



Qintar Journal for Humanities and Applied Sciences Economic and entrepreneurship studies series

اللوجستيات الخضراء: نحو إطار استراتيجي متكامل للقياس والتحسين في سلاسل التوريد الحديثة

الدكتور توفيق عبد الغني خلف العجالين

محاضر غير متفرغ في عدد من الجامعات الاردنية

تاريخ ارسال الدراسة 2025/1/27 تاريخ قبول الدراسة 2025 /2/27 تاريخ النشر 2025/3/30

المستخلص: تجاوزت اللوجستيات الخضراء أصولها كاهتمام هامشي لتصبح ركيزة أساسية في استراتيجية سلاسل التوريد الحديثة. هذا التحول مدفوع بتضافر عوامل تشمل اللوائح البيئية الصارمة، والطلب الاستهلاكي المتزايد على المنتجات المستدامة، والسعي المنطقي الدؤوب لتحقيق الكفاءة التشغيلية والميزة التنافسية. تطور هذه الدراسة إطاراً نظرياً شاملاً للوجستيات الخضراء، متجاوزاً النقاشات المفاهيمية إلى نموذج متكامل يجمع بين المبادئ الاستراتيجية، والأدوات التشغيلية، ومنهجيات القياس الدقيقة، وتستكشف الدراسة بشكل منهجي التأثيرات البيئية متعددة الأوجه للخدمات اللوجستية، بما في ذلك انبعاثات غازات الدفيئة، وتلوث الهواء والماء، والضوضاء، ونفايات التغليف، مع التركيز بشكل خاص على الأساليب الموثوقة لقياسها كمياً، مثل حسابات الانبعاثات القائمة على الوقود والنشاط. بعد ذلك، يقدم البحث إطاراً استراتيجياً للتخفيف من هذه التأثيرات، منظمًا حول خمسة محاور تشغيلية أساسية: المسافة، وواسطة النقل، والمعدات، والحمولة، والتنفيذ التشغيلي. كما يتعمق البحث في تطبيق أدوات النمذجة والتحسين المتقدمة، مثل تصميم الشبكات ومسائل التوجيه الملوثة (PRP)، ويوضح كيف تعمل التقنيات الناشئة مثل الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء والبلوك تشين كممكنات حاسمة لهذه الاستراتيجيات. ومن خلال تحليل النماذج التعاونية ودراسات الحالة الواقعية، يؤكد البحث على ضرورة الشراكات بين المنظمات — مع الزبائن والموردين وحتى المنافسين — لتحقيق التغيير المنهجي. عبر تأصيل هذه التطبيقات العملية في أطر نظرية راسخة مثل المحصلة الثلاثية وإشراك أصحاب المصلحة، يجادل هذا البحث بأن اللوجستيات الخضراء هي وظيفة استراتيجية لا غنى عنها توازن بين الربحية الاقتصادية والمسؤولية البيئية والمجتمعية العميقة، مما يمهّد الطريق لسلاسل توريد مرنة ومستعدة للمستقبل.

الكلمات المفتاحية: اللوجستيات الخضراء، سلسلة التوريد المستدامة، قياس الأثر البيئي، محاسبة غازات الدفيئة، تحسين سلسلة التوريد، مسائل التوجيه الملوثة، اللوجستيات التعاونية، إزالة الكربون، المحصلة الثلاثية، إطار استراتيجي.

Green Logistics: Towards an Integrated Strategic Framework for Measurement and Improvement in Modern Supply Chains

Abstract Green logistics has transcended its origins as a peripheral concern to become a central pillar of modern supply chain strategy. This shift is propelled by a confluence of stringent environmental regulations, growing consumer demand for sustainable products, and the relentless corporate pursuit of operational efficiency and competitive advantage. This paper develops a comprehensive theoretical framework for green logistics, moving beyond conceptual discussions to an integrated model that synthesizes strategic principles, operational levers, and robust measurement methodologies. The research systematically explores the multifaceted environmental impacts of logistics, including greenhouse gas (GHG) emissions, air and water pollution, noise, and packaging waste, with a particular focus on robust methods for their quantification, such as fuel-based and activity-based GHG calculations. It then presents a strategic framework for mitigation, structured around five core

operational levers: distance, mode, equipment, load, and operational execution. The paper further delves into the application of advanced modeling and optimization tools, such as network design and Pollution-Routing Problems (PRP), and demonstrates how emerging technologies like AI, IoT, and Blockchain act as critical enablers for these strategies. Through an analysis of collaborative models and real-world case studies, the research underscores the necessity of inter-organizational partnerships with customers, suppliers, and even competitors to achieve systemic change. By grounding these practical applications in established theoretical lenses like the Triple Bottom Line (3BL) and Multi-Stakeholder Engagement, this paper argues that green logistics is an indispensable strategic function that aligns economic profitability with profound environmental and social stewardship, paving the way for resilient and future-ready supply chains.

Keywords: Green Logistics, Sustainable Supply Chain, Environmental Impact Measurement, GHG Accounting, Supply Chain Optimization, Pollution-Routing Problem, Collaborative Logistics, Decarbonization, Triple Bottom Line, Strategic Framework.

1. المقدمة

تمثل اللوجستيات مجموعة العمليات التجارية التي تخطط وتنفذ وتتحكم في تدفق السلع والمعلومات ذات الصلة من نقاط المنشأ إلى نقاط الاستهلاك لتلبية طلب الزبائن، تقليدياً، كانت القرارات اللوجستية مدفوعة بأهداف اقتصادية بحتة، مثل خفض التكاليف أو تعظيم الربحية أو تحقيق مستويات خدمة محددة للعملاء، ومع ذلك، في ظل تزايد الوعي العالمي بالقضايا البيئية، أضافت المنظمات أهداف الاستدامة إلى أهدافها التجارية، مما أدى إلى اهتمام متزايد بتخفيف الأثر الاجتماعي والبيئي لمنتجاتها وعملياتها (Sbihi & Eglese, 2010)، هذا التركيز الجديد أثر بشكل مباشر على مجال اللوجستيات، حيث أصبح من المتوقع من مزودي خدمات النقل الحد من انبعاثات غازات الدفيئة، ويركز مديرو المستودعات على استراتيجيات الحد من النفايات والطاقة، ويتم إعادة تصميم المنتجات لزيادة قابليتها لإعادة التدوير وإعادة الاستخدام.

في هذا السياق، تظهر اللوجستيات الخضراء (Green Logistics) كمفهوم استراتيجي يشير إلى القياس والتحليل والتخفيف المنهجي للأثر البيئي للأنشطة اللوجستية (Blanco & Sheffi, 2017)، تشمل هذه الجهود الحد من استهلاك مصادر الطاقة غير المتجددة، وانبعاثات الهواء، وانبعاثات غازات الدفيئة، والنفايات، تشير تقديرات وكالة الطاقة الدولية إلى أن قطاع النقل يمثل حوالي 23% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بالطاقة على مستوى العالم، ومن المتوقع أن تنمو هذه الانبعاثات بشكل كبير بحلول عام 2050، حيث يمثل الشحن البري الجزء الأسرع نمواً (IEA, 2009; Greene & Plotkin, 2011)، هذا يجعل من التركيز على الشحن والنقل مكوناً أساسياً لأي استراتيجية لوجستية خضراء فعالة (World Economic Forum, 2009).

يهدف هذا البحث إلى تقديم إطار نظري متكامل للوجستيات الخضراء، يتجاوز التعريفات العامة ليشمل منهجيات القياس الدقيقة، والاستراتيجيات العملية، والأدوات التحليلية المتقدمة، سيبدأ البحث بتحليل الأبعاد النظرية والاستراتيجية التي تؤثر اللوجستيات الخضراء، ثم ينتقل إلى استعراض تفصيلي للتأثيرات البيئية المختلفة وكيفية قياسها، مع التركيز بشكل خاص على محاسبة انبعاثات غازات الدفيئة، بعد ذلك، سيتم تقديم إطار عمل للاستراتيجيات الخضراء مصنف

حسب مستويات اتخاذ القرار والأدوات التشغيلية، مع تسليط الضوء على دور النمذجة الرياضية والتقنيات الرقمية، وأخيرًا، سيناقش البحث أهمية النماذج التعاونية كعامل حاسم للنجاح، مستشهدًا بتطبيقات عملية، يسعى هذا البحث إلى تأكيد أن اللوجستيات الخضراء ليست مجرد مسؤولية أخلاقية، بل هي ضرورة استراتيجية تحقق التوازن بين الأداء الاقتصادي والمسؤولية البيئية والاجتماعية.

2. الإطار النظري: من المبادئ إلى الاستراتيجية

لفهم اللوجستيات الخضراء كنهج متكامل، من الضروري الانطلاق من أساس نظري يربط بين أبعاد الاستدامة والمبادئ الاستراتيجية التي توجه تطبيقها العملي.

يعد مفهوم "المحصلة الثلاثية" (Triple Bottom Line - 3BL)، الذي صاغه جون إلكينغتون (Elkington, 1997)، نقطة الانطلاق الأساسية. يوسع هذا المفهوم نطاق تقييم أداء المنظمات من التركيز الأحادي على الربح المالي ليشمل الأداء البيئي والاجتماعي، في سياق اللوجستيات، يترجم البعد الاقتصادي إلى تحسين الكفاءة التشغيلية والحد من التكاليف من خلال الاستخدام الأمثل للموارد، أما البعد البيئي، وهو جوهر اللوجستيات الخضراء، فيركز على الحد من الآثار السلبية مثل الانبعاثات والتلوث والنفايات، بينما يركز البعد الاجتماعي على التأثيرات الإيجابية على الموظفين والمجتمعات المحلية، مثل تحسين السلامة والحد من الازدحام (Kumar, 2015; Carter & Rogers, 2008).

ومع ذلك، فإن تحقيق التوازن بين هذه الأبعاد يتطلب رؤية استراتيجية أعمق، وهو ما يقدمه إطار نظري أشمل (Seuring & Müller, 2008)، هنا تبرز أهمية الأطر النظرية المتقدمة، يوضح "منظور إشراف أصحاب المصلحة المتعددين" (MSEP) أن الاستدامة لا يمكن تحقيقها في عزلة، بل تتطلب تعاونًا وثيقًا بين جميع الأطراف الفاعلة في سلسلة التوريد، من الموردين إلى الزبائن والجهات التنظيمية (Freeman, 1984)، من جانب آخر، تقترح "نظرية القدرات من أجل التمايز البيئي" (CED) أن المنظمات التي تطور كفاءات فريدة في مجال اللوجستيات الخضراء يمكنها تحقيق ميزة تنافسية مستدامة يصعب على المنافسين تقليدها (Barney, 1991)، وأخيرًا، تشير "نظرية التقارب الاجتماعي المنظمي" (SIC) إلى أن الممارسات المستدامة تتحول تدريجيًا من خيار طوعي إلى معيار صناعي ومطلب تنظيمي، مما يجبر المنظمات على التكيف للبقاء في السوق والحفاظ على شرعيتها (DiMaggio & Powell, 1983)، تشكل هذه النظريات مجتمعةً الأساس الاستراتيجي الذي يحول اللوجستيات الخضراء من مجرد مبادرة امتثال إلى جزء لا يتجزأ من هوية الشركة وقدرتها التنافسية.

3. قياس الأثر البيئي للأنشطة اللوجستية

إن أي جهد جاد لتحسين الأداء البيئي يبدأ بالقياس الدقيق، فالقرارات اللوجستية مدفوعة بالمقاييس، وبالتالي تتطلب مبادرات اللوجستيات الخضراء فهمًا عميقًا لكيفية قياس الآثار البيئية المختلفة، تشمل هذه الآثار انبعاثات غازات الدفيئة، والتلوث، والضوضاء، والاهتزازات، ونفايات التغليف (Blanco & Sheffi, 2017).

3.1 انبعاثات غازات الدفيئة (GHG Emissions)

تتولد عن تدفق البضائع عبر الشبكات اللوجستية مجموعة من التأثيرات البيئية المترابطة، فعملية احتراق الوقود الأحفوري في محركات الشاحنات والطائرات والسفن لا تطلق فقط غازات الدفيئة ذات التأثير العالمي، بل تطلق أيضاً ملوثات تؤثر على جودة الهواء والمياه على المستوى المحلي.

انبعاثات غازات الدفيئة (GHG) : هي التأثير الأكثر شهرة، حيث تساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري، الغازات الرئيسية التي تنتجها عمليات النقل هي ثاني أكسيد الكربون (CO_2) ، والميثان (CH_4) ، وأكسيد النيتروز (N_2O) ، يتم التعبير عن تأثير هذه الغازات مجتمعة بما يعادل ثاني أكسيد الكربون (CO_2e) في عملية تُعرف بـ "البصمة الكربونية" (Boukherroub et al., 2017) ، ويمثل النقل وحده أكثر من 90% من هذه الانبعاثات في القطاع اللوجستي.

التلوث (Pollution) : على عكس انبعاثات غازات الدفيئة، يميل تأثير التلوث إلى أن يكون محلياً، حيث يتركز في المدن والموانئ وممرات الشحن، الملوثات الرئيسية الستة، المعروفة بـ "الملوثات المعيارية"، هي: الجسيمات الدقيقة (PM)، والأوزون الأرضي، وأول أكسيد الكربون (CO) ، وأكاسيد الكبريت (SOx) ، وأكاسيد النيتروجين (NOx)، والرصاص، تُعد الجسيمات الدقيقة (خاصة 2.5 PM) وأكاسيد النيتروجين من أخطر الملوثات الناتجة عن محركات الديزل، وتسبب مشاكل صحية خطيرة في الجهاز التنفسي (Forkenbrock, 1999) ، كما يمثل تلوث المياه، الناجم عن التسربات النفطية والمواد الكيميائية من السفن، تهديداً كبيراً للنظم البيئية البحرية (IMO, 2012) .

الضوضاء والاهتزازات (Noise and Vibration) : تولد عمليات النقل، وخاصة الشاحنات والقطارات والطائرات، مستويات ضوضاء تتجاوز بشكل كبير الحدود التي حددتها وكالة حماية البيئة (70 ديسيبل) لتجنب فقدان السمع على المدى الطويل، تؤثر هذه الضوضاء على جودة الحياة للسكان والحياة البرية على حد سواء، مما يفرض قيوداً على الأنشطة اللوجستية في المناطق السكنية، خاصة خلال ساعات الليل (Blanco & Sheffi, 2017) .

نفايات التغليف (Packaging Waste) : يشكل التغليف جزءاً كبيراً من النفايات الصلبة البلدية، في السياق اللوجستي، هناك ثلاثة أنواع رئيسية من التغليف: التغليف الأولي (الذي يلامس المنتج)، والتغليف الثانوي (لتجميع المنتجات معاً، مثل الصناديق الكرتونية)، والتغليف الثالثي (لحماية الشحنات الكبيرة، مثل الأغلفة البلاستيكية حول المنصات النقلية)، تؤثر القرارات اللوجستية بشكل مباشر على تصميم واستخدام والتخلص من التغليف الثانوي والثالثي، مما يجعل الحد منه وإعادة تدويره جزءاً لا يتجزأ من استراتيجية اللوجستيات الخضراء

3.2 التلوث والضوضاء والنفايات

نظراً لأهمية انبعاثات غازات الدفيئة، تم تطوير منهجيات متعددة لحسابها، ولكن كل منها يأتي مع مجموعة من الصعوبات والافتراضات، توصي الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2006) بمنهجيتين أساسيتين:

المنهجية القائمة على الوقود (Fuel-Based): هي الأكثر دقة نظريًا، حيث تعتمد على ضرب إجمالي الوقود الزبون في معامل انبعاث ثابت لذلك الوقود، ومع ذلك، فإن تطبيقها يواجه تحديًا كبيرًا يتمثل في صعوبة الحصول على بيانات دقيقة عن استهلاك الوقود لرحلة معينة، خاصة عندما تكون العمليات اللوجستية مجزأة بين عدة أطراف (شاحن، ناقل، وسيط).

المنهجية القائمة على النشاط (Activity-Based): هي الأكثر شيوعًا في الممارسة العملية، حيث تقدر استهلاك الوقود بناءً على بيانات النشاط، أبسط أشكالها هو الحساب القائم على المسافة، والذي يفتقر إلى الدقة لأنه يتجاهل عوامل حاسمة مثل وزن الحمولة، لذلك، فإن الحساب القائم على الوزن والمسافة (طن-كيلومتر) هو الأكثر استخدامًا لمقارنة وسائل النقل المختلفة وتخصيص الانبعاثات، ولكن حتى هذا النهج يواجه تحديات كبيرة، حيث تختلف معاملات الانبعاث (emission factors) بشكل هائل ليس فقط بين وسائل النقل، ولكن أيضًا بين المصادر المختلفة لنفس الوساطة (مثل وكالة حماية البيئة الأمريكية EPA وهيئة البيئة والغذاء والشؤون الريفية البريطانية Defra)، هذا الاختلاف ينبع من تباين الافتراضات حول عوامل مثل متوسط حمولة المركبة ونوع الطريق وظروف التشغيل (Craig et al., 2013).

علاوة على ذلك، يجب مراعاة نطاق الانبعاثات، فهل يتم حساب الانبعاثات "من الخزان إلى العجلة" (TTW) فقط، أم يتم تبني نهج أشمل "من البئر إلى العجلة" (WTW) الذي يشمل انبعاثات إنتاج وتوزيع الوقود؟ يتجه المعيار العالمي، كما في معيار EN 16258 الأوروبي، نحو اعتماد نطاق WTW لتوفير صورة أكثر اكتمالاً (VTT, 2012)، كما أن تخصيص الانبعاثات لشحنة فردية يمثل تحديًا آخر، مما يثير جدلاً حول مدى دقة وعدالة المقاييس المستخدمة، ويؤكد على وجود مفاضلة حتمية بين دقة المقاييس وسهولة تطبيقها وقابليتها للمقارنة (Caplice & Sheffi, 1994).

4. الاستراتيجيات والأدوات العملية للوجستيات الخضراء

إن التخفيف الفعال من الأثر البيئي للأنشطة اللوجستية يتطلب تطبيق مجموعة من الاستراتيجيات المترابطة التي يمكن تنظيمها ضمن إطار عمل واضح، يقترح Blanco & Sheffi (2017) إطارًا يعتمد على خمسة محاور تشغيلية أساسية: المسافة، ووساطة النقل، والمعدات، والحمولة، والتنفيذ التشغيلي، يمكن تطبيق الاستراتيجيات ضمن هذه المحاور على ثلاثة مستويات من صناعة القرار: الاستراتيجي، والتكتيكي، والتشغيلي (Stank & Goldsby, 2000).

4.1 إطار عمل الاستراتيجيات الخضراء: المحاور الخمسة

- **الحد من المسافة (Distance Reduction):** على المستوى الاستراتيجي، يتم ذلك من خلال إعادة تصميم شبكة التوزيع لتقريب المستودعات من الأسواق النهائية أو اعتماد مصادر محلية، وعلى المستوى التشغيلي، يتم ذلك باستخدام برامج توجيه المركبات المتقدمة لتحديد المسارات الأكثر كفاءة.
- **التحول بين وسائل النقل (Modal Shift):** يركز هذا المحور على نقل الشحنات من الطرق (الأعلى انبعاثًا لكل طن-كم) إلى وسائل أنظف مثل السكك الحديدية أو النقل المائي، هذا قرار استراتيجي يتعلق بتصميم الشبكة وتكتيكي يتطلب تعاونًا مع الزبائن لتعديل أوقات التسليم.

- **المعدات الأنظف (Cleaner Equipment)** : يشمل ذلك الاستثمار الاستراتيجي في أساطيل المركبات الكهربائية أو الهجينة، وتحديث المعدات القديمة بانتظام، وتطوير خطط صيانة وقائية تراعي الأداء البيئي.
- **تخطيط الحمولة (Load Planning)** : يهدف إلى تعظيم الاستفادة من كل رحلة. استراتيجيًا، يمكن تحقيق ذلك من خلال إعادة تصميم التغليف لتحسين استخدام مساحة المركبة، وتشغيليًا، يتم من خلال استخدام أدوات تحليلية لتحسين تحميل الشاحنات والحاويات.
- **التميز التشغيلي (Operational Excellence)** : يركز هذا المحور على الجانب البشري والثقافي، ويشمل تطوير ثقافة لوجستية واعية بالبيئة، وتدريب السائقين على تقنيات القيادة البيئية، ووضع أهداف واضحة للحد من وقت التباطؤ (Idling)، كما فعلت شركة Walmart عندما قامت بتجهيز أسطولها بوحدات طاقة مساعدة (APUs) لتوفير الوقود والحد من الانبعاثات أثناء توقف الشاحنات.

4.2 أدوات النمذجة والتحسين: ترجمة الاستراتيجية إلى واقع

لتنفيذ هذه الاستراتيجيات بفعالية، تعتمد اللوجستيات الخضراء بشكل كبير على أدوات النمذجة والتحسين المتقدمة (Dekker et al., 2011).

تصميم الشبكات (Network Design) : على المستوى الاستراتيجي، تُستخدم هذه النماذج لتحديد المواقع المثلى للمصانع والمستودعات، يمكن تعديل النماذج التقليدية التي تركز على التكلفة لتشمل "تكلفة بيئية" أو قيودًا على إجمالي الانبعاثات (Magnanti & Wong, 1984; Goetschalckx et al., 2002; Melo et al., 2009). إن تحديد مواقع المرافق الخضراء هو جزء أساسي من هذا التحليل (Velázquez Martínez & Fransoo, 2017)، غالبًا ما تُظهر هذه التحليلات منحى مقايضة (trade-off curve) يوضح أنه يمكن تحقيق تخفيضات كبيرة في الانبعاثات (على سبيل المثال، 10%) بزيادة طفيفة فقط في التكاليف، ولكن التخفيضات الأكبر تتطلب تكاليف أعلى بكثير (Hoen et al., 2014).

مسائل التوجيه الملوثة (Pollution-Routing Problems - PRP) : على المستوى التشغيلي، تطورت نماذج توجيه المركبات (VRP) التقليدية (Laporte, 2009) إلى ما يُعرف بـ PRP، هذه النماذج الأكثر تعقيدًا لا تهدف فقط إلى الحد من المسافة أو الوقت، بل تهدف إلى الحد من استهلاك الوقود أو الانبعاثات بشكل مباشر، وهي تأخذ في الاعتبار عوامل حاسمة مثل نوع المركبة، وسرعة السفر (التي تؤثر على استهلاك الوقود بشكل غير خطي)، ووزن الحمولة (الذي يتناقص مع كل عملية تسليم)، وتضاريس الطريق (Bektaş & Laporte, 2011; Koç et al., 2014)، على سبيل المثال، يمكن لهذه النماذج تحديد السرعة المثلى لكل جزء من الطريق أو تصميم مسارات تتجنب المنعطفات اليسرى التي تتطلب انتظارًا طويلًا، كما تفعل شركة UPS للحد من وقت التباطؤ واستهلاك الوقود (UPS Pressroom, 2015; Barth & Boriboonsomsin, 2009)، إن نجاح هذه النماذج يعتمد على التقنيات الرقمية مثل إنترنت الأشياء (IoT) والذكاء الاصطناعي (AI).

5. النماذج التعاونية: القوة الدافعة للتغيير المنهجي

نادراً ما تنجح استراتيجيات اللوجستيات الخضراء إذا تم تنفيذها من قبل شركة واحدة بمعزل عن شركائها، فالتعاون بين مختلف الأطراف في سلسلة التوريد، الذي يعكس "منظور إشراك أصحاب المصلحة المتعددين"، هو عامل حاسم لتحقيق تأثير واسع النطاق ومستدام، يتخذ هذا التعاون أشكالاً متعددة، كما توضح دراسات الحالة التالية (Blanco & Cottrill, 2013).

التعاون مع الزبائن (Boise و OfficeMax): واجهت شركة Boise لصناعة الورق تحدياً في شحن منتجاتها إلى زبونها الرئيسي OfficeMax، كان النقل بالشاحنات هو الخيار المعتاد لمرونته وسرعته، ولكنه الأعلى تكلفة وانبعاثاً، كان التحول إلى السكك الحديدية أكثر كفاءة بيئياً واقتصادياً، لكنه يتطلب تجميع طلبات كافية لملء عربة قطار كاملة، مما قد يطيل وقت التسليم ويؤثر على المخزون، من خلال التعاون الوثيق، قامت الشركتان بتنسيق عمليات الطلب لتحديد متى يمكن تجميع الطلبات في شحنة قطار، ومتى يجب استخدام الشاحنات، أدى هذا التحول إلى الحد من الانبعاثات بنسبة 70% في الممرات التي تم تطبيقها فيها، مع تقاسم وفورات التكلفة بين الشريكين.

التعاون مع المنافسين (Ocean Spray و Tropicana): في مثال لافيت للنظر، تعاونت شركتا Ocean Spray و Tropicana، وهما من أقوى المنافسين في سوق المشروبات، لحل مشكلة لوجستية مشتركة، كانت Tropicana تشحن عصير البرتقال شمالاً من فلوريدا في عربات قطار مبردة، ثم تعود هذه العربات باهظة الثمن فارغة جنوباً، مما يمثل هدراً كبيراً، في الوقت نفسه، كانت Ocean Spray تشحن منتجاتها جنوباً إلى فلوريدا باستخدام الشاحنات، من خلال وسيط لوجستي من الطرف الثالث، تم التوصل إلى اتفاق تستخدم بموجبه Ocean Spray عربات القطار الفارغة العائدة لـ Tropicana، أدى هذا الحل إلى توفير أكثر من 40% من تكاليف النقل لشركة Ocean Spray والحد من انبعاثاتها بنسبة 65%، بينما تخلصت Tropicana من تكاليف وانبعاثات "الأميال الفارغة".

التعاون مع الموردين (Caterpillar): ركزت شركة Caterpillar على الحد من الأثر البيئي لشبكة توريد قطع الغيار الواردة إلى مصنعها. كان الهدف هو استبدال حاويات الشحن المعدنية الثقيلة (التي تزن ما بين 130 و 200 رطل) بأخرى بلاستيكية خفيفة الوزن (20-40 رطل). تطلب هذا التغيير تنسيقاً معقداً مع أكثر من 200 مورد، بعد تحليل دقيق، تمكنت Caterpillar من تحديد أن 9.5% من الشحنات كانت مؤهلة للتغليف خفيف الوزن، مما أدى إلى الحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون عبر الشبكة بمقدار 130 طناً سنوياً، مع تحقيق عائد على الاستثمار في غضون عامين.

التعاون متعدد الأطراف بقيادة حكومية (EPA SmartWay): يُعد برنامج SmartWay التابع لوكالة حماية البيئة الأمريكية نموذجاً رائداً للتعاون الطوعي، يجمع البرنامج بين الحكومة وشركات الشحن والناقلين لخلق حوافز قائمة على السوق لتحسين الأداء البيئي، يوفر البرنامج أدوات للناقلين لقياس أدائهم ومقارنته مع أقرانهم، ويشجع الشاحنين على التعامل مع الناقلين الأكثر كفاءة، منذ إنطلاقه في عام 2004، ساهم البرنامج في توفير مليارات الدولارات من تكاليف الوقود والحد من ملايين الأطنان من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون والملوثات الأخرى (EPA, 2014; Blanco & Sheffi, 2017).

6. المناقشة: تحديات وتوجهات مستقبلية

يكشف التحليل المتكامل للوجستيات الخضراء عن مجال ديناميكي يتسم بالفرص والصعوبات على حد سواء، إن التقاطع بين الأهداف الاقتصادية والبيئية ليس دائماً سلساً، حيث تبرز المفاضلات (Trade-offs) كسمة أساسية، فكما أظهرت نماذج تصميم الشبكات، غالباً ما ترتبط التخفيضات الكبيرة في الانبعاثات بزيادات كبيرة في التكاليف، وبالمثل، قد يتعارض طلب الزبونين على التسليم السريع مع هدف استخدام وسائط نقل أبطأ وأكثر كفاءة بيئياً، إن إدارة هذه المفاضلات تتطلب رؤية استراتيجية وأدوات تحليلية متطورة.

من أبرز الصعوبات التي لا تزال قائمة هو تعقيد القياس والدقة، فكما تم توضيحه، تتأثر حسابات الانبعاثات بشدة بالافتراضات ونطاق الحساب ومستوى تفصيل البيانات المتاحة، هذا التفاوت يمكن أن يؤدي إلى نتائج مختلفة لنفس النشاط اللوجستي، مما يعقد المقارنات الموثوقة ويفتح الباب أمام "الغسل الأخضر"، يتطلب التغلب على هذا التحدي مزيداً من التوحيد القياسي في المنهجيات وزيادة الشفافية في مشاركة البيانات عبر سلاسل التوريد.

وبالنظر إلى المستقبل، يمكن تحديد عدة توجهات رئيسية، أولاً، هناك تحول متزايد من مجرد الحد من الأثر السلبي إلى تبني نهج أكثر شمولية وتجديدية، ثانياً، سيستمر التحول الرقمي في لعب دور حاسم، حيث ستصبح التحليلات التنبؤية القائمة على الذكاء الاصطناعي والبيانات الفورية من إنترنت الأشياء هي القاعدة وليس الاستثناء، ثالثاً، هناك حاجة متزايدة لتبني منظور دورة الحياة الكاملة (Life-Cycle Perspective)، وأخيراً، يتطلب المجال تعزيزاً مستمراً للوجستيات العكسية وسلاسل التوريد ذات الحلقة المغلقة (Rogers & Tibben-Lembke, 1998; Abbey & Guide, 2017)، حيث يُنظر إلى النفائات كمورد قيم.

7. الخاتمة والتوصيات

لقد أثبتت اللوجستيات الخضراء أنها ليست مجرد اتجاه عابر، بل هي تحول هيكلي وأساسي في إدارة سلاسل التوريد العالمية، إنها تمثل التقاء حتمياً بين الضرورات البيئية، والتوقعات المجتمعية، والفرص الاقتصادية، والابتكار التكنولوجي، لم تعد الاستدامة ترفاً، بل أصبحت ركيزة أساسية للمرونة والقدرة التنافسية والنمو على المدى الطويل، المنظمات التي تدمج الاستدامة في صميم استراتيجيتها اللوجستية لن تساهم في حماية الكوكب فحسب، بل ستحقق أيضاً أداءً مالياً وتشغيلياً متفوقاً.

بناءً على هذا التحليل، يمكن تقديم مجموعة من التوصيات المترابطة، بالنسبة لصناع السياسات والهيئات التنظيمية، من الضروري العمل على توحيد المعايير البيئية لالحد من التعقيد، وتقديم حوافز ذكية تشجع على تبني التقنيات الخضراء والنماذج التعاونية، والاستثمار في البنية التحتية الداعمة.

أما بالنسبة للشركات ومديري سلاسل التوريد، فيجب عليهم تبني التقنيات الرقمية كاستثمارات استراتيجية لا كتكاليف، والبحث بنشاط عن فرص للشراكة لمشاركة الموارد، ودمج الاستدامة في صميم مقاييس الأداء الرئيسية، كما يجب التركيز على تطوير قدرات قوية في مجال الاقتصاد الدائري والوجستيات العكسية، والتواصل بشفافية حول التقدم المحرز في تحقيق الأهداف الخضراء لبناء الثقة وتجنب اتهامات "الغسل الأخضر".

في الختام، إن الطريق نحو سلاسل توريد مستدامة بالكامل لا يزال طويلاً ومليئاً بالصعوبات، ولكن المنظمات التي تبدأ اليوم في بناء قدراتها الخضراء هي التي ستقود اقتصادات الغد.

8. قائمة المراجع

Abbey, J. D., & Guide Jr, V. D. R. (2017). Closed-loop supply chains: a strategic overview. In Y. Bouchery, C. J. Corbett, J. C. Fransoo, & T. Tan (Eds.), *Sustainable supply chains: a research-based textbook on operations and strategy*. Springer.

Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99–120.

Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2009). Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(6), 400–410.

Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232-1250.

Blanco, E. E., & Cottrill, K. (2013). Delivering on the promise of green logistics. *MIT Sloan Management Review*.

Blanco, E. E., & Sheffi, Y. (2017). Green Logistics. In Y. Bouchery, C. J. Corbett, J. C. Fransoo, & T. Tan (Eds.), *Sustainable Supply Chains* (pp. 147-187). Springer.

Boukherroub, T., Bouchery, Y., Corbett, C. J., Fransoo, J. C., & Tan, T. (2017). Carbon footprinting in supply chains. In Y. Bouchery, C. J. Corbett, J. C. Fransoo, & T. Tan (Eds.), *Sustainable supply chains: a research-based textbook on operations and strategy*. Springer.

Caplice, C., & Sheffi, Y. (1994). A review and evaluation of logistics metrics. *The International Journal of Logistics Management*, 5(2), 11-28.

Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360-387.

Craig, A. J., Blanco, E. E., & Caplice, C. G. (2013). *Carbon Footprint of Supply Chains: A Scoping Study*. NCFRP Project 36 (04) Final Report.

Dekker, R., Bloemhof, J., & Mallidis, I. (2011). Operations Research for Green Logistics – An Overview of Aspects, Issues, Contributions and Challenges. *Econometric Institute Report EI 2011-30*.

- DiMaggio, P. J., & Powell, W. W. (1983). The iron cage revisited: Institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields. *American Sociological Review*, 48(2), 147-160.
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Capstone.
- EPA. (2014). *Mobile source technical review subcommittee: SmartWay Legacy Fleet Workgroup. Recommendations and findings*.
- Forkenbrock, D. J. (1999). External costs of intercity truck freight transportation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(7-8), 505-526.
- Freeman, R. E. (1984). *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. Cambridge University Press.
- Goetschalckx, M., Vidal, C. J., & Dogan, K. (2002). Modeling and design of global logistics systems: a review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*, 143(1), 1-18.
- Greene, D. L., & Plotkin, S. E. (2011). *Reducing greenhouse gas emissions from US Transportation*. Pew Center on Global Climate Change.
- Hoen, K. M. R., Tan, T., Fransoo, J. C., & van Houtum, G. J. (2014b). Switching transport modes to meet voluntary carbon emission targets. *Transportation Science*, 48(4), 592-608.
- IEA. (2009). *Transport, energy and CO2*. OECD, Paris.
- IMO. (2012). *International shipping facts and figures*. International Maritime Organization.
- IPCC. (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IGES, Japan.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2014). The fleet size and mix pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 239-254.
- Kumar, A. (2015). Green Logistics for sustainable development: an analytical review. *IOSRD International Journal of Business*, 1(1), 7-13.
- Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43(4), 408-416.
- Magnanti, T. L., & Wong, R. T. (1984). Network design and transportation planning: models and algorithms. *Transportation Science*, 18(1), 1-55.

Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management—a review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401-412.

Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. (1998). *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*. Reverse Logistics Executive Council.

Sbihi, A., & Eglese, R. W. (2010). Combinatorial optimization and green logistics. *Annals of Operations Research*, 175(1), 159-175.

Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699-1710.

Stank, T. P., & Goldsby, T. J. (2000). A framework for transportation decision making in an integrated supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, 5(2), 71-78.

Velázquez Martínez, J. C., & Fransoo, J. C. (2017). Green facility location. In Y. Bouchery, C. J. Corbett, J. C. Fransoo, & T. Tan (Eds.), *Sustainable supply chains: a research-based textbook on operations and strategy*. Springer.

VTT Technical Research Centre of Finland. (2012). *Methodologies for emission calculations—best practices, implications and future needs*. COFRET.

World Economic Forum—WEF. (2009). *Supply chain decarbonization*.

Zamboni, G., et al. (2015). Experimental evaluation of Heavy Duty Vehicle speed patterns in urban and port areas and estimation of their fuel consumption and exhaust emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 35, 1-10.