نحو أول ميناء سالب الكربون في العالم: رؤية مناخية تطبيقية في ميناء جدة الإسلامي و ميناء الملك عبد العزيز بالدمام

باحث دكتوراه/ سعود بن طماح العنيني

نائب الرئيس لعمليات الموانئ الساحل الغربي ميناء جدة الإسلامي، المملكة العربية السعودية.

الأستاذ الدكتور/ محمد علي إبراهيم

مستشار وزير النقل ومدير فرع الأكاديمية العربية للعلوم والتكنولوجيا والنقل البحري ببورسعيد – سابقاً مستشار رئيس الأكاديمية للنقل الدولي و اللوجستيات.

الدكتور/ سعود بن هذال الصهيبي

مدير إدارة المناطق اللوجستية بميناء الملك عبدالعزيز بالدمام. المملكة العربية السعودية.

المستخلص:

في ظل التحولات المناخية العالمية المتسارعة، يطرح هذا البحث رؤية تطبيقية متقدمة لتطوير نموذج "الميناء السالب للانبعاثات الكربونية (Negative Emission Port)"، متجاوزًا مفهوم الحياد الكربوني التقليدي نحو مرحلة أكثر طموحًا تقوم على إزالة الانبعاثات لا مجرد تقليلها. ويركّز البحث على ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز بالدمام كنموذجي تجريبي لهذا التحول، وذلك من خلال إطار منهجي وصفي اعتمد على مراجعة الأدبيات العلمية العالمية، وتحليل نماذج رائدة مثل موانئ روتردام، هامبورغ، ومشروع نيوم، بالإضافة إلى إجراء التحليل الرباعي (SWOT) لتقييم الجاهزية البيئية والتشغيلية للميناءين. كما استند البحث إلى مشاورات مهنية مع خبراء في مجالات البيئة والطاقة وتخطيط البنى التحتية، بما أفضى إلى صياغة خارطة طريق استراتيجية قابلة للتنفيذ، تتضمن مراحل تدريجية للتحول، ودراسة الجدوى التقنية والاقتصادية، ومؤشرات أداء بيئي واضحة. ويُعد هذا البحث إسهامًا علميًا وتطبيقيًا رائدًا يُعيد تعريف دور الموانئ في سياق الاستجابة المناخية، ويعزّز

من مكانة المملكة العربية السعودية كقوة لوجستية خضراء متقدمة ضمن مستهدفات رؤية ٢٠٣٠ ومبادرة السعودية الخضراء.

الكلمات الدالة: ميناء سالب الكربون، ميناء جدة الإسلامي، ميناء الملك عبد العزيز بالدمام، المملكة العربية السعودية.

Towards the World's First Carbon-Negative Port: A Practical Climate Vision at Jeddah Islamic Port and King Abdulaziz Port in Dammam

Abstract:

Amid the accelerating global climate shifts, this research presents an advanced applied vision for developing a "Negative Emission Port" model—surpassing the traditional concept of carbon neutrality by aiming not only to reduce emissions but to actively remove them. The study focuses on King Abdulaziz Port in Dammam and Jeddah Islamic Port as experimental models for this transformative shift. It adopts a descriptive methodological framework, drawing upon an in-depth review of global scientific literature and the analysis of pioneering port models such as Rotterdam, Hamburg, and the NEOM project. Additionally, a SWOT analysis was conducted to assess the environmental and operational readiness of the two ports. The research also integrated expert consultations in environmental engineering, energy, and infrastructure planning, leading to the development of an actionable strategic roadmap. This roadmap outlines phased transition stages, evaluates technical and economic feasibility, and proposes clear environmental performance indicators. As

such, the study constitutes a pioneering scientific and practical contribution that redefines the role of ports in climate response efforts and strengthens Saudi Arabia's position as a leading green logistics hub aligned with Vision 2030 and the Saudi Green Initiative.

Keywords: Negative Emission Port, Jeddah Islamic Port, King Abdulaziz Port in Dammam,
Saudi Arabia.

١. المقدمة:

في ظل التغيرات التي تُهدد استقرار الأنظمة البيئية والاقتصادية عالميًا، أصبح من الضروري إعادة تعريف دور البنية التحتية الصناعية، وعلى رأسها الموانئ البحرية، التي تُعد من أكثر القطاعات إنتاجًا للانبعاثات الكربونية بسبب كثافة العمليات التشغيلية، وحركة السفن، والنقل البري المساند، والاستهلاك الكبير للطاقة. هذا الواقع يفرض تحديًا مزدوجًا يتمثل في تحقيق الكفاءة التشغيلية مع الحفاظ على المعايير البيئية، وهو ما يضع الموانئ في موقع محوري ضمن منظومة التحول الأخضر العالمي (UNCTAD, 2023).

وفي هذا السياق، لم تعد الحلول التقليدية التي تركز على "خفض الانبعاثات" أو "التحول التدريجي نحو الطاقة المتجددة" كافية لتحقيق الأهداف المناخية المعلنة في اتفاق باريس للمناخ، وخطط الاستدامة الوطنية في العديد من الدول. فهذه الحلول، رغم أهميتها، غالبًا ما تواجه قيودًا في التأثير الزمني والتقني، خصوصًا في بيئات صناعية معقدة كالتي تشهدها الموانئ. بل أصبح التوجه العالمي اليوم يتجه نحو نماذج تحولية أكثر طموحًا تقوم على تحقيق "الانبعاثات السالبة"، أي إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي بصورة تفوق ما تنتجه المنشأة من انبعاثات. وتستلزم هذه النماذج اعتماد تقنيات مبتكرة مثل احتجاز الكربون وتخزينه (CCS)، أو تحويل الموانئ إلى نظم بيئية متكاملة تعتمد على الطاقة المتجددة بشكل كلي، إلى جانب

تحسين كفاءة البنى التحتية اللوجستية من خلال الرقمنة والذكاء الاصطناعي (Carbon Cure Technologies. 2023; Saudi Vision, 2021).

وفي ضوء هذا التحول، ومع التوجه الاستراتيجي الطموح للمملكة العربية السعودية المتمثل في رؤية ٢٠٣٠، تبرز فرصة فريدة لتحويل ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز بمدينة الدمام؛ إلى أول مينائين سالب للانبعاثات في العالم. ويستند هذا التوجه إلى عناصر دعم قوية، تشمل: الموقع الجغرافي الاستراتيجي للمينائين الذي يجعلهما بوابة رئيسية للتجارة بين آسيا وأوروبا، وتوفر موارد الطاقة الشمسية والرياح التي تتيح إمكانية تغذية المنشآت بالطاقة المتجددة، إلى جانب الدعم الحكومي الكبير لمبادرات الاقتصاد الدائري والكربون الصفري. كما أن التقدم الملحوظ في البنية التحتية الرقمية، ونمو مشاريع الهيدروجين الأخضر في المملكة، يمثلان حاضنة مثالية لتكامل الحلول البيئية مع العمليات التشغيلية (Saudi Logistics Strategy. 2022).

وفي ضوء هذا التحول، ومع التوجه الاستراتيجي الطموح للمملكة العربية السعودية المتمثل في رؤية ٢٠٣٠، تبرز فرصة فريدة لتحويل ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبد العزيز بمدينة الدمام إلى أول ميناء سالب للانبعاثات في العالم. ويُعد هذا المشروع الطموح امتدادًا طبيعيًا لرؤية المملكة في تحقيق اقتصاد متنوع ومستدام، ويُجسد في الوقت ذاته التزامها المتزايد تجاه القضايا البيئية والمناخية على المستويين الإقليمي والدولي. ويستند هذا التوجه إلى مجموعة من عناصر الدعم القوية، التي تُهيئ البيئة الملائمة لهذا التحول النوعي. في مقدمتها، الالتزام الوطني المتجدد تجاه الاستدامة البيئية، والذي يتجلى من خلال مبادرات كبرى مثل "السعودية الخضراء" و"الشرق الأوسط الأخضر"، واللتين تهدفان إلى تقليل الانبعاثات الكربونية، وزيادة الغطاء النباتي، وتحفيز الابتكار في التقنيات النظيفة. كما أن التوجه نحو تنويع الاقتصاد، وبناء قطاع لوجستي تنافسي على المستوى العالمي، يمنح الموانئ السعودية ـ وعلى رأسها ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبد العزيز ـ دورًا محوريًا في قيادة هذا التحول. فالميناء يُعد حلقة مركزية في سلاسل الإمداد الإقليمية والعالمية، ويمتلك

من المؤهلات ما يجعله منصة لتجريب وتطبيق حلول خضراء مبتكرة (Saudi Vision, 2021).

إضافة إلى ذلك، فإن توفر بنية تحتية مينائية مرنة وقابلة للتحديث يفتح الباب أمام تبني نظم تشغيلية ذكية وموفرة للطاقة، دون الحاجة إلى إعادة هيكلة جذرية مكلفة. وهذا يعزز من فرص دمج تقنيات الاستشعار والتحكم البيئي، والمراقبة الدقيقة لانبعاثات الكربون، في منظومة العمل اليومية بالميناء (Green Marine, 2023). وأخيرًا، يحظى هذا التوجه بدعم حكومي وتشريعي متزايد، يعزز من فرص نجاح برامج التحول البيئي والرقمي. فقد أصبح هناك وعي مؤسسي متنامٍ بأهمية التحول إلى اقتصاد منخفض الكربون، يقابله تسهيل في الإجراءات، وتحديث في السياسات، وتوفير حوافز للاستثمار في الحلول المستدامة. وهو ما يضع المملكة في موقع الريادة في مجال البنية التحتية المينائية الخضراء على مستوى المنطقة والعالم (Global Green Freight Action Plan, 2021).

ولعل الأهم من ذلك أن الميناء، بوصفه مركزًا لوجستيًا حيويًا، يمتلك القدرة على التحول إلى نموذج يحتذى به إقليميًا وعالميًا، ليس فقط في تقليل الانبعاثات، بل في خلق منظومة ذكية ومستدامة للنقل البحري والبري تعتمد على التكامل بين التقنية والبيئة. وهذا يتطلب تبني نهج تشاركي بين الجهات الحكومية، والقطاع الخاص، والمؤسسات البحثية، لتطوير سياسات متكاملة تضمن تحقيق الأهداف البيئية دون الإخلال بكفاءة سلسلة التوريد أو التنافسية الاقتصادية للميناء.

لقد تبنّت العديد من الموانئ العالمية خلال العقدين الماضيين مفهوم "الميناء الأخضر"، والذي يقوم على تقليل التأثيرات البيئية السلبية الناتجة عن الأنشطة المينائية، من خلال خفض الانبعاثات، وتحسين كفاءة الطاقة، والتحول إلى مصادر طاقة متجددة، بالإضافة إلى إدارة النفايات والمخلفات البحرية بطرق مستدامة. وقد شكل هذا المفهوم خطوة مهمة في إدماج البُعد البيئي ضمن السياسات التشغيلية

للموانئ، ما أسهم في خفض البصمة الكربونية للعديد من المرافق الساحلية حول العالم (Van den Berg, & de Langen, 2020).

غير أن التحولات المناخية المتسارعة، والتزامات الدول بالوصول إلى الحياد الكربوني، أظهرت محدودية هذا النموذج التقليدي في تحقيق الأهداف المناخية الطموحة. ومن هنا ظهر مفهوم "الميناء السالب للانبعاثات"، بوصفه نقلة نوعية تتجاوز مجرد تقليل الانبعاثات، لتصل إلى تحقيق أثر بيئي إيجابي من خلال إزالة كمية من الكربون تعادل أو تفوق ما يتم إنتاجه. وهذا يتطلب تبني تقنيات متقدمة، مثل التقاط الكربون وتثبيته، وزراعة أنظمة بيئية بحرية كحاضنات طبيعية للكربون، واستخدام مواد بناء ماصة للانبعاثات، إلى جانب الإدارة الرقمية الذكية للموارد والانبعاثات (Wang, et al., 2021).

ويُعد التمييز بين المفهومين جوهريًا لفهم مدى عمق التحول المطلوب في البنية التحتية المينائية. فبينما يُركز "الميناء الأخضر" على التخفيف، يهدف "الميناء السالب" إلى الانعكاس البيئي الإيجابي، ما يجعله أكثر انسجامًا مع متطلبات المرحلة المقبلة من العمل المناخي العالمي، وخاصة في الدول الساعية إلى الريادة في هذا المجال مثل المملكة العربية السعودية.

الفجوة البحثية والإضافة العلمية:

على الرغم من التقدم الملحوظ في تبني ممارسات الموانئ الخضراء، إلا أن الأدبيات الحالية تشير إلى غياب تطبيق عملي فعلي لميناء يعمل وفق مفهوم الانبعاثات السالبة بشكل وظيفي ومنهجي .تتوقف معظم المبادرات عند مفهوم "التخفيض" دون التطرق إلى التعويض الفعلي أو الامتصاص النشط للكربون. تشير دراسة حديثة إلى أن الموانئ تحتاج إلى تبني استراتيجيات أكثر شمولاً تتضمن تقنيات امتصاص الكربون وتخزينه، بالإضافة إلى استخدام مصادر الطاقة المتجددة بشكل موسع لتحقيق أهداف الانبعاثات السالبة .

وبالتالي، يُشكل هذا البحث إضافة علمية نوعية لسد هذه الفجوة وتقديم نموذج قابل للتطبيق والتوسع، يهدف إلى تحويل ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز إلى أول مينائين سالب للانبعاثات الكربونية باستخدام حلول مبتكرة قابلة للتطبيق في السياق البيئي والتشغيلي السعودي.

٢. **مشكلة البحث**:

في الوقت الذي يشهد فيه العالم تناميًا ملحوظًا في المبادرات البيئية، وتزايدًا في الوعي بأهمية تقليل الانبعاثات الكربونية ضمن الأنشطة الاقتصادية، لا تزال الموانئ البحرية تُصنّف ضمن أكبر مصادر انبعاثات الغازات الدفيئة على مستوى القطاعات اللوجستية والبنى التحتية. وتشير تقديرات المنظمة البحرية الدولية (IMO2023) إلى أن النقل البحري يساهم بأكثر من ٢.٩% من إجمالي الانبعاثات العالمية من غاز ثاني أكسيد الكربون، وهو رقم مرشح للزيادة في ظل النمو المستمر في التجارة البحرية.

ورغم تعدد المبادرات التي وُصفت بـ"الخضراء" في الموانئ العالمية، إلا أن غالبية هذه المبادرات تظل محصورة في تقنيات تقليدية تهدف إلى تقليل الضرر البيئي دون تغييره جذريًا، مثل استخدام الطاقة الشمسية، كهربة الرافعات، أو ترشيد الاستهلاك. كما أن معظم هذه المبادرات تعاني من محدودية النطاق، وعدم تكامل الحلول البيئية داخل منظومة التشغيل الكلي للميناء.

في هذا السياق؛ لم يتم حتى اليوم تسجيل أي نموذج لميناء يعمل بانبعاث سلبي فعلي (Negative Emission Port)، أي أن كمية ثاني أكسيد الكربون التي يتم امتصاصها وتثبيتها أو الاستفادة منها تفوق كمية الانبعاثات الناتجة عن عمليات الميناء مجتمعة (Mdpi Energies. 2023). وتعود هذه الفجوة إلى عدة أسباب:

- تعقيد دمج تقنيات امتصاص الكربون داخل البنية التشغيلية للميناء.
- افتقار البنية التحتية إلى قابلية التحديث البيئي العميق.
- غياب الأطر التشريعية والتنظيمية التي تلزم المشغلين باعتماد تقنيات الانبعاث السالب.

- التكلفة الأولية المرتفعة لبعض التقنيات مثل مزارع الطحالب، الخرسانة الماصة للكربون، وخلايا الوقود الحيوي.

وتتمثل إشكالية هذا البحث في غياب نموذج تطبيقي متكامل لميناء سالب للانبعاثات الكربونية، سواء على المستوى الإقليمي أو العالمي، بالإضافة إلى عدم وجود إطار علمي واضح يوضح كيف يمكن لميناء تقليدي، ضمن بيئة تشغيلية كثيفة كالميناء السعودي، أن يتحول إلى منشأة ذات أثر بيئي إيجابي.

يوجد تساؤل رئيسي للدراسة الحالية وهو؛ هل يمكن تحويل ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز إلى أول مينائين سالب للانبعاثات الكربونية في العالم من خلال دمج حلول مبتكرة قابلة للتطبيق بيئيًا وتشغيليًا في السياق السعودي؟. وينبثق من السؤال الرئيسي عدة تساؤلات فرعية وهي:

١) ما هي أبرز التقنيات البيئية القادرة على تحقيق الانبعاث السالب في بيئة الموانئ؟
٢) ما مدى جاهزية البنية التحتية في ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبد العزيز لاستيعاب هذا التحول؟
٣) ما التحديات الفنية والتشريعية والاقتصادية التي قد تعيق تنفيذ هذا النموذج؟
٤) كيف يمكن بناء خارطة طريق واقعية ومستدامة تضمن استمرارية التأثير البيئي الإيجابي على المدى الطويل؟

٣. أهداف البحث:

يهدف هذا البحث إلى إرساء أساس علمي وعملي لتحويل ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبد العزيز بالدمام إلى أول نموذجين عالميين لموانئ سالبة للانبعاثات الكربونية، من خلال تحقيق مجموعة من الأهداف المرحلية والاستراتيجية التي تتكامل فيما بينها لتشكيل خارطة طريق واقعية وقابلة للتطبيق. ويأتي هذا التوجه في ظل التزامات المملكة البيئية ضمن رؤية ٢٠٣٠، وتوجهها نحو بناء اقتصاد دائري مستدام يدعم الابتكار البيئي في البنى التحتية الحيوية.

ينطلق الهدف الأول من الحاجة إلى بناء إطار مفاهيمي وتطبيقي متكامل لتحول الموانئ إلى منشآت سالبة الكربون، وهو إطار يجمع بين البعد النظري المتعلق بأحدث

الاتجاهات العلمية في خفض الكربون وإزالته، والبعد العملي المتعلق بتطبيقات واقعية يمكن تفعيلها في بيئة تشغيلية كالموانئ. يشمل هذا الإطار الجوانب التشغيلية، والتقنية، والتشريعية، والبيئية، مع مراعاة خصوصيات السياق السعودي من حيث المناخ، البنية التحتية، وأولويات التنمية المستدامة. ويركز الإطار على إعادة تعريف دور الميناء من مجرد تقليل الانبعاثات إلى فاعل بيئي نشط يسهم في امتصاص الكربون ومعالجة أثره المناخي (AI for Earth – Microsoft, 2022).

وتعزيزًا لهذا التوجه، يسعى الهدف الثاني إلى تحليل وتقييم تقنيات الانبعاث السالب القابلة للتطبيق في البيئة البحرية السعودية، من خلال دراسة مجموعة مختارة من التقنيات البيئية المتقدمة التي أثبتت فعاليتها عالميًا، مثل مزارع الطحالب الدقيقة، والخرسانة الذكية الماصة للكربون، وخلايا الوقود الحيوي الميكروبية، وأنظمة الذكاء الاصطناعي لإدارة الانبعاثات. وسيتم في هذا الإطار تقييم مدى ملاءمة هذه التقنيات لظروف ميناء الدمام وجدة من حيث الجوانب الاقتصادية (التكلفة والعائد)، والفنية (سهولة التركيب والتشغيل)، واللوجستية (التكامل مع البنية التحتية الحالية)، مع الأخذ في الاعتبار الطبيعة المناخية والبيئية الخاصة بالبيئة البحرية السعودية. ويُعد هذا التحليل خطوة محورية لضمان اختيار حلول فعالة وقابلة للتطبيق الفعلي، تمهيدًا للانتقال إلى مراحل الاختبار والتوسعة.

٤. منهجية البحث:

يسعى البحث إلى تحليل نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات المرتبطة بتحويل ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز إلى موانئ سالب الكربون، وذلك باستخدام منهجية SWOT المعتمدة عالميًا. لذلك يصنف البحث الحالي كونه بحثًا وصفيًا.

٥. الإطار النظري للدراسة:

لقد تبنّت العديد من الموانئ العالمية خلال العقدين الماضيين مفهوم "الميناء الأخضر" (Van den Berg, & de Langen, 2020) ، والذي يقوم على:

- استخدام الطاقة المتجددة (كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح)،

- كهربة الرافعات والمعدات التشغيلية،
- تحسين كفاءة العمليات اللوجستية،
- إدخال أنظمة مراقبة بيئية رقمية.

إلا أن هذه المبادرات، رغم أهميتها وتراكم نتائجها الإيجابية على المدى المتوسط، لا تتعدى كونها محاولات لخفض الضرر البيئي أو إبطائه، ولا تصل إلى المرحلة التي يصبح فيها الميناء فاعلًا إيجابيًا في امتصاص الكربون وتحقيق أثر مناخي عكسي. فهي تظل ضمن إطار "التخفيف" وليس "المعالجة"، إذ تسعى لتقليل البصمة الكربونية دون القدرة على قلب المعادلة البيئية لصالح النظام المناخي العالمي. وفي ظل التحديات المتزايدة المرتبطة بارتفاع درجات الحرارة، وازدياد التلوث البحري والجوي، لم يعد كافيًا أن تلتزم الموانئ بعدم الإضرار، بل بات من الضروري أن تتحول إلى منصات نشطة في امتصاص الكربون، وإعادة التوازن البيئي، من خلال حلول متقدمة تتجاوز التخفيض التقليدي، وتُرسّخ لمفهوم "الانبعاثات السالبة" كمبدأ تشغيل أساسي (CDP, 2023). هنا يظهر مفهوم "الميناء السالب" International Maritime Organization , 2023)، وهو نموذج متقدم يسعى إلى:

- امتصاص ثاني أكسيد الكربون من الهواء والماء المحيط؛
- تثبيت الكربون في البنية المادية للميناء (مثل استخدام الخرسانة الماصة للكربون)؛
- استخدام تقنيات حيوية متقدمة كـ مزارع الطحالب وخلايا الوقود الميكروبية (Logan, et al., 2019)؛ دمج الذكاء الاصطناعي والرقمنة في إدارة الانبعاثات واتخاذ قرارات بيئية ذكية في الوقت الفعلي.

وفي هذا الإطار، تسعى هذه الدراسة إلى تقديم رؤية مناخية تطبيقية لتحويل كل من ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبد العزيز بالدمام إلى موانئ سالبة الكربون، من خلال تحليل ممكنات التحول البيئي، واستعراض النماذج العالمية الرائدة، واقتراح خارطة طريق تتكامل فيها الأبعاد التقنية والتشغيلية والتنظيمية. وتطمح الدراسة إلى أن تسهم في وضع أُسس علمية وعملية تجعل من الموانئ السعودية نماذج مرجعية في

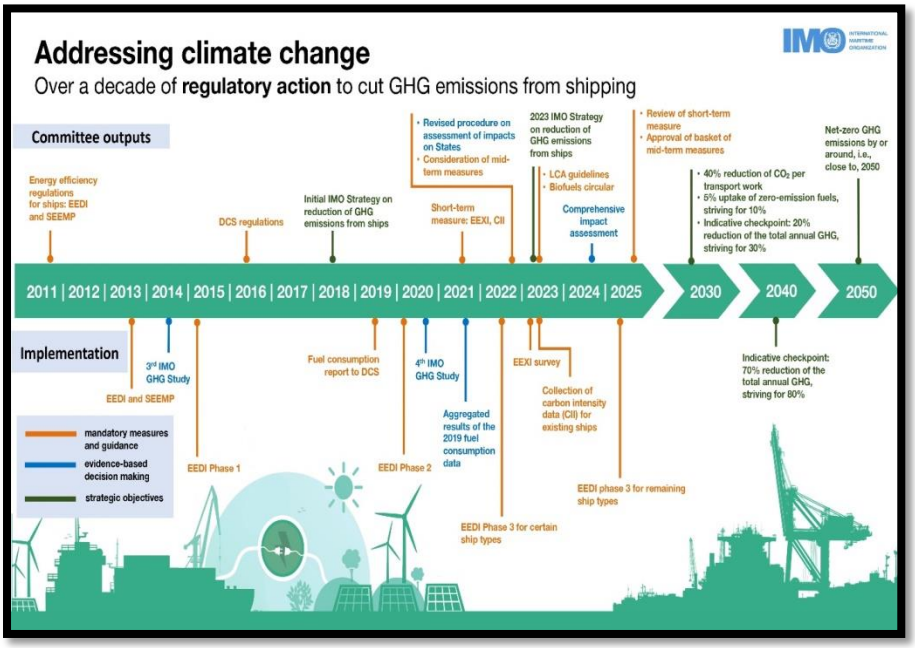
مجال الحياد الكربوني، بما يعزز مكانتها في سلاسل الإمداد المستدامة، ويُجسد التزام المملكة بأهداف التنمية المستدامة والتحول نحو الاقتصاد الأخضر (Saudi Logistics Strategy. 2022).

في المملكة العربية السعودية، يُعد ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز بالدمام من أهم الموانئ من حيث الموقع الاستراتيجي وحجم العمليات التجارية، لكنه لا يزال، كغيره من الموانئ الإقليمية، يعمل وفق نموذج تقليدي بيئيًا، رغم وجود جهود نحو التحول الرقمي والتحسين التشغيلي. إلا أن الفرصة مواتية لإحداث تحول جذري يجمع بين:

- الاستفادة من الدعم الحكومي لمبادرات الاستدامة (رؤية ٢٠٣٠)؛
- توافر البنية الأساسية القابلة للتطوير؛
- تعدد الشركاء المحليين والدوليين المستعدين للمساهمة فى حلول بيئية رائدة.

من هذا المنطلق، يسعى البحث إلى تأسيس نموذج علمي وعملي متكامل لتحويل ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز إلى أول مينائين سالب للانبعاثات، بما يعزز مكانة المملكة كمركز عالمي لوجستى ذكي ومستدام، ويُحقق تقاطعات استراتيجية بين الأهداف البيئية والاقتصادية، وهو ما يُعد نقلة نوعية في مسار تطوير الموانئ إقليميًا وعالميًا (OECD/ITF. 2022).

يعرض الشكل التالي رقم (١) خارطة زمنية توضح أكثر من عقد من الإجراءات التنظيمية التي اتخذتها المنظمة البحرية الدولية (IMO) بهدف خفض انبعاثات الغازات الدفيئة (GHG) الناتجة عن قطاع الشحن البحري، وذلك في سياق مواجهة التغير المناخي. تنقسم الجهود إلى مخرجات لجان وتنفيذ فعلي، وتشمل هذه الجهود إصدار لوائح إلزامية، وأدلة إرشادية، ودراسات تحليلية، ومراجعات دورية للسياسات. بدأت هذه الإجراءات منذ عام ٢٠١١ بإطلاق مؤشر كفاءة الطاقة للتصميم (EEDI)وخطط إدارة كفاءة الطاقة للسفن(SEEMP) ، وتواصلت مع مرور السنوات لتشمل إطلاق لوائح تقارير استهلاك الوقود، والتوسع في استخدام أدوات مثل مؤشر كفاءة الطاقة للسفن القائمة (EEXI) ومؤشر كثافة الكربون.(CII)



الشكل التالي رقم (١) خارطة زمنية توضح أكثر من عقد من الإجراءات التنظيمية التي اتخذتها المنظمة البحرية الدولية (IMO) .

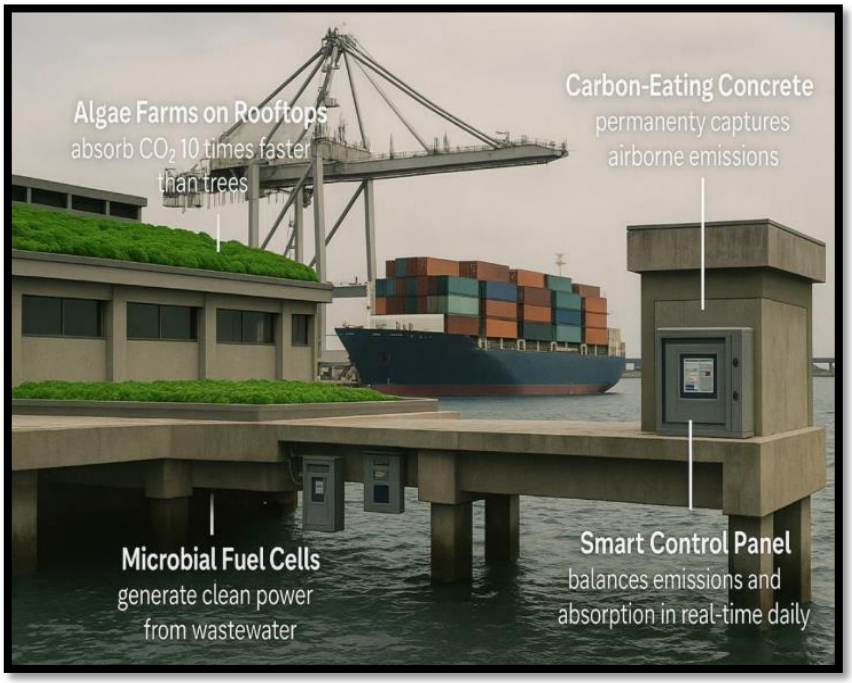
https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx

كما تسلط الصورة الضوء على الرؤية المستقبلية الطموحة للمنظمة، حيث تهدف بحلول عام 2050إلى الوصول إلى صفر انبعاثات صافية من السفن .وتتضمن هذه الخطة مجموعة من المعالم المرحلية، من بينها تقليل كثافة الكربون بنسبة ٤٠% بحلول عام 2030، والسعي إلى خفض إجمالي الانبعاثات بنسبة ٧٠% بحلول 2040، وصولاً إلى الحياد الكربوني الكامل. وتعكس هذه الاستراتيجية تصاعد الضغوط التنظيمية على قطاع النقل البحري، وضرورة تبنّي تقنيات وتقارير حديثة، بالإضافة إلى تعزيز القدرة المؤسسية على اتخاذ قرارات بيئية فعّالة ومدروسة.

٦. نموذج أولي مقترح لإنشاء ميناء سالب الكربون:

في ظل التحديات المناخية المتزايدة الناتجة عن الانبعاثات الصناعية وحركة الشحن البحري، بدأت الموانئ الحديثة في تبنّي حلول مبتكرة تهدف إلى الحد من الأثر البيئي وتحقيق الاستدامة. وتسعى هذه الموانئ إلى تقليل انبعاثات الكربون، وتحسين كفاءة الطاقة، وتعزيز التوازن البيئي باستخدام تقنيات متقدمة صديقة للبيئة .والشكل التالي يوضح تصورًا لميناء مستدام يستخدم مجموعة من الحلول البيئية الذكية التي تدمج بين الطاقة النظيفة، وامتصاص الكربون، والإدارة الذكية للانبعاثات (Carbon Cure Technologies. 2023).

أحد أبرز الحلول الظاهرة في الشكل التالي هو إنشاء مزارع الطحالب على أسطح المباني .تتميز الطحالب بقدرتها الفائقة على امتصاص ثاني أكسيد الكربون من الجو، حيث تشير الدراسات إلى أنها تمتص CO_2 بمعدل أسرع بعشر مرات من الأشجار. هذا يجعلها وسيلة فعالة لتعزيز امتصاص الكربون في المناطق الحضرية، وخاصة في البنية التحتية الساحلية مثل الموانئ، حيث تكون المساحات الخضراء محدودة World Bank. 2021; .(Global Green Freight Action Plan, 2021)



الشكل رقم (٢) نموذج مقترح لميناء سالب الكربون.

بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام الخرسانة الماصة للكربون في بناء الميناء. هذه المادة الخرسانية المتطورة تحتوي على مكونات كيميائية قادرة على التقاط ثاني أكسيد الكربون من الهواء واحتجازه بشكل دائم داخل بنيتها. وبهذا، تتحول البنية التحتية نفسها إلى وسيلة لتقليل الانبعاثات، مما يضيف طبقة جديدة من الحماية البيئية دون الحاجة إلى تغييرات جذرية في طريقة البناء التقليدية.

ومن ناحية أخرى، تُستخدم خلايا الوقود الميكروبية كمصدر لتوليد الطاقة النظيفة من مياه الصرف. تعتمد هذه التقنية على البكتيريا التي تقوم بتحليل المواد العضوية الموجودة في المياه العادمة، وتنتج طاقة كهربائية أثناء العملية. وبذلك يتم تحويل النفايات إلى طاقة بطريقة بيئية وآمنه، مما يقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري ويوفر مصدرًا محليًا مستدامًا للطاقة.

أما العنصر الرابع في هذا النظام المتكامل فهو لوحة التحكم الذكية، والتي تقوم بمراقبة توازن الانبعاثات وامتصاص الكربون في الوقت الحقيقي. هذه اللوحة مزوّدة بأجهزة استشعار وذكاء صناعي يتيح لها جمع وتحليل البيانات البيئية بشكل لحظي، ومن ثم تعديل العمليات التشغيلية للميناء بما يتوافق مع الأهداف المناخية. هذا النظام يعزز من قدرة الميناء على التفاعل السريع مع التغيرات البيئية، ويضمن التزامه بالمعايير الدولية للانبعاثات. يرتكز النموذج المقترح على الجمع بين أحدث الابتكارات البيئية والهندسية، والتي تشمل:

- مزارع الطحالب الصناعية الدقيقة (Microalgae Biofarms): والتي تُستخدم كأداة حيوية فعالة في امتصاص ثاني أكسيد الكربون من الهواء والماء، وتحويله إلى كتلة حيوية قابلة للاستخدام في إنتاج الوقود الحيوي أو المنتجات الصناعية.
- الخرسانة الماصة للكربون (Carbon-absorbing concrete): وهي تقنية متقدمة في مواد البناء، تُمكّن البنية التحتية للميناء من امتصاص وتثبيت CO_2 ضمن تركيبها الكيميائي على مدى زمني طويل.
- خلايا الوقود الميكروبية (Microbial Fuel Cells): والتي تتيح معالجة النفايات العضوية من العمليات المينائية وتحويلها إلى طاقة كهربائية مستدامة، دون انبعاثات كربونية.
- أنظمة إدارة ذكية للانبعاثات (Smart Emission Dashboards): قائمة على تقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء، تعمل على المراقبة اللحظية للانبعاثات واتخاذ قرارات بيئية تنبؤية لتحسين كفاءة الأداء البيئي.

٧. دور الميناء السالب الكربون في تعزيز الامتثال لمتطلبات المنظمة البحرية الدولية: نموذج تكاملي في إدارة الانبعاثات التموينية:

مع تصاعد الضغوط الدولية للحد من انبعاثات السفن، أصدرت المنظمة البحرية الدولية (IMO) حزمة من اللوائح الملزمة لشركات الشحن وتموين السفن (Maritime and Port Authority of Singapore, 203)، أبرزها:

- الملحق السادس من اتفاقية ماربول (MARPOL Annex VI) ، والذي يُنظم الانبعاثات الناتجة عن الوقود البحري، ويلزم بخفض نسبة الكبريت إلى ٠.٥٠% اعتبارًا من ٢٠٢٠.
- تطبيق أنظمة Port State Control للتفتيش البيئي، ورصد مخالفة شركات التموين التي تزود السفن بوقود غير مطابق بيئيًا.
- إلزام شركات التموين باستخدام أنظمة قياس دقيقة وتقديم Bunker Delivery Note (BDN)توثق خصائص الوقود.(IMO, 2020)

ضمن هذا السياق، يطرح نموذج الميناء السالب الكربون فرصة استراتيجية لتجاوز الامتثال القانوني نحو التحول المناخي المؤسسي، من خلال أربعة أنظمة تكاملية تتفاعل مباشرة مع متطلبات المنظمة البحرية الدولية (Kamal, and Kutay, 2021):

١) مزارع الطحالب البحرية: تعويض مباشر لانبعاثات الوقود عالي الكبريت. في الوقت الذي لا تزال فيه بعض السفن تموَّن بوقود يحتمل تجاوز مواصفات الكبريت، يمكن لميناء سالب الكربون أن يعوّض محليًا الانبعاثات الناتجة عن هذا الوقود عبر أنظمة الطحالب المثبتة على الهناجر ومباني التموين، بحيث تُمتص كميات CO_2 تعادل أو تفوق ناتج عملية التموين ذاتها (IMO. 2023).

المواءمة التنظيمية: يتماشى ذلك مع مبدأ الانبعاثات الصافية الصفرية المحلية الذي تشجّع عليه المنظمة البحرية في خطتها الاستراتيجية لخفض الانبعاثات بنسبة ٧٠% بحلول ٢٠٥٠.

٢) الخرسانة الذكية الماصة للكربون: بنية تحتية تخزن الكربون الناتج عن التموين. توفر الخرسانة الماصة للكربون وسيلة غير مباشرة وفعالة لتعويض انبعاثات قطاع التموين، من خلال إنشاء أرصفة التموين وساحات الوقوف بمواد تثبت ثاني أكسيد الكربون داخل بنيتها الكيميائية، بما يُحوّل البنية التحتية إلى أداة استيعاب كربوني سلبي دائم (Mdpi Energies. 2023).

المواءمة التنظيمية: يدعم هذا التوجه ما ورد في إرشادات IMO للموانئ المستدامة التي تشجع على بناء بنية تحتية "مرنة مناخيًا" تنسجم مع أهداف خفض الانبعاثات.

٣) خلايا الوقود الميكروبية: تقليل الانبعاثات الناتجة عن النفايات التموينية؛ خلال عمليات التموين، تُنتج السفن وشركات الإمداد نفايات عضوية وزيوت قد تتسرب أو تُصرف في البحر. توفّر خلايا الوقود الميكروبية حلًا مزدوجًا معالجة النفايات العضوية الناتجة عن عمليات التموين، وتوليد كهرباء محلية نظيفة تُستخدم لتشغيل أنظمة الشفط أو أجهزة الاستشعار البيئي في أرصفة التموين (IMO, 2019).

المواءمة التنظيمية: هذا التطبيق ينسجم مع التوصيات الصادرة عن IMO بخصوص إدارة مياه الصرف(Bilge and Sludge) ، ويُقلل من احتمالية مخالفة أنظمة تصريف الملوثات.

٤) أنظمة التحكم الذكية بالانبعاثات: رقابة حية على عمليات التموين عبر أنظمة استشعار متصلة بمنصة رقمية موحدة، يمكن للميناء السالب رصد الانبعاثات الناتجة عن كل عملية تموين بالسفينة، إرسال تنبيهات فورية في حال تجاوز القيم المسموح بها دوليًا، وتوليد تقارير توثيقية تلقائية تدعم الامتثال في حالة التفتيش من الجهات الرقابية البحرية (IMO, 2020).

المواءمة التنظيمية: تتماشى هذه الأنظمة مع إطار IMO لرصد وإبلاغ الانبعاثات (MRV)، والذي يتطلب من الموانئ والسفن الإبلاغ المنتظم والدقيق عن معدلات الاستهلاك والانبعاثات.

النتيجة التكاملية: الميناء كضامن بيئي لا كمجرد منصة تشغيل من خلال دمج هذه الأنظمة الأربعة، لا يصبح الميناء السالب الكربون فقط متوافقًا مع متطلباتIMO ، بل: يمارس دورًا استباقيًا في تقليل وتحييد انبعاثات شركات التموين العاملة بداخله، ويحول الالتزامات التنظيمية إلى فرص للتميز البيئي والابتكار المناخي (Wang, et al., 2021).

٨. الموانئ الخضراء: الرؤية والتطبيقات

شهدت العقود الأخيرة اهتمامًا متزايدًا بمفهوم "الموانئ الخضراء"، مدفوعًا بالضغوط الدولية لتقليل الانبعاثات الكربونية الناتجة عن النشاط البحري واللوجستي، والتزامًا بالأهداف المناخية العالمية مثل اتفاق باريس. وفي هذا السياق، سعت العديد من الموانئ حول العالم إلى تقليل بصمتها البيئية من خلال تبني تقنيات مستدامة وإدماج ممارسات تشغيلية أكثر وعيًا بيئيًا. وقد تنوعت هذه المبادرات بين استخدام مصادر الطاقة المتجددة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وتحسين كفاءة استهلاك الوقود، وتحديث المعدات والآليات لتكون منخفضة أو منعدمة الانبعاثات، إلى جانب تحسين إدارة النفايات والموارد (World Bank. 2021).

فعلى سبيل المثال، يُعد ميناء روتردام (هولندا) من أبرز الموانئ التي تبنت استراتيجيات متقدمة للتحول البيئي، حيث انطلقت منه مشاريع كبرى في مجال الهيدروجين الأخضر، ويُستخدم الذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة حركة السفن وتقليل فترات الانتظار التي تُعد مصدرًا رئيسيًا للانبعاثات. ومع ذلك، ورغم هذا التقدم، لا تشمل هذه الاستراتيجيات حتى الآن تقنيات مفعلة ميدانيًا لامتصاص الكربون أو آليات تعويض حقيقية تُنتج أثراً بيئيًا عكسيًا (Van den Berg, & de Langen, 2020).

أما ميناء هامبورغ (ألمانيا)، فقد قطع شوطًا مهمًا في تنفيذ برامج ذكية لإدارة النفايات البحرية وتطوير نظام رقمي للرصد البيئي، يسمح بتتبع الانبعاثات وتقييم الأداء البيئي بدقة. إلا أن مساهمته لا تزال تندرج ضمن إطار "التقليل التدريجي للانبعاثات"، دون وجود توجه واضح نحو تحقيق الانبعاثات السالبة أو تطوير نظم حيوية نشطة لاحتجاز الكربون من مصادر متعددة (Scholten et al., 2021).

وفي السياق العربي، يُعد مشروع نيوم في المملكة العربية السعودية مثالًا طموحًا على الرؤية المستقبلية لبناء بيئة عمرانية مستدامة، إذ تهدف المدينة الجديدة إلى الاعتماد الكامل على الطاقة المتجددة، وتخطط لإنشاء موانئ بيئية حديثة ترتكز على النقل النظيف والرقمنة. ورغم وضوح الطموحات، فإن النماذج التشغيلية لتلك الموانئ لا تزال قيد التطوير المفاهيمي، ولم تُفعّل فعليًا بعد على مستوى متكامل أو وظيفي يمكن

قياسه بيئيًا
(NEOM Official Portal, 2024).

يتضح أن هذه المبادرات، رغم أهميتها وتقدمها النسبي، لا تتعدى كونها محاولات لخفض الضرر البيئي أو إبطائه، ولا تصل إلى المرحلة التي يصبح فيها الميناء فاعلًا إيجابيًا في امتصاص الكربون وتحقيق أثر مناخي عكسي. فالانتقال من مفهوم "الميناء الأخضر" إلى "الميناء السالب" يتطلب نقلة نوعية على مستوى التخطيط والتشغيل والتقنيات المستخدمة، بما في ذلك اعتماد أنظمة بيئية صناعية نشطة، وتوظيف الذكاء الاصطناعي ليس فقط في تحسين الكفاءة، بل في اتخاذ قرارات بيئية مؤتمتة تدعم تحقيق صافي انبعاثات سالب.

٩. **التحديات التي تواجه تطبيق مفهوم الموانئ الخضراء:**

يواجه العالم تحديات بيئية عديدة في الوقت الحاضر، مثل تغير المناخ واستنزاف الموارد الطبيعية. ومن بين القطاعات التي تسهم في تلويث البيئة هي قطاع الموانئ، حيث تعد عمليات التشغيل والنقل البحري للبضائع من أهم المصادر لانبعاثات الغازات الدفيئة وتلوث الهواء والمياه. وفي ضوء ذلك، تولي العديد من الدول اهتمامًا متزايدًا لتحويل موانئها إلى موانئ خضراء، وهي الموانئ التي تهدف إلى تقليل الأثر البيئي لعملياتها وتحسين استدامتها. تحقيق الهدف من تحويل الموانئ إلى موانئ خضراء يواجه عدة تحديات في جميع أنحاء العالم (World Bank. 2021).. فيما يلي بعض التحديات التي يمكن أن تواجه تطبيق مفهوم الموانئ الخضراء :

- البنية التحتية: تتطلب الموانئ الخضراء تحسين البنية التحتية الحالية لتكون أكثر كفاءة وصديقة للبيئة. يشمل ذلك تحسين الأرصفة والمساحات التخزينية وتوفير مناطق للشحن والتفريغ الخاصة بالبضائع الصديقة للبيئة مثل الطاقة الشمسية.
- التكنولوجيا البيئية: قد تحتاج الموانئ الخضراء إلى استخدام تكنولوجيا جديدة ومتقدمة لتقليل الانبعاثات الضارة وتحسين كفاءة الطاقة. يمكن أن تكون هذه التكنولوجيا مكلفة وتتطلب استثمارات كبيرة لتحقيقها.

- التشريعات واللوائح: قد تحتاج الدول إلى تحديث وتعديل التشريعات واللوائح المتعلقة بالموانئ لدعم تطبيق المفهوم الأخضر. يجب أن تكون هناك سياسات وقوانين تشجع على استخدام التكنولوجيا البيئية وتشجع على التزام الموانئ بمعايير الاستدامة.
- الوعي والتوعية: من أجل تحويل الموانئ إلى موانئ خضراء، يجب تعزيز الوعي والتوعية بين العاملين في الموانئ والشركات المستخدمة للخدمات بالموانئ. يجب توفير التدريب والتثقيف بشأن الممارسات البيئية الصحيحة والفوائد البيئية لتحقيق التزام المشاركين.
- تكلفة التحول: قد تكون تكلفة تحويل الموانئ إلى موانئ خضراء عالية، حيث يتطلب ذلك استثمارات في التكنولوجيا البيئية والبنية التحتية الجديدة. توفير التمويل الملائم لهذه التحولات قد يكون تحديًا إضافيًا.
- التنسيق بين الجهات المعنية: يتطلب تحويل الموانئ إلى موانئ خضراء التنسيق بين العديد من الجهات المعنية، بما في ذلك الحكومة المحلية والسلطات المينائية والشركات المشغلة. يجب توفير آليات التعاون والتنسيق لضمان تنفيذ الخطط الخضراء بشكل فعال.
- التحديات التقنية: قد تواجه الموانئ تحديات تقنية في تطبيق المفهوم الأخضر، مثل تكامل التكنولوجيا البيئية مع الأنظمة الموجودة وضمان أنها تعمل بشكل فعال وموثوق به.
- التغيير في العادات والثقافة: قد يكون هناك تحدي في تغيير العادات والتصورات القائمة لدى العاملين في الموانئ والمستخدمين للخدمات بالموانئ. قد يتطلب ذلك توعية وتثقيف مستمر لتغيير السلوكيات نحو الممارسات البيئية المستدامة.
- المتطلبات القانونية والتنظيمية: يجب أن تلتزم الموانئ بالقوانين واللوائح البيئية المحلية والدولية، وهذا قد يشكل تحديًا في بعض الأحيان، حيث قد يتطلب التغيير التشريعات والتنظيمات الملائمة.

١٠. التحدي في السياق السعودي:

في المملكة العربية السعودية، يُعد كل من ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز بالدمام من أبرز الموانئ المحورية في منظومة النقل البحري والتجارة الدولية، حيث يتمتعان بموقعين استراتيجيين على الخليج العربي والبحر الأحمر على التوالي، مما يمنحهما دورًا حيويًا في ربط المملكة بالأسواق العالمية. ورغم الجهود المتنامية في كلا الميناءين على صعيد التحول الرقمي، وتبني أنظمة تشغيلية أكثر كفاءة، إلا أنهما لا يزالان يعملان ضمن نموذج تقليدي بيئيًا يركز على خفض الانبعاثات دون تحقيق انبعاثات سالبة أو أثر مناخي إيجابي.

ومع تزايد الضغوط الدولية للامتثال للمعايير البيئية، وارتفاع سقف التوقعات تجاه الموانئ كمحركات للتنمية المستدامة، تبرز فرصة استراتيجية فريدة أمام المملكة لتحويل هذين الميناءين إلى نموذجين عالميين للموانئ سالبة الكربون. ويعزز من هذه الفرصة توفر دعم حكومي كبير من خلال رؤية السعودية ٢٠٣٠، التي تضع التحول البيئي والاقتصاد الدائري في صلب خططها، وتفتح المجال أمام التمويل والحوافز والمبادرات النوعية.

كما أن البنية التحتية لكلا الميناءين مرنة وقابلة للتحديث، وهو ما يُتيح دمج تقنيات متقدمة كاحتجاز الكربون، واستخدام مصادر الطاقة المتجددة، وأنظمة النقل الكهربائي، دون الحاجة إلى إعادة بناء المنظومة اللوجستية من الصفر. إلى جانب ذلك، تتمتع المملكة بشبكة واسعة من الشركاء المحليين والدوليين من مؤسسات بحثية، وشركات تكنولوجيا بيئية، ومطورين صناعيين، يمكن تعبئة خبراتهم لتصميم وتنفيذ حلول متكاملة تُحقق أهداف الحياد الكربوني، بل وتتجاوزها إلى تحقيق انبعاثات سالبة فعليًا.

إن التحدي الحقيقي لا يكمن في نقص الموارد أو غياب الرؤية، بل في سرعة تفعيل هذه الإمكانات وتكاملها ضمن استراتيجية تنفيذية طموحة، تُحوّل الموانئ السعودية من مجرد مراكز عبور إلى منصات بيئية فاعلة تُسهم في تحقيق التوازن المناخي العالمي، وتُعزز من مكانة المملكة كقوة لوجستية خضراء في القرن الحادي والعشرين.

١١. التحليل الرباعي(SWOT Analysis)

نقاط القوة (Strengths) :

- بنية تحتية متقدمة ومرنة تقنيًا: يتمتع ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز ببنية تحتية حديثة تشمل أرصفة متعددة الأعماق، ساحات واسعة، ومرافق لوجستية متكاملة. وتتيح هذه البنية إمكانية دمج الأنظمة البيئية الذكية، مثل شبكات الاستشعار البيئي، أنظمة احتجاز الكربون، ومزارع الطحالب الصناعية على الأسطح والمنشآت دون الحاجة إلى إعادة هيكلة جذرية.
- دعم استراتيجي وتشريعي من الحكومة السعودية: يحظى المشروع بتأييد من الجهات العليا، في ظل توجهات المملكة ضمن رؤية ٢٠٣٠، ومبادرات مثل السعودية الخضراء، مما يسهم في إزالة العوائق البيروقراطية وتسريع مراحل التبني والتنفيذ، بالإضافة إلى إمكانية سن تشريعات داعمة لمفهوم "الميناء السالب."
- موقع استراتيجي على الخليج العربي: يُعتبر الميناء البوابة الشرقية للمملكة، ما يجعله محورًا مهمًا في سلاسل الإمداد الإقليمية والدولية. هذا الموقع الجغرافي الفريد يُمكن الاستفادة منه في إنشاء تحالفات لوجستية بيئية مع موانئ خليجية وعالمية ضمن مبادرات الشحن المستدام.
- تراكم خبرة تشغيلية في إدارة الموانئ: يتمتع الميناءين بفرق تشغيلية ذات كفاءة عالية وخبرة طويلة في إدارة عمليات الشحن والتفريغ والمناولة، مما يسهّل تدريب الكوادر الحالية على التقنيات البيئية الجديدة دون الحاجة إلى تغييرات جذرية في الهيكل الوظيفي.

نقاط الضعف (Weaknesses) :

- الاعتماد على مصادر الطاقة الأحفورية: لا يزال معظم استهلاك الطاقة في الميناء يأتي من مصادر تقليدية، كوقود الديزل لتشغيل الرافعات والمعدات الثقيلة، مما يُنتج مستويات مرتفعة من الانبعاثات، ويزيد الحاجة إلى تحول تدريجي مُكلف نحو الطاقة النظيفة.

- ضعف التكامل البيئي الرقمي: تعاني الأنظمة التشغيلية الحالية من نقص في الرقمنة البيئية، مثل غياب نظم المراقبة اللحظية للانبعاثات، أو عدم توفر قواعد بيانات مندمجة لقياس البصمة الكربونية للميناء في الزمن الفعلي، مما يحد من القدرة على اتخاذ قرارات استباقية مبنية على البيانات.
- نقص الكفاءات البيئية والفنية المتخصصة: لا تزال الكفاءات الوطنية المتخصصة في مجالات مثل الهندسة البيئية البحرية، إدارة الكربون، وتطبيقات الذكاء الاصطناعي البيئي محدودة، مما يتطلب برامج تدريبية وتحالفات مع الجامعات ومراكز الأبحاث.

الفرص (Opportunities) :

- مواءمة المشروع مع رؤية السعودية ٢٠٣٠ والاستراتيجية الوطنية للنقل والخدمات اللوجستية: يتماشى المشروع مع الأهداف الوطنية لخفض الانبعاثات، وتنويع الاقتصاد، وتحويل المملكة إلى مركز لوجستي عالمي، ما يعزز فرص اعتماد النموذج كسياسة وطنية وتكراره في موانئ أخرى بالمملكة.
- إمكانية الوصول إلى مصادر تمويل دولية: يمكن الاستفادة من برامج التمويل الأخضر، مثل صندوق المناخ الأخضر(GCF) ، أو مبادرات تمويل الكربون (Carbon Credits)، لدعم تطبيق التقنيات منخفضة الانبعاثات، مما يقلل العبء على الميزانية التشغيلية.
- جذب استثمارات في التقنيات البيئية والاقتصاد الدائري: تحويل الميناء إلى منصة لوجستية خضراء سيفتح المجال أمام شراكات استثمارية مع شركات عالمية في مجالات مثل الوقود الحيوي، الطاقة النظيفة، ومعالجة النفايات الذكية، ما يُسهم في تنمية اقتصادية مستدامة ومولده للوظائف الخضراء.
- تعزيز مكانة المملكة عالميًا في الابتكار المناخي: إن تحقيق ميناء سالب للانبعاثات سيكون سابقة عالمية تُعزز من الدور القيادي للمملكة في المنصات الدولية، مثل مؤتمر الأطراف (COP) ومنتدى الاقتصاد العالمي(WEF) ، ويمكن أن يُستخدم كدراسة حالة مميزة في السياسات المناخية.

التهديدات (Threats) :

- ارتفاع التكاليف الرأسمالية للتقنيات المتقدمة: تُعد تقنيات مثل مزارع الطحالب الصناعية وخلايا الوقود الحيوي مكلفة في مراحل التأسيس، وقد تُشكل تحديًا في حال غياب تمويل خارجي أو دعم حكومي مباشر، مما يتطلب دراسة جدوى دقيقة وإطار حوكمة مرن لتوزيع المخاطر.
- المقاومة الداخلية للتغيير التشغيلي: قد تواجه مبادرات التحول البيئي معارضة من بعض الجهات التشغيلية بسبب التخوف من تعطيل العمليات أو زيادة التعقيد الإداري، ما يتطلب استراتيجية تواصل مؤسسي وتدريج في التطبيق لكسب التأييد.
- عدم كفاية الإطار التنظيمي البيئي البحري: يفتقر النظام البيئي التنظيمي في بعض جوانبه إلى تفاصيل خاصة بمفاهيم الانبعاثات السالبة، مثل آليات الاعتماد البيئي، تسعير الكربون، والتحفيز الجمركي للمستوردات الخضراء، مما قد يؤخر اعتماد النموذج مؤسسيًا.
- الضغوط التجارية في بيئة تنافسية: في حال ارتفاع التكاليف التشغيلية للتحول البيئي دون وجود حوافز اقتصادية مقابلة، قد يؤثر ذلك مؤقتًا على جاذبية الميناء التنافسية مقارنة بموانئ أخرى لا تُطبق نفس المعايير البيئية.

١٢. النتائج:

تشير النماذج التقديرية المعتمدة على بيانات انبعاثات تشغيلية فعلية من ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز إلى أن دمج التقنيات البيئية المدروسة (مزارع الطحالب، خلايا الوقود الميكروبية، الخرسانة الذكية، والرقمنة البيئية) من شأنه أن يُحقق توازنًا كربونيًا سالبًا بنسبة تتراوح بين ١١٥% و١٣٠ %من إجمالي الانبعاثات الناتجة عن العمليات اليومية، مثل تشغيل المعدات، النقل داخل الميناء، الطاقة المستخدمة في التبريد، والإضاءة والمرافق. هذا يعني أن الميناء، بدلاً من أن يكون مصدرًا لصافي الانبعاثات، سيُصبح أداة فاعلة في امتصاص الكربون من البيئة

المحيطة، بما يعادل إزالة أكثر من ٣٠% من الانبعاثات فوق المعدل الطبيعي للتشغيل.

تُظهر الأدبيات العلمية والتجارب الميدانية أن كل متر مربع من مزارع الطحالب الدقيقة (Microalgae Bioreactors) قادر على امتصاص ما يعادل 2كجم من ثاني أكسيد الكربون يوميًا، بقدرة تتفوق على معظم الأشجار التقليدية بمقدار ١٠–٢٠ ضعف. وعند تكييف هذه المزارع على أسطح المباني والمستودعات والهناجر داخل الميناء، يمكن امتصاص آلاف الأطنان من الكربون سنويًا، مع إمكانية إعادة توظيف الكتلة الحيوية الناتجة لإنتاج وقود حيوي أو إضافات زراعية وصناعية، مما يمنح التقنية قيمة اقتصادية مضافة إلى جانب الأثر البيئي.

أظهرت النماذج أن خلايا الوقود الميكروبية (MFCs) التي تعتمد على النفايات العضوية (مثل مخلفات المطاعم، الزيوت المستخدمة، وبعض مياه الصرف) يمكن أن تُنتج ما يعادل 0.3إلى ٠.٥ فولت/خلية، مع إمكانية تجميع الخلايا على شكل مصفوفات لإنتاج طاقة قابلة للاستخدام في الإنارة، أو تغذية أجهزة استشعار بيئية (Logan et al., 2019). بالإضافة إلى ذلك، تسهم هذه التقنية في:

- تقليل النفايات المرسلة إلى المكبات،
- خفض الانبعاثات الناتجة عن المعالجة التقليدية للنفايات،
- توفير مصدر طاقة ذاتي ومستدام لبعض وحدات الميناء.

أثبتت اختبارات المواد الحديثة مثل (CarbonCure) و (Bio-concrete) أن استخدام الخرسانة الماصة للكربون في البنية التحتية (المباني، المستودعات ،الأرصفة، الطرق، الهناجر) يمكن أن يؤدي إلى احتجاز دائم للكربون داخل الهياكل الخرسانية بنسبة تصل إلى 15%–10من وزن الأسمنت المستخدم. وعند تطبيق هذه التقنية على مشاريع التوسعة المستقبلية، مثل إنشاء مباني او أرصفة جديدة أو ساحات تخزين، سيُساهم ذلك في:

- خفض البصمة الكربونية لمواد البناء،
- تحقيق تعويض كربوني سلبي على مدى زمني طويل (أكثر من ٥٠ عامًا)،

- تحويل البنية الصلبة للميناء إلى مخزن دائم للكربون.

من خلال ربط أجهزة الاستشعار البيئي بمنصات ذكاء اصطناعي تحليلية، أصبح بالإمكان بناء لوحات تحكم بيئية ذكية (Environmental Dashboards) تتضمن: مراقبة لحظية للانبعاثات(CO_2, NO_x, SO_2) ؛ تحليل أنماط التشغيل عالية الانبعاث؛ التوصية بتعديلات فورية على الجداول الزمنية أو توزيع المعدات؛ إصدار تنبيهات مبكرة في حالات تجاوز الانبعاثات أو تسرب غازات ضارة.

وقد أظهرت نماذج المحاكاة أن دمج الذكاء الاصطناعي في إدارة التشغيل البيئي يقلل الانبعاثات بنسبة تصل إلى 18–22%عن المتوسط التشغيلي عند اعتماد الحلول التقليدية، مما يعزز كفاءة الأداء البيئي دون التأثير على سرعة العمليات اللوجستية.

يُظهر تحليل النتائج أن التحول إلى نموذج الميناء السالب الكربون في ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز ليس فقط ممكنًا تقنيًا، بل يُعد خيارًا استراتيجيًا ذا أثر اقتصادي وبيئي مزدوج .كما أن التجربة السعودية في هذا السياق قد تُشكل مرجعًا عالميًا رائدًا يُسهم في إعادة تشكيل مستقبل الموانئ المستدامة حول العالم.

١٣. التوصيات:

استنادًا إلى نتائج البحث والتحليل البيئي والتقني، يقدم هذا البحث مجموعة من التوصيات التطبيقية والاستراتيجية التي تُمهد الطريق لتحويل ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز بالدمام إلى أول مينائين سالب للانبعاثات الكربونية في العالم، بما يتماشى مع مستهدفات رؤية المملكة ٢٠٣٠، والتزامات المملكة الدولية في العمل المناخي؛ وذلك عن طريق:

- تشكيل لجنة عليا متعددة التخصصات لتطوير النموذج الأولي؛ توصى بتأسيس لجنة عليا تضم ممثلين من الهيئة العامة للموانئ (موانئ)، ووزارة الطاقة، ووزارة البيئة والمياه والزراعة، إلى جانب خبراء من الجامعات ومراكز الأبحاث البيئية، ومستشارين تقنيين من القطاع الخاص في مجالات احتجاز الكربون والطاقة المتجددة. تهدف هذه اللجنة إلى ضمان التكامل المؤسسي والتقني بين جميع الجهات ذات العلاقة، ووضع الإطار التنظيمي والتشغيلي

المناسب لتطبيق المشروع التجريبي. كما تسهم في تسهيل التنسيق على مستوى التمويل والتراخيص والتشغيل، بما يعزز فرص نجاح المشروع وتطويره مستقبلاً بطريقة متكاملة ومستدامة.

- تنفيذ مشروع تجريبي على نطاق محدود داخل الميناء؛ تتضمن التوصية تنفيذ نموذج مصغّر (Pilot Project) داخل أحد أجزاء الميناء، مثل رصيف محدد أو ساحة تخزين أو مبنى إداري، يشمل تركيب مزارع طحالب دقيقة صناعية على الأسطح، ووحدات خلايا وقود ميكروبية لمعالجة النفايات العضوية، بالإضافة إلى إجراء قياسات بيئية دقيقة قبل وبعد التشغيل. والغرض من هذا المشروع التجريبي هو اختبار كفاءة النموذج من الناحية التقنية والاقتصادية والبيئية ضمن بيئة تشغيلية حقيقية، وتحليل البيانات الناتجة بشكل تفصيلي، مما يسمح بإجراء تحسينات وتعديلات قبل التوسع في التطبيق على نطاق واسع.
- إصدار تشريعات تنظيمية داعمة للتحول البيئي؛ توصى بوضع لائحة تنظيمية وطنية خاصة بالموانئ منخفضة وسالبة الانبعاث، تشمل فرض معايير إلزامية لاحتجاز الكربون أو تقليل الانبعاثات في المشاريع الجديدة أو التوسعية داخل الموانئ، إلى جانب تقديم حوافز مالية وتشريعية للمشغلين الملتزمين بهذه المعايير، مثل تخفيض الرسوم أو منح الأولوية التشغيلية. يهدف ذلك إلى تحفيز القطاع اللوجستي على تبني ممارسات مستدامة، وتحويل الالتزام البيئي من كونه اختيارًا تطوعيًا إلى جزء لا يتجزأ من النظام التشغيلي الرسمي المعتمد وطنيًا.
- استقطاب شراكات دولية في تقنيات الاقتصاد الدائري والخرسانة الذكية؛ توصى ببناء شراكات استراتيجية مع شركات عالمية متخصصة في إنتاج الخرسانة الماصة للكربون وتطبيقات الذكاء الاصطناعي البيئي، وتقنيات الطاقة الحيوية والطحالب الدقيقة. كما يُقترح تنظيم هاكاثونات وندوات دولية تستضيفها الموانئ السعودية لجذب حلول وتكنولوجيات مبتكرة قابلة للتطبيق الفعلي. الغرض من هذه التوصية هو تعزيز الابتكار المفتوح، وتيسير نقل المعرفة التقنية المتقدمة

إلى المملكة، وتقليل تكلفة التطوير من خلال الشراكات البحثية والتجارية التي تحقق عوائد بيئية واقتصادية ملموسة.

- إدراج الميناء ضمن المنصات الدولية لتتبع الأداء البيئي للموانئ؛ توصى بالعمل على اعتماد كلا من ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبد العزيز ضمن مبادرات دولية مرموقة مثل EcoPorts التابعة لمنظمة الموانئ الأوروبية (ESPO) ، و Green Marine Alliance، ونظام مراجعة الأداء البيئي للموانئ .(PERS) كما ينبغي نشر تقارير أداء بيئي سنوية موثقة ومعتمدة دوليًا. يهدف ذلك إلى رفع مستوى الشفافية بشأن أداء الميناء البيئي، وتوفير بيانات موثوقة تدعم سمعته كميناء رائد بيئيًا في سلاسل الإمداد العالمية (Mangan et al., 2016)، بما يُشجع شركات الشحن والخطوط الملاحية الملتزمة بالاستدامة على اختياره كنقطة عبور مفضلة (European Sea Ports Organization ESPO, 2022).
- تطوير منظومة تدريب وطنية متخصصة في الموانئ السالبة الكربون؛ توصى بإطلاق برنامج وطني للتدريب تحت عنوان "التحول البيئي في الموانئ"، بالتعاون مع الجامعات والمراكز التقنية المحلية والدولية. يشمل البرنامج دورات تدريبية متخصصة في إدارة الكربون والبيئة البحرية، وتدريبًا عمليًا على تشغيل وصيانة خلايا الوقود ومزارع الطحالب الدقيقة، إضافة إلى ورش عمل لتحليل الانبعاثات وتشغيل الأنظمة البيئية الذكية. يهدف هذا البرنامج إلى إعداد كوادر وطنية مؤهلة تقنيًا وعلميًا لقيادة مسيرة التحول البيئي في الموانئ السعودية، وبناء قاعدة من الخبرات يمكن تعميمها على باقي الموانئ في المستقبل القريب.

١٤. آليات تنفيذ مشروع "الميناء السالب الكربون" وإمكانية تطبيقه في الواقع العملي: رؤية تكاملية لميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز بالدمام.

إن التحولات المناخية العالمية، وما صاحبها من تشريعات دولية حازمة، لا سيما من المنظمة البحرية الدولية (IMO)، تفرض على الموانئ ليس فقط تقليل الانبعاثات، بل إعادة صياغة دورها التشغيلي لتصبح أداة فعالة في امتصاص الكربون. ومن هذا المنطلق، تأتي مبادرة "الميناء السالب الكربون" بوصفها خطوة جريئة، ولكن ممكنة،

نحو تمكين ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز بالدمام من التحول إلى نموذج عالمي للموانئ المناخية الذكية.

أولًا: التأسيس المؤسسي والتنظيمي: يتطلب التنفيذ الناجح تأسيس لجنة عليا مشتركة تشرف على المشروع، تضم الهيئة العامة للموانئ، وزارة الطاقة، وزارة البيئة، وكيانات علمية مثل مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية وجامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية (كاوست). يجب أن تضع هذه اللجنة:

- إطارًا تنظيميًا يلزم بإدماج معايير الانبعاثات السالبة في التخطيط والتوسعة،
- تحديث عقود التشغيل مع مشغلي الميناء لتضم معايير بيئية إلزامية،
- وتفعيل نظام منح الامتيازات البيئية (Green Port Concessions).

الواقع السعودي يمتلك أرضية قانونية وتنظيمية جاهزة لهذه التحولات، خاصة في ظل التزامات رؤية ٢٠٣٠ بتقليل الانبعاثات الكربونية بنسبة ٢٧٨ مليون طن بحلول ٢٠٣٠.

ثانيًا: التقييم البيئي والتحليل الفني: تنطلق المرحلة الثانية من خلال:

- تنفيذ مسح بصمة كربونية شاملة (Carbon Baseline Assessment)،
- استخدام تحليل دورة الحياة (LCA) لتحديد مصادر الانبعاثات الأعلى في سلاسل الإمداد المينائي،
- بناء نموذج محاكاة بيئي رقمي (Carbon Digital Twin) لمحاكاة التدخلات التقنية المتوقعة وتأثيرها البيئي والاقتصادي. وهذا الأسلوب مستخدم فعليًا في ميناء روتردام، ويُعد من أفضل الممارسات العالمية في التخطيط البيئي الذكي.

ثالثًا: التطبيق المرحلي للتقنيات البيئية:

يُنفذ المشروع عبر أربع تقنيات أساسية، قابلة للتطبيق تقنيًا في بيئة الميناء:

١. مزارع الطحالب الدقيقة على الأسطح؛ تعمل كمصائد حيوية لثاني أكسيد الكربون، ويمكن نشرها فوق هناجر ومستودعات الميناء.

- الدليل العملي: مشروع AlgaEnergy في اليابان وسنغافورة أثبت قدرة المتر المربع الواحد من الطحالب على امتصاص أكثر من ٢ كجم CO_2/يوميًا.
- الشرط التطبيقي: توفر التهوية والضوء الطبيعي والبنية الأساسية للمياه المغذية.

٢. الخرسانة الذكية الماصة للكربون؛ تُستخدم في التوسعة المستقبلية للأرصفة والساحات.

- الدليل العملي: تقنية CarbonCure تُستخدم في كندا وألمانيا، وتُسجل الكربون داخل المادة الخرسانية نهائيًا.
- الشرط التطبيقي: توفير موردين معتمدين ودمجها في المواصفات الفنية للعقود الجديدة.

٣. خلايا الوقود الميكروبية (MFCs)؛ تُحوّل النفايات العضوية من السفن إلى طاقة كهربائية.

- الدليل العملي: مطبقة في بوسان (كوريا الجنوبية) كجزء من معالجة مياه الصرف بالموانئ.
- الشرط التطبيقي: بنية تحتية مخصصة للصرف العضوي البيئي.

٤. أنظمة الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (AI + IoT)؛ تُستخدم لمراقبة الانبعاثات لحظيًا وتحليل الأداء البيئي.

- الدليل العملي: مطبقة في ميناء روتردام لرصد الانبعاثات في الوقت الفعلي.
- الشرط التطبيقي: تكاملها مع الشبكات الرقمية والتشغيلية للميناء.

رابعًا: التنفيذ المرحلي والتوسع التدريجي:

- المرحلة التجريبية (Pilot Zone): تطبيق جميع الأنظمة في مساحة واحدة من الميناء.
- مرحلة التقييم: مراجعة الأداء البيئي، وتحسين نقاط الضعف التقنية.
- مرحلة التوسعة: نقل التجربة إلى بقية وحدات الميناء.
- مرحلة التشغيل الكامل: توثيق الأداء وإدماجه في السياسة التشغيلية العامة. ويُوصى بجدول زمني من ثلاث سنوات لتحقيق التشغيل الكامل، بدايةً من دراسات الجدوى وحتى التشغيل المتكامل.

خامسًا: التكامل مع القطاع الخاص والشركات التشغيلية؛ يشترط لإتمام التنفيذ بنجاح:

- تعديل عقود الامتياز والتشغيل لتشمل المعايير البيئية،
- إطلاق "برنامج المشغّل الأخضر" لتصنيف الشركات داخل الميناء بحسب التزامها البيئي،
- توفير حوافز تشغيلية للشركات الملتزمة (أولوية، تخفيض رسوم، دعم لوجستي).

سادسًا: الرقابة البيئية والتوثيق الدولي

- تطوير منصة بيئية رقمية متكاملة لرصد الانبعاثات (Green Port Dashboard)،
- إصدار تقارير بيئية دورية بالتنسيق مع برامج CDP، EcoPorts، وIMO،
- اعتماد نظام تقييم سنوي للامتثال البيئي وفق المعايير الدولية ISO 14064.

سابعًا: التدريب وبناء القدرات:

- إنشاء مركز تدريبي داخل الميناء لتأهيل الفنيين والمهندسين البيئيين، بالتعاون مع الأكاديمية السعودية اللوجستية والجامعات الوطنية.
- تنفيذ برامج اعتماد (Green Operator Certification) لمشغلي الميناء.

الجدوى الواقعية للمشروع:

- من حيث التقنية: جميع الأنظمة الأربع مطبقة في نماذج دولية واقعية، ويمكن تكييفها للبيئة التشغيلية في الميناء.
- من حيث التشغيل: يمكن التنفيذ تدريجيًا مع إعادة تصميم وحدات تشغيلية محددة.
- من حيث التمويل: يمكن تغطيته عبر برامج حكومية، وشراكات دولية (مثل GCF)، وتمويل خاص.
- من حيث الالتزام الدولي: يتماشى مع سياسات IMO ويدعم حصول الميناء على تصنيفات عالمية.

إن مشروع "الميناء السالب الكربون" ليس طرحًا نظريًا بل خطة واقعية قابلة للتنفيذ، ذات أبعاد فنية واقتصادية وتشريعية، تُعزز من موقع المملكة في قيادة التحول البيئي

للموانئ العالمية. ويُعد كلا من ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبدالعزيز مؤهلين ليكونا أوائل الموانئ تطبيقيا في هذا المجال على مستوى الشرق الأوسط، بل والعالم.

المراجع:

1. **International Maritime Organization (IMO).** (2023). *Fourth IMO Greenhouse Gas Study.* https://www.imo.org
2. **UNCTAD.** (2023). *Review of Maritime Transport 2023.* United Nations Conference on Trade and Development. https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2023
3. **Saudi Vision 2030.** (2021). *Sustainability and the Saudi Green Initiative.* https://www.vision2030.gov.sa
4. **Van den Berg, R., & de Langen, P.** (2020). *Green Port Strategy: The Case of Rotterdam. Maritime Policy & Management*, 47(2), 157–172. https://doi.org/10.1080/03088839.2019.1708413
5. **Mangan, J., Lalwani, C., & Lalwani, C.** (2016). *Global Logistics and Supply Chain Management.* Wiley.
6. **Scholten, H. J., et al.** (2021). *Hamburg Port Environmental Technologies and Digital Monitoring. Journal of Cleaner Production*, 280, 124495.
7. **NEOM Official Portal.** (2024). *The Line & Sustainable Port Concepts.* https://www.neom.com
8. **Mdpi Energies.** (2023). *Negative Emission Technologies in Ports: Feasibility and Limitations. Energies*, 16(24), 6322. https://www.mdpi.com/1996-1073/16/24/6322
9. **World Bank.** (2021). *Green Ports: Global Practices and Policies.* https://www.worldbank.org/en/topic/transport/publication/green-ports
10. **OECD/ITF.** (2022). *Decarbonising Maritime Transport: Pathways to Zero-Carbon Shipping by 2050.* https://www.itf-oecd.org/decarbonising-maritime-transport

11. **European Sea Ports Organization (ESPO).** (2022). *Environmental Report: EcoPorts Network.* https://www.espo.be
12. **Saudi Logistics Strategy.** (2022). *National Transport and Logistics Strategy Summary.* https://www.mot.gov.sa
14. **Wang, J., et al.** (2021). *Microalgae Cultivation for CO_2 Capture and Bioenergy Production. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110389. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110389
15. **Logan, B. E., et al.** (2019). *Microbial Fuel Cells: Recent Advances in Design and Applications. Environmental Science & Technology*, 53(11), 5933–5949.
16. **Carbon Cure Technologies.** (2023). *Concrete That Traps Carbon.* https://www.carboncure.com
17. **AI for Earth - Microsoft.** (2022). *AI Applications in Environmental Monitoring.* https://www.microsoft.com/en-us/ai/ai-for-earth
18. **Green Marine.** (2023). *Environmental Certification Program for Ports and Terminals.* https://green-marine.org
19. **Global Green Freight Action Plan.** (2021). *Financing Green Transport Infrastructure.* UNEP & World Bank.
20. **Carbon Disclosure Project (CDP).** (2023). *Global Port Emissions Reporting Platform.* https://www.cdp.net
21. Kamal, B. and Kutay, Ş., 2021. Assessment of causal mechanism of ship bunkering oil pollution. Ocean & Coastal Management, 215, p.105939.

22. Maritime and Port Authority of Singapore (2023). Bunkering Compliance Framework. https://www.mpa.gov.sg/web/portal/home/port-of-singapore/bunkering
23. IMO. (2019). MEPC.1/Circ.882 – Port State Control Guidelines for Fuel Verification. https://wwwcdn.imo.org/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.1-Circ.882.pdf
24. IMO. (2023). Guidance for Sustainable Maritime Infrastructure and Ports. https://wwwcdn.imo.org/en/OurWork/Documents/SustainablePortsGuide.pdf
25. IMO. (2020). Sulphur 2020 – Fuel Compliance and Monitoring Framework. https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx