نموذج تعلم آلي للتنبؤ بإنتاجية محطة حاويات ميناء عدن: تطبيق باستخدام آلات المتجهات الداعمة

اعداد
محمد علوي أمزربه [١]، هشام هلال [٢]، إيمان فاروق الحداد [٣]
[١] الرئيس التنفيذي ورئيس مجلس الإدارة مؤسسة موانئ خليج عدن اليمنية - اليمن
[٣،٢] الأكاديمية العربية للعلوم والتكنولوجيا والنقل البحري
[٢] رئيس هيئة تحرير مجلة الجمعية العربية للملاحة

DOI NO. https://doi.org/10.59660/527213
Received 12/12/2025, Revised 25/01/2026, Acceptance 18/03/2026, Available online and Published 01/07/2026

Abstract

This study aims to develop a predictive model for the productivity of the Aden Container Terminal using machine learning techniques, particularly Support Vector Machines (SVM), in order to analyze operational performance indicators and forecast their future trends. The study relies on analyzing a set of operational variables associated with terminal performance, including the number of containers handled, number of visiting vessels, berth productivity, berth occupancy rate, ship turnaround time, customs clearance time, customer satisfaction, and container handling cost, while incorporating temporal and seasonal factors as well as the impact of implementing the Terminal Operating System (TOS). The results indicate that the SVM model demonstrates good predictive capability, achieving the highest accuracy in predicting customs clearance time, while also showing reasonable explanatory power for customer satisfaction and several other operational indicators. The findings further reveal that seasonal factors represent the most influential variable affecting most operational performance indicators, whereas the statistical impact of the TOS appeared relatively limited due to the nature of the available data. Overall, the study highlights the importance of employing machine learning models to support operational and strategic planning in ports, improve resource management, and anticipate changes in logistics performance, thereby enhancing the operational efficiency and competitiveness of the Aden Container Terminal within regional and international maritime transport networks.

Keywords: Productivity; Aden Container Terminal; Support Vector Machines (SVM) Operational Performance Indicators.

المستخلص:

تتناول هذه الدراسة تطوير نموذج تنبؤي لإنتاجية محطة حاويات ميناء عدن باستخدام تقنيات التعلم الآلي، وبخاصة آلات المتجهات الداعمة (SVM)، بهدف تحليل مؤشرات الأداء التشغيلية للمحطة والتنبؤ باتجاهاتها المستقبلية. اعتمدت الدراسة على تحليل مجموعة من المتغيرات التشغيلية المرتبطة بأداء المحطة، مثل عدد الحاويات المعالجة، وعدد السفن الزائرة، وإنتاجية الأرصفة، ومعدل إشغال الأرصفة، ووقت دوران السفن، ووقت التخليص الجمركي، ورضا العملاء، وتكلفة مناولة الحاويات، مع إدراج العوامل الزمنية والموسمية وتأثير تطبيق نظام تشغيل المحطات (TOS). أظهرت النتائج أن نموذج SVM يتمتع بقدرة تنبؤية جيدة، حيث حقق أعلى دقة في التنبؤ بوقت التخليص الجمركي، كما أظهر قدرة مقبولة في تفسير رضا العملاء وبعض

المؤشرات التشغيلية الأخرى. كما كشفت النتائج أن العوامل الموسمية تمثل المتغير الأكثر تأثيراً في معظم مؤشرات الأداء التشغيلية، في حين كان تأثير تطبيق نظام تشغيل المحطات محدوداً إحصائياً بسبب طبيعة البيانات. وتشير نتائج الدراسة إلى أهمية توظيف نماذج التعلم الآلي في دعم التخطيط التشغيلي والاستراتيجي للموانئ، وتحسين إدارة الموارد والتنبؤ بالتغيرات في الأداء اللوجستي، بما يسهم في تعزيز كفاءة تشغيل محطة حاويات ميناء عدن وزيادة قدرتها التنافسية ضمن شبكة النقل البحري الإقليمية والدولية .

الكلمات الدالة: الإنتاجية، محطة عدن للحاويات، آلات المتجهات الداعمة، المؤشرات التشغيلية.

١. المقدمة:

في ظل التحولات المتسارعة التي يشهدها قطاع النقل البحري والخدمات المينائية، أصبحت تكنولوجيا المعلومات أحد العوامل المحورية في تطوير الأداء اللوجستي داخل الموانئ. فقد أظهرت العديد من الدراسات أن اعتماد الأنظمة المعلوماتية المتقدمة يسهم في تبسيط الإجراءات التشغيلية وتعزيز التكامل بين مختلف الأطراف المعنية، وذلك من خلال توفير معلومات دقيقة وآنية تدعم عمليات اتخاذ القرار (Hervás-Peralta et al., 2019). كما توفر هذه الأنظمة إمكانات متقدمة في مجالات التخطيط والتنبؤ وإدارة الموارد، الأمر الذي يؤدي إلى خفض التكاليف التشغيلية وتحسين استغلال الإمكانات المتاحة. وفيما يتعلق بمحطة حاويات ميناء عدن، فإن تطبيق نظام تشغيل المحطات (Terminal Operating System – TOS) يمثل خطوة مهمة نحو تطوير آليات إدارة العمليات التشغيلية داخل المحطة، إذ يسهم في تحسين مستوى التنسيق المؤسسي، وتعزيز الشفافية والرقابة التشغيلية، وتقليل الأخطاء البشرية، الأمر الذي ينعكس إيجابًا على زيادة الإنتاجية وتحسين جودة الخدمات المقدمة.

ويُنظر إلى نظام تشغيل المحطات (TOS) بوصفه البنية الرقمية الأساسية التي تعتمد عليها محطات الحاويات الحديثة، لما يوفره من قدرة على أتمتة عدد كبير من العمليات التشغيلية التي كانت تُدار تقليديًا بطرق يدوية. ويوفر هذا النظام مجموعة متكاملة من الوظائف التي تدعم إدارة حركة الحاويات داخل المحطة بكفاءة عالية، مع التركيز على تحسين التنسيق بين مختلف مراحل العمليات اللوجستية. كما يُعرّف نظام TOS بأنه نظام حاسوبي متطور يُستخدم للتخطيط والتتبع والتحكم في حركة وتخزين الشحنات، إضافة إلى إدارة الأصول وتوزيع الموارد البشرية داخل المحطة البحرية أو في المناطق الخلفية التابعة لها بصورة لحظية ومستمرة (Jamal et al., 2017). ويؤدي النظام دورًا محوريًا في تنظيم تدفقات الحاويات عبر مختلف مراحل المناولة داخل المحطة، فضلًا عن إتاحته تطبيقات متعددة لجمع البيانات التشغيلية وتحليلها وتبادلها، الأمر الذي يوفر رؤية شاملة للعمليات التشغيلية ويسهم في الاستخدام الأمثل للموارد المتاحة. كما يعمل النظام كتطبيق مركزي مسؤول عن التخطيط والتنفيذ والمراقبة اللحظية لحركة الحاويات داخل المحطة، حيث ينظم انتقال الحاويات بين السفن والساحات، وبين الساحات ووسائل النقل البرية باستخدام معدات المناولة المختلفة، بما يحقق التنسيق الكامل بين جميع مراحل العمليات التشغيلية. ويسهم هذا النظام في رفع كفاءة التشغيل من خلال تحسين عمليات تحميل وتفريغ السفن، وإدارة الساحات والمخازن، وتنظيم استخدام المعدات والعمالة (Novaes et al., 2024).

وعلاوة على ذلك، يمثل نظام TOS منصة برمجية متكاملة لإدارة مختلف الأنشطة التشغيلية داخل محطة الحاويات، إذ يتيح الإشراف اللحظي على عدد من المكونات التشغيلية مثل البوابات والأرصفة والحاويات المبردة والبضائع الخطرة وخطوط السكك الحديدية. كما يدعم النظام تقنيات تبادل البيانات الإلكترونية (EDI) وخدمات الويب، الأمر الذي يسهم في تعزيز تكامل البيانات وتسهيل التواصل مع الجهات الخارجية المرتبطة بعمليات الميناء. وتبرز أهمية هذا النظام في قدرته على توحيد عناصر التشغيل المختلفة ضمن بيئة رقمية متكاملة، بما يؤدي إلى خفض التكاليف التشغيلية وتسريع الإجراءات وتحسين موثوقية الأداء في محطات الحاويات الحديثة.(Weerasinghe et al., 2024)

٢. الدراسات السابقة:

تزايد الاهتمام في الأدبيات الحديثة بدراسة كفاءة تشغيل محطات الحاويات في ظل التحولات المتسارعة التي يشهدها قطاع النقل البحري العالمي، وما يصاحبه من نمو متواصل في أحجام التجارة الدولية وتعقّد العمليات اللوجستية المرتبطة بها. وقد أدى هذا التطور إلى ظهور تحديات تشغيلية متعددة، من أبرزها ازدحام الموانئ، وارتفاع تكاليف التشغيل، وزيادة الضغوط البيئية الناتجة عن الانبعاثات الكربونية، الأمر الذي دفع الباحثين إلى البحث عن أساليب وتقنيات متقدمة لتحسين أداء محطات الحاويات وتعزيز قدرتها على الاستجابة للطلب المتزايد على الخدمات المينائية. وفي هذا السياق، ركزت العديد من الدراسات الحديثة على توظيف التقنيات الرقمية، وأنظمة تشغيل المحطات (TOS)، وتحليلات البيانات الضخمة، وتقنيات الذكاء الاصطناعي، بهدف دعم التخطيط التشغيلي وتحسين إدارة الموارد ورفع كفاءة العمليات داخل الموانئ. كما تناولت هذه الدراسات تحليل العوامل المؤثرة في الإنتاجية التشغيلية للمحطات، وتطوير نماذج تنبؤية لدعم اتخاذ القرار، وتقييم أثر الأتمتة والتحول الرقمي في تعزيز مرونة الموانئ وقدرتها على مواجهة الأزمات والاضطرابات التشغيلية. وانطلاقًا من ذلك، يستعرض هذا الجزء مجموعة من الدراسات السابقة التي تناولت موضوع كفاءة تشغيل محطات الحاويات من زوايا متعددة، بما يسهم في إبراز الاتجاهات البحثية الحديثة وتحديد الفجوات المعرفية التي يمكن أن تسهم الدراسة الحالية في معالجتها.

سعت دراسة (Hervás-Peralta et al., 2019) إلى تعميق الفهم الوظيفي لأنظمة تشغيل المحطات (Terminal Operating Systems – TOS) المستخدمة في إدارة محطات الحاويات البحرية والنهرية والموانئ الجافة داخل الاتحاد الأوروبي، وذلك في ظل الزيادة المتسارعة في حركة النقل البحري وما ترتب عليها من تحديات تشغيلية أبرزها ازدحام الموانئ وارتفاع انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وقد اعتمدت الدراسة على منهج تحليلي متعدد المعايير، مستندة إلى أسلوب التحليل الهرمي (AHP) لتحديد وظائف نظام تشغيل المحطات وتصنيفها وترتيب أولوياتها وفقًا لمدى تأثيرها في الأداء التشغيلي والاستدامة البيئية. ولتعزيز موثوقية النتائج جرى التحقق من متانة النموذج من خلال إجراء تحليل الحساسية. وقد تناول التحليل 107 وظيفة تشغيلية تم تجميعها ضمن ستة محاور رئيسة شملت إدارة المخازن، والعمليات البحرية، وإدارة البوابات، وإدارة البيانات الأساسية، وأنظمة الاتصالات، ولوحات التحكم المتكاملة مع أنظمة تخطيط موارد المؤسسة (ERP). وأظهرت نتائج الدراسة أن بعض الوظائف التشغيلية تمثل عناصر محورية في تحسين كفاءة محطات الحاويات، ومن أبرزها تتبع زمن السفن، وتحسين استغلال المساحات داخل المحطة، وإعداد قوائم التحميل والتفريغ، إضافة إلى تحسين مواقع تخزين الحاويات. وأكدت الدراسة أن التركيز على تطوير هذه الوظائف يسهم في تقليل الازدحام داخل المحطات وخفض الانبعاثات، كما أوصت مطوري ومشغلي أنظمة

تشغيل المحطات ومديري الموانئ بتوجيه الاستثمارات التقنية نحو هذه الوظائف ذات الأولوية العالية لما لها من دور مباشر في تعزيز الأداء التشغيلي وتحقيق أهداف الاستدامة في قطاع الموانئ. وفي سياق تحسين إدارة العمليات اللوجستية البحرية.

هدفت دراسة (Chargui et al., 2021) إلى تطوير نموذج تنبؤي أكثر دقة لتقدير معدل إنتاجية الرافعات الجسرية (Quay Cranes – QCs)، نظرًا للدور الحاسم الذي يلعبه هذا المؤشر في جدولة الرافعات وتحسين أداء محطات الحاويات. واعتمدت الدراسة على منهج كمي تطبيقي، حيث اقترحت نموذجًا تنبؤيًا قائمًا على الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) مدعومًا بخوارزمية البحث بالجوار المتغير (VNS) كآلية تدريب متقدمة لتحسين دقة التنبؤ. وقد أخذ النموذج في الاعتبار مجموعة من العوامل التشغيلية، من بينها خصائص الحاويات المنقولة على السفن المختلفة وفترات التوقف المتوقعة للمعدات. كما قامت الدراسة بتحليل أثر معدل الإنتاجية المتنبأ به على جدولة الرافعات الجسرية من خلال دمجه كمدخل رئيس في نموذج تحسين لجدولة الرافعات، مع إجراء مقارنة بين الأداء الناتج عن النموذج المقترح والأداء الناتج عن نموذج المتوسط المتحرك التقليدي. وأظهرت النتائج أن استخدام النموذج التنبؤي المعتمد على الذكاء الاصطناعي أسهم في إنتاج جداول تشغيل للرافعات أكثر قربًا من الجداول المبنية على البيانات التشغيلية الفعلية للمحطات، مقارنة بالنماذج التقليدية. وتشير هذه النتيجة إلى فعالية توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحسين دقة التخطيط التشغيلي وتقليص الفجوة بين التخطيط النظري والتنفيذ العملي في إدارة محطات الحاويات.

كما قدمت دراسة (Kim et al., 2022) مقارنة تحليلية بين أداء محطات الحاويات المؤتمتة بالكامل والمحطات التقليدية خلال جائحة كوفيد-١٩، مستندة إلى بيانات تشغيلية فعلية تم تحليلها باستخدام أدوات تحليل كمي مدعومة بخوارزميات ذكية. وركزت الدراسة على تقييم مدى مرونة الأنظمة التشغيلية في مواجهة الاضطرابات غير المتوقعة التي شهدها قطاع النقل البحري خلال الجائحة. وأظهرت النتائج أن المحطات التي تعتمد على أنظمة تشغيل رقمية متقدمة ودرجة أعلى من الأتمتة استطاعت تحقيق أداء أفضل من حيث حجم المناولة وزمن بقاء السفن داخل الميناء مقارنة بالمحطات التقليدية. وتبرز هذه النتائج الدور الحيوي للتقنيات الذكية وأنظمة تشغيل المحطات في تعزيز كفاءة الموانئ وقدرتها على الحفاظ على استمرارية العمليات في الظروف غير المستقرة. وفي إطار دعم التخطيط الاستراتيجي طويل الأجل للموانئ.

كما هدفت دراسة (Li et al., 2023) إلى تطوير نموذج تنبؤي دقيق للتنبؤ طويل الأجل بحجم مناولة الموانئ، باعتباره أحد المؤشرات الأساسية المستخدمة في تقييم كفاءة الموانئ واتخاذ قرارات الاستثمار في البنية التحتية. وقد طُبق النموذج على بيانات ميناء نينغبو–تشوشان، أحد أكبر الموانئ في العالم من حيث حجم المناولة. واعتمدت الدراسة على منهج كمي تحليلي قائم على تقنيات الذكاء الاصطناعي، حيث جرى استخدام التحليل العلائقي الرمادي (Grey Relational Analysis) لاختيار اثني عشر متغيرًا تمثل العوامل الأكثر ارتباطًا بالتغيرات في حجم المناولة. وبعد تحديد هذه المتغيرات، استُخدمت كمدخلات في نموذج الشبكات العصبية العميقة ثنائية الاتجاه (BiLSTM) لبناء نموذج تنبؤي متقدم. وأظهرت النتائج أن النموذج المقترح تفوق على نماذج التعلم الآلي والشبكات العصبية التقليدية من حيث الدقة التنبؤية، حيث بلغ متوسط نسبة الخطأ المطلق (MAPE) نحو 2.95%. كما كشفت التنبؤات عن اتجاه تصاعدي سريع في حجم المناولة بالميناء حتى عام 2026، الأمر الذي يشير إلى الحاجة إلى توسيع القدرات التشغيلية للميناء لمواكبة الطلب المتوقع.

وبناءً على هذه النتائج، أوصت الدراسة بضرورة تبني النماذج التنبؤية المعتمدة على الذكاء الاصطناعي في التخطيط الاستراتيجي طويل الأجل للموانئ، بما يدعم قرارات التوسع الاستثماري ويعزز إدارة الطاقة الاستيعابية للمحطات.

ومن منظور أوسع لتقييم كفاءة تشغيل محطات الحاويات، تناولت دراسة (Weerasinghe et al., 2024) هذا الموضوع من خلال إجراء مراجعة منهجية لتطبيقات بحوث العمليات وتقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في تشغيل الموانئ. وركزت الدراسة على تحليل استخدام نماذج التعلم الآلي المختلفة، بما في ذلك الشبكات العصبية والخوارزميات التطورية، في تحسين عدد من العمليات التشغيلية الأساسية مثل تخطيط الأرصفة، وجدولة المعدات، وتقليل زمن انتظار السفن. وأظهرت نتائج المراجعة أن دمج الأنظمة الذكية مع أنظمة تشغيل المحطات (TOS) يسهم بشكل مباشر في تحسين الإنتاجية التشغيلية لمحطات الحاويات وخفض التكاليف التشغيلية، كما يعزز القدرة على اتخاذ قرارات تشغيلية أكثر دقة وفعالية. وفي سياق توظيف تحليلات البيانات التشغيلية في تحسين الأداء، هدفت دراسة (Novaes Mathias et al., 2024) إلى استكشاف دور علوم البيانات والتقنيات التحليلية الحديثة في تعزيز كفاءة تشغيل محطات الحاويات وزيادة قدرتها التنافسية، وذلك من خلال تحليل البيانات التشغيلية الفعلية لمحطة هاكاتا الدولية للحاويات في اليابان .واعتمدت الدراسة على منهج كمي تطبيقي استخدم البيانات التشغيلية اليومية لمعدات الرافعات المطاطية (RTG)، إلى جانب تطبيق تقنيات تحليل البيانات والتنقيب عن البيانات ونماذج المحاكاة لفهم أنماط حركة الحاويات داخل ساحات التخزين. وركزت الدراسة بصورة خاصة على دعم عملية اتخاذ القرار المتعلقة بتحديد المواقع المثلى لتكديس الحاويات، وهي من أكثر القرارات التشغيلية تعقيدًا نظرًا لتعدد العوامل المؤثرة فيها. وقد أظهرت النتائج أن اعتماد استراتيجيات تشغيلية قائمة على البيانات، مدعومة بنماذج المحاكاة، أسهم بشكل ملحوظ في تقليل عدد حركات المناولة وإعادة المناولة غير الضرورية، الأمر الذي انعكس إيجابيًا على كفاءة العمليات التشغيلية وزيادة الطاقة الإنتاجية للمحطة. وأكدت الدراسة أن توظيف تحليلات البيانات التشغيلية يمثل أداة فعالة لدعم التخطيط التشغيلي الذكي وتقليل الهدر وتحسين السياسات التشغيلية في محطات الحاويات الحديثة.

كما هدفت دراسة (Chhetri et al., 2025) إلى تحليل العوامل المؤثرة في زمن بقاء الحاويات داخل الميناء Container Dwell Time – CDT) في ميناء مومباسا، وذلك من خلال توظيف تقنيات التعلم الآلي بهدف تحسين الكفاءة التشغيلية ودعم اتخاذ القرار الاستراتيجي. واعتمدت الدراسة على منهج كمي تطبيقي قائم على تحليل بيانات فعلية آنية لحركة الحاويات داخل الميناء، حيث جرى اختبار مجموعة من نماذج التعلم الآلي، من بينها الشبكات العصبية الاصطناعية، والغابات العشوائية، وأشجار القرار. وأظهرت النتائج وجود تباين زمني واضح في زمن بقاء الحاويات، سواء على مستوى أيام الأسبوع أو فترات السنة، حيث سجلت أعلى القيم خلال فترات بعد الظهر وخلال شهري نوفمبر وديسمبر. وعلى الرغم من أن نماذج الشبكات العصبية والغابات العشوائية أظهرت أداءً تنبؤيًا أعلى من حيث الدقة، فقد تم اعتماد نموذج شجرة القرار نظرًا لما يوفره من سهولة في التفسير وشفافية تحليلية. كما كشفت النتائج أن نمط النقل يمثل العامل الأكثر تأثيرًا في زمن بقاء الحاويات، إذ يرتبط النقل البري بالشاحنات بزمن بقاء أطول مقارنة بالنقل بالسكك الحديدية، إلى جانب تأثيرات زمنية ومكانية أخرى مرتبطة بمواقع معينة داخل الميناء وأيام محددة من الأسبوع. وبناءً على هذه النتائج، أوصت الدراسة بضرورة توظيف نماذج التعلم الآلي المعتمدة على البيانات الآنية لتحسين إدارة تدفقات الحاويات وتقليل زمن بقائها داخل الميناء، بما يدعم التخطيط التشغيلي والاستراتيجي للموانئ، خاصة في الدول

النامية. وأخيرًا، هدفت دراسة (Shiraishi et al., 2025) إلى تقييم كفاءة تشغيل محطات الحاويات من خلال تحليل تجريبي لأزمنة دوران السفن والشاحنات والحاويات في عدد من المحطات اليابانية، باعتبار هذه المؤشرات من أهم المقاييس المستخدمة في تقييم الأداء التشغيلي للموانئ. وقد اعتمدت الدراسة على منهج كمي تطبيقي قائم على دمج قواعد بيانات متعددة شملت سجلات مشغلي المحطات، وبيانات حركة السفن، وبيانات خدمات الخطوط الملاحية، بهدف تحليل أنماط رسو السفن ووصول الشاحنات وزمن دورانها، إضافة إلى دورة حركة الحاويات وزمن بقائها داخل المحطة. وأظهرت النتائج وجود أنماط زمنية واضحة في العمليات التشغيلية، مع فروق ملحوظة بين حاويات الاستيراد والتصدير. كما بينت أن عدد زيارات السفن، ونوع الحاويات، وتوقيت العمليات خلال اليوم تمثل عوامل رئيسة تؤثر في مستويات الكفاءة التشغيلية. وأوضحت تحليلات الانحدار أن أزمنة الدوران تتأثر بدرجة أكبر بالعوامل التي تقع ضمن نطاق سيطرة إدارة المحطة مقارنة بالعوامل الخارجية. وفي ضوء ذلك، أوصت الدراسة بتبني أنظمة جدولة ديناميكية مدعومة بالرقمنة، وتعزيز توحيد الإجراءات التشغيلية وتحسين استغلال البنية التحتية للموانئ، بما يدعم جهود التحول الرقمي ويرفع كفاءة تشغيل محطات الحاويات ويزود صانعي القرار بإرشادات قائمة على الأدلة لتحسين الأداء الميناني.

أ. الفجوة البحثية:

على الرغم من تزايد الاهتمام في الأدبيات الحديثة بدراسة كفاءة تشغيل محطات الحاويات باستخدام تقنيات التحليل الكمي والذكاء الاصطناعي، فإن معظم الدراسات السابقة ركزت على تطوير نماذج تنبؤية أو تحليلية لمعالجة جوانب محددة من العمليات التشغيلية في الموانئ، مثل التنبؤ بإنتاجية الرافعات، أو حجم مناولة الحاويات، أو جدولة المعدات، أو تقليل زمن انتظار السفن. كما ركزت العديد من الدراسات على تطبيق تقنيات التعلم الآلي والنماذج التنبؤية في موانئ كبرى أو في بيئات تشغيلية متقدمة تعتمد على مستويات عالية من الأتمتة والتحول الرقمي. وعلى الرغم من أهمية هذه الدراسات في تطوير المعرفة العلمية في مجال إدارة الموانئ، إلا أنها لم تتناول بصورة كافية تحليل العلاقة المتكاملة بين تطبيق أنظمة تشغيل المحطات (TOS) ومجموعة واسعة من مؤشرات الأداء التشغيلية لمحطات الحاويات باستخدام نماذج تنبؤية متقدمة.

كما يلاحظ أن الأدبيات الحالية تفتقر إلى دراسات تطبيقية تركز على الموانئ في الدول النامية، وبخاصة الموانئ الواقعة في منطقة البحر العربي والبحر الأحمر، حيث تختلف الظروف التشغيلية والاقتصادية عن تلك الموجودة في الموانئ المتقدمة. وبشكل خاص، لا تزال الدراسات التي تتناول محطة حاويات ميناء عدن محدودة للغاية، سواء من حيث تحليل مؤشرات الأداء التشغيلية أو استخدام تقنيات التعلم الآلي لبناء نماذج تنبؤية لإنتاجية المحطة. كذلك فإن معظم الدراسات السابقة تناولت مؤشراً تشغيلياً واحداً أو عدداً محدوداً من المؤشرات، في حين أن فهم الأداء التشغيلي للموانئ يتطلب تحليلاً متكاملاً لمجموعة من المؤشرات اللوجستية المرتبطة بالإنتاجية والكفاءة التشغيلية. ومن هنا تظهر فجوة بحثية تتمثل في الحاجة إلى تطوير نموذج تنبؤي متكامل يعتمد على تقنيات التعلم الآلي لتحليل العلاقة بين العوامل الزمنية والموسمية وتطبيق نظام تشغيل المحطات (TOS) وبين مؤشرات الأداء التشغيلية المختلفة لمحطة حاويات ميناء عدن.

ب. الإضافة العلمية:

تسعى الدراسة الحالية إلى معالجة هذه الفجوة البحثية من خلال تقديم إطار تحليلي وتطبيقي يعتمد على آلات المتجهات الداعمة (SVM) لبناء نموذج تنبؤي لإنتاجية محطة حاويات ميناء عدن وتحليل سلوك مجموعة من مؤشرات الأداء التشغيلية المرتبطة بعمل المحطة. وتتمثل الإضافة العلمية للدراسة في توظيف تقنيات التعلم الآلي في تحليل بيانات تشغيلية فعلية لمحطة حاويات في أحد الموانئ الإقليمية المهمة، الأمر الذي يسهم في توسيع نطاق تطبيق هذه التقنيات في مجال إدارة الموانئ والخدمات اللوجستية. كما تقدم الدراسة نموذجاً تحليلياً يدمج بين تحليل المؤشرات التشغيلية والتنبؤ بالأداء المستقبلي للمحطة، مما يتيح فهماً أكثر شمولاً لديناميكيات الأداء التشغيلي لمحطات الحاويات. كذلك تسهم الدراسة في تطوير منهجية تحليلية يمكن تطبيقها في موانئ أخرى ذات ظروف تشغيلية مشابهة، كما توفر نتائجها إطاراً علمياً لدعم استخدام النماذج التنبؤية القائمة على الذكاء الاصطناعي في التخطيط التشغيلي والاستراتيجي للموانئ. ومن خلال تحليل الأهمية النسبية للمتغيرات المؤثرة في الأداء، تقدم الدراسة أيضاً إسهاماً علمياً في فهم العوامل الأكثر تأثيراً في إنتاجية محطات الحاويات، الأمر الذي يساعد في تطوير نماذج أكثر دقة لتحليل وتحسين الأداء اللوجستي في قطاع الموانئ.

٣. مشكلة البحث:

تُعد محطات الحاويات أحد المكونات الأساسية في منظومة النقل البحري وسلاسل الإمداد العالمية، حيث تلعب دورًا محوريًا في تسهيل حركة التجارة الدولية وتعزيز كفاءة الخدمات اللوجستية. ومع التوسع المستمر في أحجام التجارة البحرية وتزايد حركة الحاويات عالميًا، أصبحت الموانئ تواجه تحديات متزايدة تتعلق بضرورة تحسين كفاءة العمليات التشغيلية وتعظيم إنتاجية المحطات، بما يضمن تقليل زمن المناولة، وتحسين استغلال الموارد، وتعزيز القدرة التنافسية للموانئ (نبيل عيفان واخرون،٢٠٢٤). وفي هذا السياق، تمثل القدرة على التنبؤ الدقيق بمؤشرات الأداء التشغيلية أحد الأدوات المهمة التي تساعد إدارات الموانئ على التخطيط الفعّال للموارد وتحسين اتخاذ القرارات التشغيلية والاستراتيجية.

ورغم التطورات التكنولوجية التي شهدها قطاع الموانئ، بما في ذلك تطبيق أنظمة تشغيل المحطات (Terminal Operating Systems – TOS) والتحول نحو الرقمنة في إدارة العمليات اللوجستية، إلا أن العديد من محطات الحاويات في الدول النامية ما زالت تواجه تحديات في استثمار البيانات التشغيلية المتاحة بصورة فعالة لدعم التخطيط المستقبلي وتحسين الأداء التشغيلي. كما أن استخدام النماذج التنبؤية المعتمدة على تقنيات التعلم الآلي في تحليل الأداء التشغيلي للموانئ ما زال محدودًا نسبيًا، خاصة في الموانئ الإقليمية التي تفتقر إلى دراسات تطبيقية تعتمد على بيانات تشغيلية فعلية.

وفي هذا الإطار، تمثل محطة حاويات ميناء عدن (ACT) أحد المراكز اللوجستية المهمة في المنطقة، إلا أن تحسين كفاءة تشغيلها يتطلب فهمًا أعمق للعوامل المؤثرة في إنتاجيتها التشغيلية، وتحليل سلوك مؤشرات الأداء المختلفة عبر الزمن، إضافة إلى تقييم أثر تطبيق نظام تشغيل المحطات على مستوى الأداء. وعلى الرغم من توفر بيانات تشغيلية تاريخية للمحطة، إلا أن الاستفادة منها في بناء نماذج تنبؤية تدعم اتخاذ القرار ما تزال محدودة.

٤. أهمية البحث:

أ. الأهمية العلمية:

تنبع الأهمية العلمية لهذه الدراسة من كونها تسهم في إثراء الأدبيات العلمية في مجال إدارة وتشغيل الموانئ واللوجستيات البحرية من خلال توظيف تقنيات التعلم الآلي، وبخاصة آلات المتجهات الداعمة (SVM)، في تحليل مؤشرات الأداء التشغيلية لمحطات الحاويات وبناء نماذج تنبؤية لإنتاجيتها. وتقدم الدراسة إطارًا تحليليًا يجمع بين الأساليب الكمية الحديثة وتحليل المؤشرات التشغيلية في بيئة الموانئ، الأمر الذي يوسع من نطاق استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في الدراسات اللوجستية والمينائية. كما تسهم الدراسة في سد فجوة معرفية في الأدبيات العربية المتعلقة بتطبيق نماذج التعلم الآلي في تحليل أداء محطات الحاويات، خاصة في موانئ الدول النامية، وذلك من خلال تقديم نموذج تطبيقي يعتمد على بيانات تشغيلية فعلية لمحطة حاويات ميناء عدن. إضافة إلى ذلك، توفر الدراسة أساسًا علميًا يمكن أن تستند إليه الدراسات المستقبلية في تطوير نماذج تنبؤية أكثر تقدمًا لتحليل ديناميكيات الأداء التشغيلي للموانئ.

ب. الأهمية التطبيقية:

تتمثل الأهمية التطبيقية للدراسة في تقديم نموذج تنبؤي يمكن أن يسهم في دعم اتخاذ القرار في إدارة محطة حاويات ميناء عدن من خلال تحليل العوامل المؤثرة في الإنتاجية التشغيلية وتوقع اتجاهات مؤشرات الأداء المختلفة. إذ يمكن الاستفادة من نتائج النموذج في تحسين التخطيط التشغيلي للمحطة، وتعزيز كفاءة إدارة الموارد البشرية والمعدات، وتحسين جدولة العمليات المينائية بما يتوافق مع التقلبات الموسمية في حركة التجارة البحرية. كما تساعد النتائج في تحديد المؤشرات التشغيلية الأكثر تأثيرًا في أداء المحطة، مما يمكّن الإدارة من توجيه جهود التطوير نحو المجالات ذات الأولوية. ومن ناحية أخرى، يمكن أن تسهم الدراسة في دعم جهود التحول الرقمي في الموانئ من خلال إبراز دور أنظمة تشغيل المحطات (TOS) وتقنيات التحليل التنبؤي في تحسين الكفاءة التشغيلية وتقليل الاختناقات التشغيلية، بما يعزز القدرة التنافسية لمحطة حاويات ميناء عدن ضمن شبكة الموانئ الإقليمية والدولية.

٥. أهداف البحث:

يهدف البحث إلى تطوير نموذج تنبؤي لإنتاجية محطة حاويات ميناء عدن (ACT) بالاعتماد على تقنية آلات المتجهات الداعمة (Support Vector Machines – SVM)، وذلك لتحليل سلوك مؤشرات الأداء التشغيلية للمحطة وتقدير اتجاهاتها المستقبلية في ضوء العوامل الزمنية والموسمية وتطبيق نظام تشغيل المحطات (TOS)، بما يسهم في دعم عمليات التخطيط التشغيلي والاستراتيجي وتعزيز كفاءة إدارة الموارد داخل المحطة.

وينبثق عن الهدف الرئيس مجموعة من الأهداف الفرعية تتمثل فيما يلي:

١) بناء نموذج تنبؤي باستخدام آلات المتجهات الداعمة (SVM) لتقدير إنتاجية محطة حاويات ميناء عدن وتحليل سلوك المؤشرات التشغيلية الرئيسة عبر الزمن، بما يشمل عدد الحاويات المعالجة، وعدد السفن الزائرة، وإنتاجية الأرصفة، ومعدل إشغال الأرصفة، ووقت دوران السفن، ووقت التخليص الجمركي، ورضا العملاء، وتكلفة مناولة الحاويات.

٢) تحديد المتغيرات التشغيلية الأكثر تأثيراً في أداء محطة الحاويات من خلال تحليل الأهمية النسبية للمتغيرات المستقلة داخل النموذج التنبؤي.
٣) تقديم مجموعة من التوصيات التطبيقية المستندة إلى نتائج النموذج التنبؤي بهدف دعم اتخاذ القرار في إدارة محطة حاويات ميناء عدن، وتحسين كفاءة التخطيط التشغيلي، وتعزيز القدرة على التنبؤ بالتغيرات في الأداء اللوجستي للمحطة.

٦. منهجية البحث:

اعتمدت الدراسة الحالية على آلات المتجهات الداعمة (Support Vector Machines – SVM) بوصفها إحدى تقنيات التعلم الآلي الإشرافي القادرة على نمذجة العلاقات غير الخطية المعقدة بين المتغيرات، وذلك بهدف بناء نموذج تنبؤي لإنتاجية محطة حاويات ميناء عدن (ACT) اعتمادًا على تحليل المؤشرات التشغيلية. وتستند هذه التقنية إلى إيجاد المستوى الفائق الأمثل الذي يفصل بين البيانات بأكبر هامش ممكن، بما يضمن قدرة عالية على التعميم عند التعامل مع البيانات غير المرئية. وفي إطار تطبيقها على مشكلات الانحدار، تُعرف هذه التقنية باسم آلات المتجهات الداعمة للانحدار (SVR)، حيث تسعى إلى تقدير دالة تنبؤية تحقق أفضل توافق ممكن مع القيم الفعلية مع الحفاظ على بساطة النموذج وتقليل احتمالات التجاوز في التعلم. وقد تم اختيار هذه المنهجية نظرًا لقدرتها على التعامل مع البيانات محدودة الحجم نسبيًا، وفعاليتها في تحليل البيانات عالية الأبعاد، إضافة إلى قدرتها على التقاط العلاقات غير الخطية بين المتغيرات التشغيلية المختلفة التي تؤثر في أداء محطات الحاويات.

وفي ضوء ذلك، تم تطبيق نموذج آلات المتجهات الداعمة للانحدار باستخدام بيئة التحليل الإحصائي Rمن خلال حزمة e1071، حيث تم بناء نماذج تنبؤية لعدد من مؤشرات الأداء التشغيلية لمحطة الحاويات. واعتمد النموذج على مجموعة من المتغيرات المستقلة المرتبطة بالبنية الزمنية للبيانات، شملت المؤشر الزمني الذي يعكس التسلسل الزمني للملاحظات، والمتغير الموسمي الذي يميز بين النصف الأول والثاني من السنة، إضافة إلى متغير يمثل فترة ما قبل وما بعد تطبيق نظام تشغيل المحطات TOS. كما تم اختيار دالة النواة الشعاعية (RBF)بوصفها دالة النواة المستخدمة في النموذج، لما تتميز به من قدرة عالية على تمثيل العلاقات غير الخطية بين المتغيرات دون الحاجة إلى افتراضات مسبقة حول طبيعة هذه العلاقات. وقد تم ضبط معاملات النموذج الأساسية، حيث تم تعيين معامل التكلفة Cعند القيمة (١) لتحقيق توازن مناسب بين دقة النموذج وقدرته على التعميم، بينما تم تحديد معامل النواة γعند القيمة (٠.١) لضمان تأثير متوسط لنقاط التدريب في عملية التنبؤ.

وقبل إدخال البيانات إلى النموذج، تم إجراء عملية توحيد قياسي (Standardization) للمتغيرات المستقلة، وذلك لتحويل القيم بحيث يصبح متوسطها صفراً وانحرافها المعياري واحداً، بهدف ضمان مساهمة جميع المتغيرات بدرجة متقاربة في عملية حساب المسافات داخل نموذج SVM ، ومنع هيمنة المتغيرات ذات النطاقات الأكبر على عملية التعلم. كما تم تقسيم بيانات الدراسة إلى مجموعة تدريب ومجموعة اختبار بنسبة ٨٠% إلى ٢٠ %وفق تسلسل زمني يحافظ على الطبيعة الزمنية للبيانات، حيث استُخدمت البيانات الأولى للتدريب وبقية البيانات لاختبار قدرة النموذج على التنبؤ. ويُعد هذا الأسلوب مناسبًا لتحليل السلاسل الزمنية لأنه يحاكي السيناريو الواقعي للتنبؤ المستقبلي بالمتغيرات التشغيلية.

وبعد الانتهاء من تدريب النماذج، تم استخدام النموذج المدرب لإنتاج التنبؤات الخاصة بمجموعة الاختبار، ثم جرى إعادة تحويل القيم المتنبأ بها إلى المقياس الأصلي للمتغيرات من خلال عملية إلغاء التطبيع. كما تم تطبيق مجموعة من القيود المنطقية على التنبؤات لضمان واقعيتها واتساقها مع الحدود التشغيلية الفعلية للمؤشرات المدروسة. وأخيرًا، تم تقييم أداء النموذج التنبؤي باستخدام عدد من المقاييس الإحصائية المعتمدة في دراسات التنبؤ، وهي معامل التحديد(R^2) ، وجذر متوسط مربع الخطأ (RMSE)، ومتوسط الخطأ المطلق (MAE)، وذلك بهدف قياس دقة النموذج وقدرته التنبؤية وتوفير أساس موضوعي لمقارنة نتائج النموذج مع الأساليب الأخرى المستخدمة في الدراسة.

٧. الدراسة التحليلية:

- **نتائج آلات المتجهات الداعمة على بيانات الدراسة SVM Results**

أظهرت نتائج تطبيق نماذج آلات المتجهات الداعمة على بيانات محطة حاويات ميناء عدن تبايناً ملحوظاً في الأداء عبر المتغيرات التابعة الثمانية، مما يعكس اختلاف طبيعة العلاقات بين المتغيرات المستقلة وكل مؤشر من مؤشرات الأداء اللوجستي. حققت نماذج SVM أداءً متميزاً في التنبؤ بوقت التخليص الجمركي، حيث بلغ معامل التحديد R^2 قيمة ٠.٨٩١، وهو أعلى معامل تحديد تم تحقيقه عبر جميع المتغيرات باستخدام هذه التقنية. يشير هذا الأداء الاستثنائي إلى أن نموذج SVM استطاع التقاط العلاقة المعقدة بين المتغيرات المستقلة المؤشر الزمني، والموسمية، وتطبيق نظام (TOS) ووقت التخليص الجمركي بدقة عالية، مما يؤكد قدرة دالة النواة الشعاعية على نمذجة الأنماط غير الخطية في هذا المتغير. يعزى هذا الأداء المتفوق جزئياً إلى التأثير المباشر والملموس لنظام TOS على عمليات التخليص الجمركي من خلال الربط الإلكتروني والأتمتة، مما خلق علاقة واضحة ومستقرة يمكن للنموذج تعلمها بفعالية (Notteboom & Rodrigue, 2008).

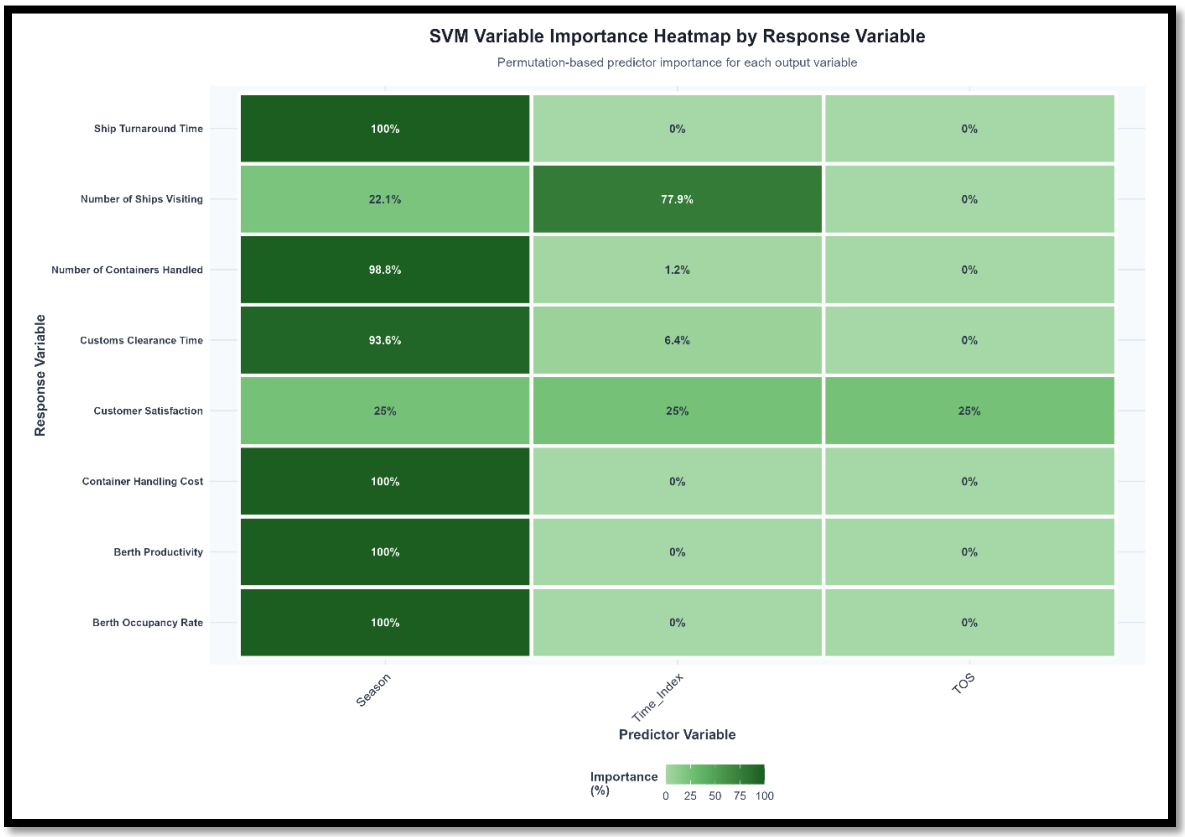
جاء رضا العملاء في المرتبة الثانية من حيث دقة التنبؤ بمعامل تحديد R^2 بلغ ٠.٦٦٠، مما يعكس قدرة النموذج على تفسير ٦٦% من التباين في هذا المتغير. يعد هذا إنجازاً مهماً نظراً لأن رضا العملاء يتأثر بعوامل متعددة ومعقدة، بعضها قابل للقياس والبعض الآخر نوعي أو سلوكي. استطاع نموذج SVM بناء دالة قرار معقدة تربط بين التحسينات التشغيلية التي جلبها نظام TOS والتصورات الإيجابية للعملاء حول مستوى الخدمة المقدمة. حقق نموذج التنبؤ بتكلفة مناولة الحاويات معامل تحديد R^2 قدره ٠.٤٣٩، وهو أداء متوسط يعكس التعقيد الكامن في نمذجة التكاليف التشغيلية التي تتأثر بعوامل اقتصادية متعددة تتجاوز نطاق المتغيرات المستقلة المتاحة في النموذج، مثل أسعار الوقود وتكاليف العمالة والاستثمارات الرأسمالية.

أما إنتاجية الرصيف فقد حققت معامل تحديد R^2 بلغ ٠.٤٠٥، وهو مستوى أداء معقول يشير إلى أن النموذج استطاع التقاط جزء كبير من التباين في هذا المؤشر الحيوي. تعد إنتاجية الرصيف من المتغيرات الأكثر تأثراً بالعوامل التشغيلية اليومية مثل نوعية المعدات وكفاءة العمالة وحالة الطقس، وهي عوامل لم تكن متضمنة بشكل مباشر في النموذج (Dragovic et al., 2006). بالنسبة لعدد الحاويات المعالجة، حقق النموذج معامل تحديد R^2 قدره ٠.٣٠١، مما يعني أن ٣٠.١% من التباين في هذا المتغير يمكن تفسيره بالمتغيرات المستقلة المستخدمة. يعكس هذا الأداء المتواضع نسبياً حقيقة أن حجم الحاويات المعالجة يتأثر بشكل كبير بالطلب الخارجي والظروف الاقتصادية الإقليمية والعالمية التي تتجاوز نطاق تأثير نظام TOS المباشر.

جدول (١): أهمية المتغيرات في كل النماذج طبقا لآلات المتجهات الداعمة

Response Variable	Predictor	Importance Raw	Importance Percentage	Importance SD
Number of Containers Handled	Time_Index	0.000	1.180	0.001
Number of Containers Handled	Season	0.004	98.820	0.006
Number of Containers Handled	TOS	0.000	0.000	0.000
Number of Ships Visiting	Time_Index	0.001	77.870	0.001
Number of Ships Visiting	Season	0.000	22.130	0.002
Number of Ships Visiting	TOS	0.000	0.000	0.000
Berth Productivity	Time_Index	0.000	0.000	0.000
Berth Productivity	Season	0.001	100.000	0.001
Berth Productivity	TOS	0.000	0.000	0.000
Berth Occupancy Rate	Time_Index	-0.002	0.000	0.001
Berth Occupancy Rate	Season	0.006	100.000	0.017
Berth Occupancy Rate	TOS	0.000	0.000	0.000

Response Variable	Predictor	Importance Raw	Importance Percentage	Importance SD
Ship Turnaround Time	Time_Index	0.000	0.000	0.001
Ship Turnaround Time	Season	0.000	100.000	0.001
Ship Turnaround Time	TOS	0.000	0.000	0.000
Customs Clearance Time	Time_Index	0.000	6.420	0.001
Customs Clearance Time	Season	0.005	93.580	0.007
Customs Clearance Time	TOS	0.000	0.000	0.000
Customer Satisfaction	Time_Index	-0.001	25.000	0.000
Customer Satisfaction	Season	0.000	25.000	0.000
Customer Satisfaction	TOS	0.000	25.000	0.000
Container Handling Cost	Time_Index	0.000	0.000	0.000
Container Handling Cost	Season	0.000	100.000	0.000
Container Handling Cost	TOS	0.000	0.000	0.000



شكل (١): الخريطة الحرارية لأهمية المتغيرات طبقا لنموذج SVM.

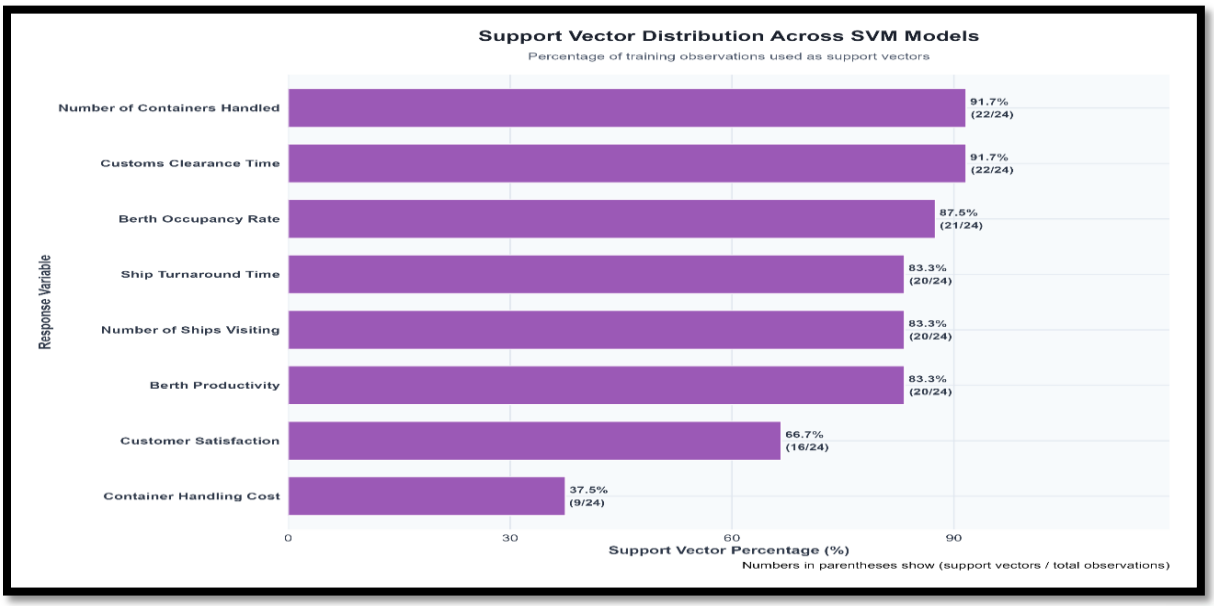
سجل معدل إشغال الرصيف معامل تحديد R^2 بلغ ٠.٢٢٠، وهو أداء منخفض نسبياً يشير إلى محدودية قدرة المتغيرات المستقلة على تفسير التباين في هذا المؤشر. يعزى ذلك إلى أن معدل الإشغال يعتمد بشكل كبير على جدولة السفن وتوقيتات وصولها، وهي عوامل تتأثر بظروف خارجية مثل الأحوال الجوية البحرية والازدحام في الموانئ الأخرى على طول طريق الملاحة. أما عدد السفن الزائرة فقد حقق معامل تحديد R^2 قدره ٠.١٤٢، وهو أدنى أداء بين جميع المتغيرات، مما يعكس أن أعداد السفن تتحدد بعوامل السوق وخطوط الملاحة العالمية والقرارات الإستراتيجية لشركات الشحن أكثر من تأثرها بالتحسينات التشغيلية الداخلية للميناء (Lam & Yap, 2011). وأخيراً، سجل وقت دوران السفن معامل تحديد R^2 بلغ ٠.٠٩١ فقط، وهو أضعف أداء على الإطلاق، مما يشير إلى أن هذا المتغير يتطلب متغيرات تفسيرية إضافية أو نماذج أكثر تعقيداً لالتقاط ديناميكياته بدقة.

من منظور أهمية المتغيرات المستقلة في التنبؤ، كشفت نتائج تحليل الأهمية النسبية للمتغيرات أن العامل الموسمي (Season) كان المتغير الأكثر تأثيراً عبر معظم النماذج، حيث بلغ متوسط أهميته النسبية ٧٩.٩% عبر جميع المتغيرات التابعة الثمانية. يعكس هذا الدور المحوري للموسمية التأثير القوي للدورات السنوية في حركة التجارة البحرية والتي ترتبط بمواسم الحصاد والأعياد وفترات الذروة التجارية. في العديد من النماذج، وخاصة تلك المتعلقة بوقت دوران السفن، وإنتاجية الرصيف، ومعدل إشغال الرصيف، وتكلفة مناولة الحاويات، بلغت أهمية المتغير الموسمي ١٠٠%، مما يعني أنه كان العامل الوحيد ذو التأثير الملموس في هذه

النماذج. هذه النتيجة تتفق مع الأدبيات التي تشير إلى أن الأنماط الموسمية تشكل محركاً رئيسياً للتقلبات في الأداء اللوجستي للموانئ.

جاء المؤشر الزمني (Time_Index) في المرتبة الثانية من حيث الأهمية بمتوسط ١٣.٨%، مما يشير إلى وجود اتجاه زمني عام في البيانات يعكس التغيرات التدريجية في الأداء عبر فترة الدراسة. كان تأثير المؤشر الزمني أكثر وضوحاً في متغيرات مثل عدد الحاويات المعالجة (حيث بلغت أهميته ١.٢%) وعدد السفن الزائرة (٧٧.٩%)، مما يعكس الاتجاهات طويلة المدى في نمو أو انكماش حركة الميناء. أما متغير TOS فقد سجل متوسط أهمية منخفض جداً بلغ ٣.١% عبر جميع النماذج، وكانت أهميته صفراً في معظم المتغيرات التابعة. هذه النتيجة المفاجئة قد تبدو متناقضة مع الفرضية الأساسية للدراسة حول تأثير نظام TOS على الأداء، لكنها في الواقع تعكس طبيعة نماذج آلات المتجهات الداعمة التي تعتمد على قياس التباين في البيانات. نظراً لأن متغير TOS هو متغير ثنائي (٠ أو ١) يتغير مرة واحدة فقط خلال فترة الدراسة، فإن قدرته على تفسير التباين محدودة مقارنة بالمتغيرات المستمرة مثل الموسمية والمؤشر الزمني. ومع ذلك، يظل لمتغير TOSتأثير هيكلي على مستوى النموذج ككل من خلال تفاعله مع المتغيرات الأخرى (Vapnik, 2000).

كشف تحليل توزيع المتجهات الداعمة (Support Vectors) عبر النماذج المختلفة عن أنماط مثيرة للاهتمام تتعلق بتعقيد كل نموذج وطبيعة البيانات. بلغت نسبة المتجهات الداعمة أعلى مستوياتها في نموذجي عدد الحاويات المعالجة ووقت التخليص الجمركي، حيث استخدم كل منهما ٩١.٧% من ملاحظات التدريب كمتجهات داعمة (٢٢ من أصل ٢٤ ملاحظة). يشير هذا العدد الكبير من المتجهات الداعمة إلى أن العلاقة بين المدخلات والمخرجات في هذه النماذج معقدة وغير منتظمة، مما يتطلب من النموذج الاعتماد على معظم نقاط التدريب لبناء دالة القرار. في المقابل، استخدم نموذج تكلفة مناولة الحاويات ٣٧.٥% فقط من الملاحظات كمتجهات داعمة (٩ من أصل ٢٤)، مما يشير إلى علاقة أكثر بساطة وانتظاماً يمكن تمثيلها بعدد أقل من نقاط الدعم. تتراوح نسبة المتجهات الداعمة في باقي النماذج بين ٦٦.٧% و٨٧.٥%، وهي نسب معتدلة تعكس توازناً معقولاً بين تعقيد النموذج وقدرته على التعميم (Bengio, 2009).



شكل (٢): نسبة توزيع آلات المتجهات الداعمة لكل متغير.

من الناحية التطبيقية، تكشف هذه النتائج عن عدة رؤى مهمة لإدارة محطة حاويات ميناء عدن. أولاً، يظهر التأثير القوي للعوامل الموسمية أهمية التخطيط الاستراتيجي للموارد بما يتناسب مع التقلبات الموسمية المتوقعة، مما يتطلب مرونة في جدولة العمالة والمعدات. ثانياً، يشير الأداء المتفوق للنموذج في التنبؤ بوقت التخليص الجمركي إلى إمكانية استخدام نماذج SVM كأداة تخطيط عملية لتوقع الاختناقات في هذه العملية واتخاذ إجراءات استباقية (Chen & Lu, 2012). ثالثاً، تسلط النتائج الضوء على ضرورة إدماج متغيرات إضافية في النماذج المستقبلية لتحسين دقة التنبؤ بالمتغيرات ذات الأداء المنخفض، مثل بيانات عن حركة التجارة العالمية، وأسعار الشحن، وقرارات شركات الملاحة.

٨. النتائج:

أظهرت نتائج تطبيق نماذج آلات المتجهات الداعمة (SVM) على بيانات محطة حاويات ميناء عدن تباينًا واضحًا في مستوى الأداء التنبؤي عبر المتغيرات التابعة المختلفة، الأمر الذي يعكس اختلاف طبيعة العلاقات بين المتغيرات المستقلة المستخدمة في النموذج وكل مؤشر من مؤشرات الأداء اللوجستي محل الدراسة. فقد حقق النموذج أفضل أداء في التنبؤ بوقت التخليص الجمركي، حيث بلغ معامل التحديد($R^2 = 0.891$) ، وهو أعلى مستوى دقة تحقق بين جميع المتغيرات باستخدام هذه التقنية. ويشير هذا المستوى المرتفع من القدرة التفسيرية إلى أن نموذج SVM استطاع التقاط العلاقة المعقدة بين المتغيرات المستقلة المتمثلة في المؤشر الزمني، والموسمية، ومتغير تطبيق نظام تشغيل المحطات TOSوبين زمن التخليص الجمركي بدرجة عالية من الدقة. ويمكن تفسير هذا الأداء المتميز بكون نظام TOSيؤثر بشكل مباشر في إجراءات التخليص الجمركي من خلال الأتمتة والربط الإلكتروني بين الجهات المعنية، الأمر الذي يؤدي إلى نمط واضح ومستقر في البيانات يمكن للنموذج تعلمه بفاعلية.

كما أظهرت النتائج قدرة جيدة للنموذج في تفسير رضا العملاء، حيث بلغ معامل التحديد($R^2 = 0.660$) ، وهو ما يعني أن النموذج استطاع تفسير نحو ٦٦% من التباين في هذا المتغير. وتعد هذه النتيجة ذات أهمية خاصة بالنظر إلى أن رضا العملاء يتأثر بعوامل متعددة ومتداخلة، بعضها تشغيلي قابل للقياس وبعضها الآخر يتعلق بعوامل إدراكية وسلوكية. ويشير ذلك إلى أن نموذج SVM استطاع الربط بين التحسينات التشغيلية الناتجة عن تطبيق نظام TOSوبين التصورات الإيجابية للعملاء حول جودة الخدمات المقدمة في محطة الحاويات. أما فيما يتعلق بتكلفة مناولة الحاويات فقد حقق النموذج معامل تحديد بلغ($R^2 = 0.439$) ، وهو مستوى أداء متوسط يعكس تعقيد نمذجة التكاليف التشغيلية التي تتأثر بعوامل اقتصادية خارجية متعددة مثل أسعار الوقود وتكاليف العمالة والاستثمارات الرأسمالية، وهي عوامل لم تكن ضمن المتغيرات المستقلة المستخدمة في النموذج.

وفيما يتعلق بالمؤشرات التشغيلية المرتبطة بأداء الأرصفة، فقد سجلت إنتاجية الرصيف معامل تحديد بلغ ($R^2 = 0.405$)، وهو مستوى أداء معقول يشير إلى أن النموذج تمكن من تفسير جزء معتبر من التباين في هذا المؤشر الحيوي. ويعزى ذلك إلى أن إنتاجية الرصيف تتأثر بدرجة كبيرة بعوامل تشغيلية يومية مثل كفاءة المعدات ومستوى مهارة العمالة وظروف الطقس، وهي عوامل لم يتم إدراجها بشكل مباشر ضمن المتغيرات التفسيرية للنموذج. أما عدد الحاويات المعالجة فقد سجل معامل تحديد قدره($R^2 = 0.301$) ، وهو ما يعني أن نحو ٣٠.١% من التباين في هذا المتغير يمكن تفسيره من خلال المتغيرات المستقلة المستخدمة في الدراسة.

ويعكس هذا الأداء المحدود نسبياً حقيقة أن حجم المناولة في الموانئ يعتمد بدرجة كبيرة على الطلب الخارجي وحركة التجارة الإقليمية والعالمية، وهي عوامل تتجاوز نطاق تأثير التحسينات التشغيلية الداخلية المرتبطة بتطبيق نظام تشغيل المحطات.

من ناحية أخرى، أظهرت النتائج مستويات أداء أقل في بعض المؤشرات الأخرى، حيث بلغ معامل التحديد لمتغير معدل إشغال الرصيف (R^2 = 0.220)، وهو ما يشير إلى محدودية قدرة المتغيرات المستقلة على تفسير التغيرات في هذا المؤشر. ويرتبط ذلك بكون معدل الإشغال يعتمد بدرجة كبيرة على جداول وصول السفن وتوقيتاتها، وهي عوامل تتأثر بظروف خارجية مثل الأحوال الجوية البحرية والازدحام في الموانئ الأخرى على خطوط الملاحة الدولية. كما حقق عدد السفن الزائرة معامل تحديد بلغ(R^2 = 0.142) ، وهو أداء منخفض نسبياً يعكس أن حركة السفن تتحدد أساساً بعوامل السوق العالمية وقرارات شركات الشحن وخطوط الملاحة الدولية أكثر من تأثرها بالتحسينات التشغيلية الداخلية للميناء. أما وقت دوران السفن فقد سجل أضعف أداء بين جميع المتغيرات حيث بلغ معامل التحديد(R^2 = 0.091) ، مما يشير إلى أن هذا المتغير يتطلب إدراج متغيرات تفسيرية إضافية أو استخدام نماذج أكثر تعقيدًا لالتقاط ديناميكياته التشغيلية بدقة أكبر.
ومن منظور تحليل أهمية المتغيرات المستقلة في النماذج التنبؤية، كشفت النتائج أن العامل الموسمي (Season) كان المتغير الأكثر تأثيرًا في معظم النماذج، حيث بلغ متوسط أهميته النسبية نحو 79.9%عبر المتغيرات التابعة الثمانية. ويعكس ذلك التأثير القوي للدورات الموسمية في حركة التجارة البحرية والتي ترتبط بمواسم الإنتاج الزراعي وفترات الذروة التجارية والأعياد العالمية. ففي عدد من النماذج، مثل نماذج إنتاجية الرصيف ومعدل إشغال الرصيف ووقت دوران السفن وتكلفة مناولة الحاويات، بلغت أهمية العامل الموسمي 100%، مما يدل على أنه كان العامل الأكثر تأثيرًا في تفسير التغيرات في هذه المؤشرات. وجاء المؤشر الزمني (Time Index) في المرتبة الثانية من حيث الأهمية بمتوسط بلغ 13.8%، وهو ما يشير إلى وجود اتجاه زمني عام في البيانات يعكس التغيرات التدريجية في أداء الميناء عبر فترة الدراسة. وقد ظهر تأثير هذا المتغير بصورة أوضح في متغير عدد السفن الزائرة حيث بلغت أهميته 77.9%، الأمر الذي يعكس الاتجاهات طويلة الأجل في نمو أو تراجع حركة الملاحة البحرية.

أما متغير تطبيق نظام تشغيل المحطات (TOS) فقد سجل متوسط أهمية منخفض نسبياً بلغ 3.1%عبر جميع النماذج، وكانت قيمته صفراً في معظم المتغيرات التابعة. وعلى الرغم من أن هذه النتيجة قد تبدو غير متوافقة مع فرضية الدراسة المتعلقة بتأثير النظام على الأداء التشغيلي، إلا أنها تعكس طبيعة نماذج آلات المتجهات الداعمة التي تعتمد على قياس التباين في البيانات. وبما أن متغير TOSيمثل متغيرًا ثنائيًا يتغير مرة واحدة فقط خلال فترة الدراسة، فإن قدرته على تفسير التباين تكون محدودة مقارنة بالمتغيرات المستمرة مثل الموسمية والمؤشر الزمني، إلا أن تأثيره يظل قائمًا على المستوى الهيكلي للنموذج من خلال تفاعله مع المتغيرات الأخرى.

كما أظهر تحليل توزيع المتجهات الداعمة (Support Vectors) اختلافًا ملحوظًا في درجة تعقيد النماذج عبر المتغيرات المختلفة. فقد بلغت نسبة المتجهات الداعمة أعلى مستوياتها في نموذجي عدد الحاويات المعالجة ووقت التخليص الجمركي حيث استخدم كل منهما نحو 91.7% من ملاحظات التدريب كمتجهات داعمة، مما يدل على أن العلاقة بين المدخلات والمخرجات في هذه النماذج تتسم بدرجة عالية من التعقيد وعدم الانتظام.

وفي المقابل، استخدم نموذج تكلفة مناولة الحاويات نحو 37.5% فقط من ملاحظات التدريب كمتجهات داعمة، وهو ما يشير إلى أن العلاقة بين المتغيرات في هذا النموذج أكثر بساطة ويمكن تمثيلها بعدد أقل من نقاط الدعم. أما بقية النماذج فقد تراوحت نسبة المتجهات الداعمة فيها بين 66.7% و٨٧.٥%، وهي نسب معتدلة تعكس توازناً مقبولاً بين تعقيد النموذج وقدرته على التعميم.

وعلى المستوى التطبيقي، تقدم هذه النتائج مجموعة من الدلالات المهمة لإدارة محطة حاويات ميناء عدن. فمن جهة، يؤكد التأثير القوي للعوامل الموسمية أهمية اعتماد تخطيط تشغيلي مرن يأخذ في الاعتبار التقلبات الموسمية في حركة التجارة البحرية، بما يشمل جدولة العمالة والمعدات وفقًا لفترات الذروة والانخفاض في الطلب. ومن جهة أخرى، يشير الأداء المرتفع للنموذج في التنبؤ بوقت التخليص الجمركي إلى إمكانية استخدام نماذج SVM كأداة عملية لدعم التخطيط التشغيلي والتنبؤ بالاختناقات المحتملة في هذه العملية واتخاذ إجراءات استباقية لمعالجتها. كما تشير النتائج إلى أهمية توسيع نطاق المتغيرات المستخدمة في النماذج المستقبلية من خلال إدراج عوامل إضافية مثل مؤشرات التجارة العالمية وأسعار الشحن وقرارات شركات الملاحة، الأمر الذي من شأنه تحسين دقة النماذج التنبؤية وتعزيز قدرتها على تفسير التغيرات في مؤشرات الأداء التشغيلية لمحطات الحاويات.

٩. التوصيات:

في ضوء نتائج تطبيق نموذج آلات المتجهات الداعمة (SVM) على بيانات محطة حاويات ميناء عدن، وما أظهرته النتائج من تفاوت في القدرة التنبؤية للنموذج عبر مؤشرات الأداء التشغيلية المختلفة، يمكن صياغة مجموعة من التوصيات العملية والعلمية التي تسهم في تحسين الأداء التشغيلي للمحطة وتعزيز فعالية استخدام النماذج التنبؤية في دعم اتخاذ القرار، وذلك على النحو الآتي:

أولاً: ضرورة تعزيز توظيف النماذج التنبؤية القائمة على تقنيات التعلم الآلي في إدارة العمليات التشغيلية بالميناء، وخاصة في المجالات التي أظهرت فيها النماذج قدرة تنبؤية مرتفعة مثل وقت التخليص الجمركي .إذ يمكن استخدام نماذج SVM كأداة داعمة للتخطيط التشغيلي والتنبؤ المبكر بفترات الاختناق في عمليات التخليص، بما يسمح لإدارة الميناء والجهات الجمركية باتخاذ إجراءات استباقية لتحسين سرعة إنجاز المعاملات وتقليل زمن بقاء الحاويات داخل الميناء.

ثانياً: ضرورة الاستفادة من الأنماط الموسمية في التخطيط التشغيلي للمحطة، حيث أظهرت النتائج أن العامل الموسمي يمثل المتغير الأكثر تأثيراً في معظم مؤشرات الأداء. ويستدعي ذلك اعتماد استراتيجيات تشغيل مرنة تعتمد على التنبؤ بفترات الذروة والانخفاض في حركة الحاويات والسفن، بما يشمل تحسين جدولة العمالة، وتوزيع المعدات، وتخطيط استخدام الأرصفة بما يتناسب مع التقلبات الموسمية في حركة التجارة البحرية.

ثالثاً: توصي الدراسة بضرورة تعزيز التكامل الرقمي لأنظمة تشغيل المحطات (TOS) مع الأنظمة الحكومية واللوجستية الأخرى، مثل أنظمة الجمارك وخدمات النقل البري والبحري، بما يسهم في تعظيم الأثر الإيجابي للنظام على العمليات التشغيلية. وعلى الرغم من أن متغير TOS لم يظهر أهمية مرتفعة في تفسير التباين الإحصائي في النماذج، إلا أن تأثيره الهيكلي يظهر من خلال تحسين الكفاءة التشغيلية وتسهيل تدفق المعلومات بين الجهات المعنية.

رابعاً: توصي الدراسة بضرورة توسيع قاعدة البيانات التشغيلية المستخدمة في النماذج التنبؤية من خلال إدراج متغيرات إضافية أكثر ارتباطاً بديناميكيات عمل الموانئ، مثل بيانات حركة التجارة العالمية، وأسعار الشحن البحري، وحركة خطوط الملاحة، وكفاءة المعدات التشغيلية، وحالة الطقس البحرية، ومستويات الطلب الإقليمي على خدمات الميناء. ومن المتوقع أن يسهم إدراج هذه المتغيرات في تحسين القدرة التفسيرية للنماذج التنبؤية، خاصة بالنسبة للمتغيرات التي أظهرت مستويات دقة منخفضة مثل عدد السفن الزائرة ووقت دوران السفن.

خامساً: توصي الدراسة بضرورة تطبيق نماذج تنبؤية متعددة ومقارنتها عند تحليل مؤشرات الأداء اللوجستي للموانئ، مثل نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية ونماذج الانحدار المتقدمة ونماذج السلاسل الزمنية، وذلك بهدف تحديد النموذج الأكثر ملاءمة لطبيعة البيانات التشغيلية في محطات الحاويات.

وأخيراً: توصي الدراسة بضرورة تعزيز استخدام النماذج التنبؤية في دعم اتخاذ القرار الاستراتيجي في إدارة الموانئ، وذلك من خلال دمج نتائج التحليلات التنبؤية في عمليات التخطيط طويل الأجل للبنية التحتية المينائية وتخصيص الموارد، بما يسهم في رفع كفاءة الأداء التشغيلي لمحطة حاويات ميناء عدن وتعزيز قدرتها التنافسية في شبكة النقل البحري الإقليمية والدولية.

المراجع:

- بن عيفان, نبيل عبد الله and ,محمود السيد البواب. "أثر تطبيق متطلبات التحول الرقمي في إدارة وتطوير الموانئ البحرية وتعزيز تنافسيتها دراسة حالة على محطة عدن للحاويات – الجمهورية اليمنية AIN ". Journal 48, no. 2 (July 1, 2024). https://doi.org/10.59660/48713.

- Chargui, K., Zouadi, T., El Fallahi, A., Reghioui, M. and Aouam, T., 2021, A quay crane productivity predictive model for building accurate quay crane schedules. In Supply Chain Forum: An International Journal (Vol. 22, No. 2, pp. 136-156). Taylor & Francis. https://doi.org/10.1080/16258312.2020.1831889

- Chhetri, P., Nguyen, S., Gekara, V. and Sharma, S., 2025. Container dwell time predictive modelling: an application of ML algorithms. Maritime Policy & Management, pp.1-31. https://doi.org/10.1080/03088839.2025.2501010

- Dragovic, B., Park, N. K., & Radmilovic, Z. (2006). Ship-berth link performance evaluation: Simulation and analytical approaches. Maritime Policy & Management, 33(3), 281-299.

- Hervás-Peralta, M., Poveda-Reyes, S., Molero, G.D., Santarremigia, F.E. and Pastor-Ferrando, J.P., 2019. Improving the performance of dry and maritime ports by increasing knowledge about the most relevant functionalities of the Terminal Operating System (TOS). Sustainability, 11(6), p.1648. https://doi.org/10.3390/su11061648

- Jamal, A., Sarno, R. and Ginardi, H., 2017. Analyzing the benefit of implementing integrated dgps and terminal operating system at yard terminal Surabaya. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 95(4), pp.948-959. https://scholar.its.ac.id/en/publications/analyzing-the-benefit-of-implementing-integrated-dgps-and-termina

- Kim, B., Kim, G. and Kang, M., 2022. Study on comparing the performance of fully automated container terminals during the COVID-19 pandemic. Sustainability, 14(15), p.9415. https://doi.org/10.3390/su14159415

- Notteboom, T. E., & Rodrigue, J. P. (2008). Containerisation, box logistics and global supply chains: The integration of ports and liner shipping networks. Maritime Economics & Logistics, 10(1-2), 152-174.

- Notteboom, T. E., & Rodrigue, J. P. (2009). The future of containerization: Perspectives from maritime and inland freight distribution. GeoJournal, 74(1), 7-22.

- Novaes Mathias, T., Inutsuka, H., Shinoda, T. and Sugimura, Y., 2024. Operational performance evaluation of a container terminal using data mining and simulation. Asian Transport Studies, 10. https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2024.100127

- Shiraishi, D., Shibasaki, R., Zhang, W. and Elhan, Y.M., 2025. Digital Port Integration and Terminal Efficiency: Evidence from Vessel, Truck, and Container Turnaround Times in Japanese Container Terminals. https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5843762

- Vapnik, V. N. (2000). The nature of statistical learning theory (2nd ed.). Springer.

- Weerasinghe, Buddhi A., H. Niles Perera, and Xiwen Bai. 2024. "Optimizing container terminal operations: a systematic review of operations research applications." Maritime Economics & Logistics 26, no. 2. 307-341. https://doi.org/10.1057/s41278-023-00254-0