود والانبعاثات بالإضافة لاستخدام المحاكاة الميكروسكوبية كمرحلة أساسية قبل تنفيذ أي تعديل هندسي كبير في التقاطعات ذات الأحجام المرورية العالية.

Compliance with ethical standards

Disclosure of conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References المراجع

[1]. Rodrigue, J.P., Comtois, C. and Slack, B. (2020), *The Geography of Transport Systems*, 5th Edition, Routledge, New York.

[2] Neagoe, M., Hvolby, H.H., Taskhiri, M.S. and Turner, P. (2021), "Using discrete-event simulation to compare congestion management initiatives at a port terminal", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 112, Article 102362.

[3] Chen, G., Govindan, K. and Golias, M.M. (2013), "Reducing truck emissions at container terminals in a low carbon economy: Proposal of a queueing-based bi-objective model for optimizing truck arrival pattern", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 55, pp. 3-22.

[4] Saharidis, G.K.D. and Konstantzos, G.E. (2018), "Critical overview of emission calculation models in order to evaluate their potential use in estimation of Greenhouse Gas emissions from in port truck operations", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 185, pp. 1024-1031, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.036.

[5] Essi, M.S., Chen, Y., Loh, H.S. and Gu, Y. (2021), "Enhancing productivity of ship chandlers' trucks at the port for sustainability", *Maritime Business Review*, Vol. 7 No. 3, pp. 222-238, doi: 10.1108/ MABR-12-2020-0068.

[6] Li, B.; Tan, K.W.; Tran, K.T. Traffic simulation model for port planning and congestion prevention. In Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference (WSC), Arlington, VI, USA, 11–14 December 2016; pp. 2382–2393.

[7] Chamchang, P.; Niyomdecha, H. Impact of service policies on terminal gate efficiency: A simulation approach. Cogent Bus. Manag. **2021**, 8, 1975955.

[8] Ben Daya, B., & Audy, J. F. (2024). Port access fluidity management during a major extension project: a simulation-based case study. *Sustainability*, *16*(7), 2834.

[9] **Ahn, K., Rakha, H., Trani, A. and Van Aerde, M. (2009),** "Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 135, No. 9, pp. 617–627, doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000030.

[10] Boubaker S, Rehimi F, Kalboussi A., 2016. Impact of intersection type and a vehicular fleet's hybridization level on energy consumption and emissions. J Traffic Transp Eng. 253–261.

[11] Hadid, T., Naghawi. H., Jadaan, K.,2022. Unconventional Intersection Designs for Improving Traffic Operation Along Arterial Roads. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 50(1), 58–68.

[12] Kvašňovská, E., Striegler, R., Pelikan, L., & Havlickova, E. (2023). Capacity and emission evaluation of new interchange designs using microsimulation. *Transportation Research Procedia*, *69*, 61-68.

[13] Chen, Q., Pan, B., & Liu, Y. (2023). Understanding the performance of multilane expressway exit design and a traffic organization strategy based on VISSIM micro-simulation and a comprehensive evaluation method. *Applied Sciences*, *13*(12), 7094.

[14] Luo, Z., Molan, A. M., Hummer, J. E., & Pande, A. (2025). Introducing the concept of alternative intersections with three-phase traffic signals. *Transportation Letters*, *17*(1), 169-182.

[15] R. P. Roess, E. S. Prassas, and W. R. McShane, *Traffic Engineering*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2004.

[16] PTV AG. (2023). *PTV Vissim 2023 User Manual*. Karlsruhe, Germany: PTV Planung Transport Verkehr AG.

[17] Federal Highway Administration. (2009). *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways: 2009 Edition*. U.S. Department of Transportation.

[18] N. J. Garber and L. A. Hoel, *Traffic and Highway Engineering*, 4th ed. Toronto, ON, Canada: Cengage Learning, 2009.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **AJAPAS** and/or the editor(s). **AJAPAS** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).