مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٤) ٢٠٢٦
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (4) 2026

تطبيق مُؤشّرات التَّكافل الصّناعي في مدينة حَسيَاء الصّناعيَّة

أ.د.م. هيثم شاهين*

م. نُهى القاموع **

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٦/١/١١ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٦/٣/٤)

ملخّص

يكتسب التكافل الصناعي (Industrial Symbiosis) أهمية محورية في المنظومة الاقتصادية الحديثة، إذ يمثل استراتيجية فاعلة لتحقيق أهداف التنمية المستدامة والتحول نحو نموذج للاقتصاد الدائري .ويهدف هذا التوجه إلى التخفيف الجذري من الآثار البيئية السلبية الناجمة عن الأنشطة الصناعية التقليدية، لاسيما عبر ترشيد استهلاك الموارد وتقليل النفايات. تتطلب الأسس المنهجية المتبعة في هذا البحث إجراء تحليل شامل للوضع الراهن للنظام الصناعي في المنطقة المدروسة، مع التركيز على التوصيف الدقيق لتدفقات الموارد الأساسية والطاقة. يهدف هذا التحليل إلى تحديد مواطن الضعف في الكفاءة الصناعية ورصد الفوائض المتاحة من المواد والمخلفات لاستكشاف أفضل فرص التبادل والتعاون التكافلي بين مختلف الكيانات الصناعية. تُعد مدينة حسياء الصناعية نموذجاً ميدانياً مثالياً لتطبيقات التكافل الصناعي، وذلك لتميزها بتنوع كبير في الصناعات (غذائية، نسيجية، معدنية، وكيميائية)، الأمر الذي ينتج عنه كميات ضخمة من المنتجات الثانوية والنفايات القابلة لإعادة الاستخدام. هدفَت هذه الدراسة بشكل رئيسي إلى قياس مستوى التكافل الصناعي الفعلي، وذلك بالاعتماد على حساب مؤشرات التكافل الصناعي في المدينة، واقتراح سيناريوهات تطبيقية لتحسين هذه العلاقات، ومقارنة النتائج بمناطق صناعية أخرى على المستويين الوطني والعالمي، حيثُ كانت نتائج البحث من دراسة "تطبيق مُؤشّرات التَّكافل في مدينة حسياء الصّناعيَّة": تحسين الإدارة البيئيَّة، زيادة الكفاءة الاقتصاديَّة، تعزيز العلاقات بين الشَّركات، استخدام أفضل للموارد الطَّبيعية، التَّوجُّه نحوَ التَّنمية المُستدامة، توسيع نطاق الابتكار، تنمية المُجتمع المحلّي.

الكلمات المفتاحيَّة: التَّكافل الصّناعي، البيئة الصّناعيَّة، الاقتصاد الدَّائري، التَّنمية المُستدامة، مُؤشّرات التَّكافُل الصّناعي.

* أستاذ–كلية الهندسة المدنية – قسم الهندسة البيئيّة – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.

Haithamshahin@tishreen.edu.sy

** طالبة دكتوراه –كلية الهندسة المدنية – قسم الهندسة البيئيّة – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.

nouha.alkamouah@latakia-univ.edu.sy

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٤) ٢٠٢٦
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (4) 2026

Application of Industrial Symbiosis Indicators in Hassia Industrial City

Pro. Dr. Haytham Shahin *
Ph.D. Student. Nouha Alkamoua **

(Received 11/1/2026 . Accepted 4/3/2026)

□ **ABSTRACT** □

Industrial Symbiosis (IS) holds a pivotal role in modern economic systems, representing an effective strategy for achieving Sustainable Development Goals (SDGs) and transitioning towards a Circular Economy model. This approach is fundamental for radically mitigating the negative environmental impacts associated with conventional industrial activities, primarily through optimizing resource consumption and minimizing waste generation. The methodological foundation of this research necessitates a comprehensive analysis of the current industrial system's status within the study area, focusing on the precise characterization of essential resource and energy flows. This analysis is crucial for identifying areas of weakness in industrial efficiency and monitoring available surpluses of materials and by-products, thereby uncovering optimal opportunities for symbiotic exchange and cooperation between various industrial entities. Hassia Industrial City serves as an ideal field model for IS applications, distinguished by its vast diversity in industries (food, textile, mineral, and chemical), which generates significant quantities of reusable by-products and waste. The primary objective of this study is to measure the actual level of industrial symbiosis by calculating Industrial Symbiosis Indicators within the city, proposing practical scenarios for enhancing these relationships, and benchmarking the results against other industrial zones both nationally and globally.

Keywords: Industrial Symbiosis, Industrial Ecology, Circular Economy, Sustainable Development, Industrial Symbiosis indicators.

* **Ph.D. Student. Nouha Alkamoua faculty of civil engineering. Department of Environmental Engineering, Lattakia University, Lattakia, Syria.**
nouha.alkamouah@latakia-univ.edu.sy
** **Pro. Dr, faculty of civil engineering. Department of Environmental Engineering, Lattakia University, Lattakia, Syria.**
Haithamshahin@tishreen.edu.sy

١- المقدمة:

التكافل الصناعي (Industrial symbiosis) هو عملية يتم فيها استخدام النفايات في صناعة ما كمواد خام في صناعات أخرى. في هذا النهج، يتم النظر في التعاون بين الصناعات، التي تعتبر تقليديًا منفصلة عن بعضها البعض على أنها كيان واحد متجانس **[١،٢]** .يعتبر التعاون الصناعي المتبادل (الترابط الصناعي) علاقة تعاونية ومفيدة بين كيانات صناعية مختلفة أو قطاعات، حيث تتحول النفايات أو المنتجات الفائضة أو الموارد غير المستغلة من كيان واحد إلى مدخلات ذات قيمة لكيان آخر. يشمل ذلك تبادل المواد والطاقة والمياه والخبرات، مما يؤدي إلى زيادة كفاءة الموارد، وتقليل النفايات، وتوفير التكاليف، وتحقيق فوائد بيئية. في شبكة الترابط الصناعي، تعمل الشركات أو المؤسسات معًا لتحديد فرص الأمثلة والتآزر في استخدام الموارد **[3]**.

التّكافل الصناعي أمر أساسي لتأسيس المنتزهات الصّناعيّة البيئيّة (EIPs) **[٤،٥]**، الذي حدد ثلاثة أنواع من المعاملات التكافلية: (١) تقاسم البنية التحتية والمرافق، (٢) توفير الموارد المشتركة، و (٣) تبادل المنتجات الثانوية بين الشركات، حيث يتم استخدام المواد التي سيتم التخلص منها كمواد خام. ويعد التّحقّق من صحّة مؤشّرات التّكافل الصّناعي شرطاً أساسيّاً للمسؤولين عن المنتزهات الصّناعيّة البيئيّة، ويعتمد التحقق التجريبي من مؤشرات التّكافل الصناعي على البيانات التي تم جمعها من قبل مختلف المنظمات وعلى مراقبة المنتزه لفترة زمنية طويلة **[4]**.

في اسبانيا، أجري بحث في عام (٢٠١٦) حول مؤشّرات التّكافل الصّناعي لإدارة المجمّعات الصّناعيّة البيئيّة كأنظمة ديناميكيّة، حيث تمّ تقديم مؤشر التكافل الصناعي الذي يكتشف تباين التعايش بمرور الوقت ويوفر منظورًا ديناميكيًا للمجمعات الصناعية البيئية. وتمّ تقييمه في عدة سيناريوهات نظرية تم إنشاؤها من بيانات حقيقية. السيناريوهات الثلاثة هي: غياب التّكافل، ووجود التكافل، والتكافل التام. وتبين أن المؤشّر قادر على وصف تطوّر التّكافل من عدم التّكافل (٠) إلى متوسّط (٠,٨٩٩) إلى وضع أكثر تقدّماً (٤,٤٢١)**[6]**.

في البرازيل، قدّمت دّراسة في ٢٠١٨ بتصميم نموذج محاكاة قادر على تمثيل المنطقة الصّناعيّة البيئيّة (EIP) وتفاعلاتها التّكافليّة وحساب سلوك مؤشّرات التّكافل الصّناعي وتطبيق هذه المؤشّرات من خلال سيناريوهات مختلفة وتمّ التّوصّل لنتائج المحاكاة عن طريق برنامج (Netlogo). ومن خلال نتائج المحاكاة وحسب السّيناريوهات المقترحة، تمّ تحديد مجموعة من المؤشّرات الّتي يجب استخدامها (من أجل تقييم شامل لشبكات التّكافل الصّناعي) وهي: التّأثير البيئي، مؤشّر التّكافل الصّناعي ومؤشّر المنتج الثّانوي ومعدّل إعادة تدوير النّفايات **[٧،٨]**.

في دراسة عام ٢٠١٩ قامت حنان ابراهيم/ جامعة اللاذقية/ كلية الهندسة المدنية، بدراسة تكامل المياه بين الصّناعات في إطار التخطيط البيئي للمناطق الصّناعيّة وهدفت الدّراسة إلى تطوير نموذج رياضي لتكامل المياه بين الصّناعات باستخدام (الخوارزميّات الجينيّة) وإيجاد الحل الأمثل الذي يعطي أقل كلفة (لمياه التّزويد ومعالجة مياه الصّرف) وتمّ اختيار المنطقة الصّناعيّة في محافظة اللاذقية كحالة دراسة**[9]**.

في دراسة (Al-Quradaghi et al., 2020) تمّ اقتراح إطار عام لتصميم المنتزهات الصّناعيّة البيئيّة وفق أربعة متطلّبات: (الأداء البيئي – الأداء الاقتصادي – الأداء الاجتماعي وأداء الإدارة) وباعتماد عدّة معايير للانتقال من الحديقة الصّناعيّة التّقليديّة إلى الحديقة الصّناعيّة البيئيّة، كان أهمّها: التّعاون بين الشّركات، إطار

العمل التّنظيمي والحكومي، عوامل التّمكين الماليّة والاقتصاديّة، تبادل المعلومات والشفافية مع الحفاظ على القدرة التنافسية، والتّسهيل التّقني**[10]**.

<u>والفجوة البحثيّة:</u> على الرّغم منَ التَّقدُّم الملحوظ في دراسة التَّكافُل الصّناعي وتطبيقاته المُختلفة في عدّة دُوَل، لا تَزال هُناك فجوة بحثيَّة تتعلَّق بتكامُل نماذج التَّحليل الكمَّي والنَّوعي لتقييم فعاليّة أساليب التَّكافُل في السّياقات الصّناعيَّة المُختلفة. إذ تفتقر العديد منَ الدّراسات إلى إطار شامل يجمع بينَ المُؤشّرات البيئيَّة والاقتصاديَّة والاجتماعيَّة بشَكل مُتكامل، ممَّا يجعل منَ الصَّعب قياس التَّأثيرات المُتبادلة بينّ القطَّاعات المُختلفة بفعاليَّة. بالإضافة إلى ذَلك، لا تُوجد بحوث كافية تستكشف طبيعة التَّحدّيات الَّتي تُواجه الشَّركات عندَ مُحاولة تنفيذ استراتيجيَّات التَّكافُل. كما أنَّ البيانات المُتاحة غالباً ما تكون محدودة أو غير موثوقة، ممَّا يعوق القُدرة على إجراء مُقارَنات دقيقة بينَ المشاريع والمُبادرات المُختلفة. وبالتَّالي، فإنَّ الحاجة مُلحَّة لتطوير أدوات تقييم شاملة تأخُذ بعَين الاعتبار العوامل الثَّقافيَّة والتَّنظيميَّة والتُّكنولوجيَّة، ممَّا يُسهّل فهم ديناميكيَّات التَّكافُل الصّناعي ويُعزّز من كفاءَة استخدام الموارد في البيئات الصّناعيَّة المُختلفة.

٢- أهمية البحث وأهدافه:

- **أهمية البحث:**

يكتسب موضوع التّكافل الصّناعي أهميّة كبيرة، في الوقت الراهن، وخصوصاً بسبب ظروف الحصار الاقتصادي، الذي تعيشه البلاد، والظّروف الحاليّة التي تعيشها المناطق الصّناعيّة. فهو يترافق بحزمة من المنعكسات الإيجابيّة على النّواحي البيئيّة والاقتصاديّة والاجتماعيّة **[١٦،١٥، ١٤، ١٣، ١٢، ١١، ١]**.

- **هدف البحث:**

تقييم درجة التعاون الشبكي بين المصانع، وكذلك مساهمة المنشآت الصناعية في تحسين الأداء البيئي، باستخدام

أهم مؤشرات التكافل الصناعي، حالة الدراسة: المدينة الصناعية /حسياء/ مدينة حمص.

3- منهجيّة وطرائق البحث:

في هذا السياق، ومن أجل دراسة فعالية التكافل الصناعي، تمَّ تحليل أثر تحسين البنية التحتية على رفع الكفاءة التشغيلية وتعزيز الاستدامة البيئية **[١٩، ١٨،١٧]**. سيتم حساب وتطبيق مؤشرات التكافل الصناعي **[٢٠، ٨]**، لتوضيح الإمكانات المستقبلية للمدينة الصناعية في تحقيق تنمية صناعية مستدامة وأكثر تكاملاً.

من هنا تبرز الحاجة إلى المؤشرات الكمية التي تمثل مقاييس معيارية لمدى نجاح أو فشل النظام الصناعي في تحقيق التكافل. هذه المؤشرات لا تقتصر على حساب كميات المواد المتبادلة فحسب، بل تمتد لتأخذ بعين الاعتبار خطورة المواد، درجة التعاون الشبكي بين المصانع، وكذلك مساهمة كل منشأة صناعية على حدة في تحسين الأداء البيئي.

إن استخدام هذه المؤشرات يحقق عدة أهداف أساسية:

- توفير أداة للتشخيص المبكر تكشف نقاط القوة والضعف في أداء المدينة الصناعية.
- إتاحة إمكانية المقارنة بين مناطق أو فترات زمنية مختلفة بشكل علمي.
- دعم صانعي القرار بوضع سياسات أكثر فعالية لتعزيز إعادة التدوير وتقليل النفايات.
- تحفيز الشركات على تحسين ممارساتها من خلال ربط الأداء البيئي بقيمة عددية قابلة للقياس والمتابعة.

٤- منهجيّة وطرائق البحث:

في هذا السياق، ومن أجل دراسة فعالية التكافل الصناعي، وتحليل أثر تحسين البنية التحتية على رفع الكفاءة التشغيلية وتعزيز الاستدامة البيئية **[١٩، ١٨،17]**. سيتم حساب وتطبيق مؤشرات التكافل الصناعي **[20، 8]**، لتوضّح الإمكانات المستقبلية للمدينة الصناعية في تحقيق تنمية صناعية مستدامة وأكثر تكاملاً.

من هنا تبرز الحاجة إلى المؤشرات الكمية التي تمثل مقاييس معيارية لمدى نجاح أو فشل النظام الصناعي في تحقيق التكافل. هذه المؤشرات لا تقتصر على حساب كميات المواد المتبادلة فحسب، بل تمتد لتأخذ بعين الاعتبار خطورة المواد، درجة التعاون الشبكي بين المصانع، وكذلك مساهمة كل منشأة صناعية على حدة في تحسين الأداء البيئي.

إن استخدام هذه المؤشرات يحقق عدة أهداف أساسية:

- توفير أداة للتشخيص المبكر تكشف نقاط القوة والضعف في أداء المدينة الصناعية.
- إتاحة إمكانية المقارنة بين مناطق أو فترات زمنية مختلفة بشكل علمي.
- دعم صانعي القرار بوضع سياسات أكثر فعالية لتعزيز إعادة التدوير وتقليل النفايات.
- تحفيز الشركات على تحسين ممارساتها من خلال ربط الأداء البيئي بقيمة عددية قابلة للقياس والمتابعة.

آليّة جمع البيانات لدراسة فعاليَّة التَّكافُل الصّناعي:

١. **تحديد مصادر البيانات:**

- **المُسوحات الاستقصائيَّة** :إجراء استبيانات مع الشَّركات والمصانع في المدينة الصّناعيَّة لجمع معلومات حول مُمارساتهم الحاليَّة في مجال التَّكافُل، بما في ذلك حجم المواد المُتبادلة، والتَّعاون الشَّبكي، والمُمارسات البيئيَّة.
- **البيانات الثَّانويَّة** :استخدام دراسات سابقة ومقالات أكاديميَّة وتقارير حكوميَّة تحتوي على بيانات حول الأداء البيئي والإنتاج الصّناعي في المنطقة.

٢. **تصميم أداة جمع البيانات:**

- **استبيانات مُهيكلة** :إعداد استبيان يحتوي على أسئلة تتعلَّق بمُؤشّرات التَّكافُل الصّناعي، مثل كمّيّة المواد المُتبادلة بينَ المُنشآت، أنواع المواد الخَطرة، ومعايير التَّعاون بينَ المصانع.
- **مُقابلات مُتعمّقة** :إجراء مُقابلات مع مُديري المصانع وصانعي القرار لاستخراج معلومات عميقة حولَ التَّحدّيات والفُرص المُتعلّقة بالتَّكافُل الصّناعي.

٣. **جمع البيانات الكمّيّة:**

- **تحليل البيانات منَ السّجلَّات الماليَّة والإنتاجيَّة** :مُراجعة السّجلَّات الدَّاخليَّة للشَّركات لجَمع معلومات حولَ الإنتاج، نسبة النّفايات، والتَّكاليف المُرتبطة بإدارة المواد.

- **استخدام أدوات القياس** :تطبيق تقنيَّات مثل تحليلات الكفاءَة (مثل: تحليل دورة الحياة) لتقييم الأثر البيئي لكمّيَّات المواد المُستخدمة والمُستبدلة.

٤. **جمع البيانات النَّوعيَّة:**

- **الدّراسات الحقليَّة** :القيام بزيارات ميدانيَّة للدّراسة والتَّفاعُل مع العمليَّات الصّناعيَّة وفَهم كيفَ تتُمّ عمليَّات التَّكافُل على أرض الواقع.
- **تحليل المُحتوى** :دراسة الوثائق والسّياسات البيئيَّة المعمول بها في المُدن الصّناعيَّة لفَهم كيفيَّة تأثيرها على التَّكافُل الصّناعي.

٥. **تنظيم البيانات وتحليلها:**

- **إدخال البيانات في برامج تحليل البيانات** :استخدام برامج مثل SPSS أو Excel لتنظيم البيانات وتحليل المُؤشّرات الكمّيّة والنَّوعيَّة.
- **تحليل النَّتائج** :تقييم البيانات بناءً على المُؤشّرات المُحدَّدة، وقياس نقاط القوَّة والضَّعف في أداء التَّكافُل الصّناعي.

٦. **التَّأكيد على المُراجعة والتَّحقُّق:**

- **التَّحقُّق من صحّة البيانات** :إجراء مُراجعات للتَّأكُّد من دقّة البيانات المجموعة من خلال مُقارنات مع مصادر أُخرى أو إعادة الفحص مع المُشاركين.
- **التَّحليل المُتعدّد** :استخدام أساليب تحليل مُتعدّدة للنَّظر في البيانات من زوايا مُختلفة للحصول على رُؤية شاملة لأداء التَّكافُل الصّناعي.

تُساعد هذه الآليَّة في جمع البيانات اللَّازمة لتقييم وتحليل فعاليّة التَّكافُل الصّناعي، وتوفير معلومات دقيقة وموثوقة تدعم صانعي القرار وتُساهم في تعزيز الاستدامة البيئيَّة وكفاءَة الأداء في المُدُن الصّناعيَّة.

مؤشرات التكافل الصناعي (Industrial Symbiosis Indicators): [٧،٨]

تشير هذه المؤشرات إلى مدى كفاءة التفاعل والترابط بين المنشآت الصناعية في تبادل واستخدام الموارد الثانوية (كالنفايات، والمنتجات الثانوية، والطاقة، والمياه) لتحقيق مبادئ الاقتصاد الدائري والإنتاج الأنظف.

١. مؤشر التكافل الصناعي (Industrial Symbiosis Indicator – ISI)

يقيس هذا المؤشر مستوى التكافل الصناعي ضمن شبكة أو منطقة صناعية معينة، من خلال مقارنة حجم التبادلات الداخلية (واردات وصادرات) في الموارد الثانوية، ويشير الجدول (١) إلى رموز معادلة مؤشّر التّكافل الصّناعي**[8].**

$$ISI = \frac{\sum_{w=1}^{n}(Aip_w \times Dip_w)}{1+\sum_{w=1}^{n}(Aop_w \times Dop_w)} = \frac{EIM_i}{1+EIM_0} \quad (1)$$

الجدول (١) رموز معادلة مؤشّر التّكافل الصّناعي

الرمز في المعادلة	التفسير (بالعربية)	المعنى والتوضيح
ISI	مؤشر التكافل الصناعي (Industrial Symbiosis Indicator)	القيمة النهائية التي تقيس مستوى التكافل وكفاءة النظام في استخدام الموارد وتقليل النفايات ذات الأثر البيئي.
EIMi	جهد التأثير البيئي الداخلي (Environmental Impact Momentum In)	يمثّل القيمة المرجّحة بيئيّاً للمنتجات الثّانويّة التي تمّ تبادلها (المعاد استخدامها) داخل شبكة التّكافل. كلّما ارتفعت قيمته زاد التّكافل.
EIMo	جهد التأثير البيئي الخارجي (Environmental Impact Momentum Out)	يمثل القيمة المرجحة بيئياً للنّفايات الّتي تمّ التّخلّص منها (خارج) شبكة التّكافل (مثلاً إلى المكب) كلّما ارتفعت قيمته قلّ نجاح التّكافل.
∑w=1n	مجموع المواد المتبادلة/المتخلص منها	يرمز إلى جمع (Summation) قيم جميع تدفقات المواد (Waste/By-product) المختلفة، حيث n هو عدد أنواع التدفقات.
Aipw	كمية المادة المُدخلة (Amount of Input product)	كمية أو كتلة تدفق المادة الثانوية w التي يتم استخدامها كمدخل (Input) في شبكة التكافل.
Dipw	عامل التأثير البيئي للمُدخل (Environmental Impact Factor of Input)	عامل ترجيح بيئي يُخصص للمادة الثانوية .w يعكس هذا العامل مدى خطورة أو ضرر هذه المادة لو لم يتم استخدامها.
Aopw	كمية المادة المُخرجة (Amount of Output product)	كمية أو كتلة تدفق المادة الثانوية w التي يتم التخلص منها خارج شبكة التكافل (Output).
Dopw	عامل التأثير البيئي للمُخرج (Environmental Impact Factor of Output)	عامل ترجيح بيئي يُخصص للمادة الثانوية w التي يتم التخلص منها. (عادةً ما يكون Dipw=Dopwلنفس نوع المادة).
في المقام +1	عامل تجنّب القسمة على صفر	إضافة رقم ١ إلى المقام (EIMo) هو إجراء تقني لضمان عدم حدوث قسمة على صفر في حالة لم يكن هناك أي تخلص من النفايات(EIMo=0) ، كما يساعد في جعل قيمة المؤشر صفراً (ISI=0) في حالة غياب التكافل تماماً.

٢- مؤشر الاتّصال البيئي (Ce- The Eco-Connectance Indicator)

يقيس مؤشر الاتّصال البيئي كثافة أو درجة التشابك والاتصال بين المنشآت في شبكة التكافل الصناعي**[8]** ،

ويشير الجدول (٢) إلى رموز معادلة مؤشر الاتّصال البيئي.

ويُعطَى بِالمعادلة:

$$Ce=\frac{Le}{S(S-1)/2} \quad (2)$$

الجدول (٢) إلى رموز معادلة مؤشر الاتّصال البيئي

Ce	مؤشر الترابط البيئي.
Le	العدد الفعلي للروابط البيئية (تبادلات الموارد الثانوية) الموجودة في الشبكة.
S	العدد الكلي للمنشآت/الشركات المشاركة في شبكة التكافل الصناعي.
S(S-1)/2	العدد الأقصى الممكن للروابط المتبادلة بين S منشأة (يُعرف بـ "المصفوفة الكاملة").

مؤشرات المنتج الثانوي ومعدل إعادة تدوير النفايات (CR)

يقيس هذا المؤشر كفاءة استخدام الموارد في الشبكة، مع الأخذ في الاعتبار أهمية المورد المتبادل.

ويشير الجدول (٣) إلى رموز معادلة مؤشرات المنتج الثانوي ومعدل إعادة تدوير النفايات**[8]** .

ويُمَثَّل (CR) بِالمُعادلة:

$$C_R = C_e \times r_l \quad (3)$$

الجدول (٣) رموز معادلة مؤشرات المنتج الثانوي ومعدل إعادة تدوير النفايات

CR	مؤشر المنتج الثانوي ومعدل إعادة التدوير (Recycling Rate Indicator) – وهو مؤشر مركب.
Ce	مؤشر الترابط البيئي (تم حسابه في البند ٢).
rl	متوسط أهمية الروابط البيئية أو معدل الإعادة والتكرار في الشبكة. يعكس هذا الرمز القيمة النوعية للروابط (مثلاً، هل هي تبادل لمواد خطرة، أو بخار نقي، أو مياه رمادية).

وبعد الدراسة واللقاءات مع صناعيي مدينة حسياء، تمَّ تطبيق المُؤشِّرات السَّابقة وتمَّ الحصول على المعلومات التالية (الجدول ٤):

الجدول (٤) عدد المصانع ومخرجاتها في المنطقة الصناعية/ حسياء

القطاع الصناعي	عدد المصانع	متوسط الدخل السنوي للمصنع (مليار ل.س)	المنتجات الرئيسية	المخرجات الثانوية	النفايات (كمية/طن سنويًا)	الاستخدام الممكن للنفايات
الصناعات الغذائية (عصائر/زيوت)	15	7	عصائر، ألبان، زيوت نباتية	بقايا فواكه، لبّ، مياه عضوية	٨٠٠٠ طن بقايا عضوية	أعلاف، سماد عضوي، هضم لإنتاج الغاز الحيوي

الصناعات الغذائية (ألبان)	10	6	حليب مبستر، أجبان، ألبان مجففة	مصل اللبن (Whey)، مياه صناعية	٣٥٠٠ طن مصل + ٢٠٠٠ م³ مياه	إنتاج بروتين حيواني، أعلاف، استخدام المياه للري
صناعة الإسمنت والرخام	5	20	إسمنت، بلاط، رخام	غبار أفران، كسر رخام	١٢٠٠٠ طن غبار/كسر	مواد بناء ثانوية، إضافات في الطرق
الصناعات المعدنية (حديد)	8	15	حديد تسليح، مسبوكات	خبث، برادة حديد	٩٠٠٠ طن خبث	إعادة صهر، خلطات إسمنتية
الصناعات الكيماوية/البلاستيكية	12	8	بلاستيك منزلي، عبوات، منظفات	مخلفات بلاستيكية	٦٥٠٠ طن بلاستيك	إعادة تدوير لإنتاج حبيبات بلاستيكية جديدة
الصناعات النسيجية	10	5	أقمشة، خيوط، ملابس	قصاصات قماش	٢٥٠٠ طن قصاصات	إعادة تدوير، صناعة أقمشة منخفضة الجودة، عزل حراري

وإذا علمنا أنَّ rl لكُلّ قطّاع من القطّاعات السَّابقة في كل سيناريو من السِّيناريوهات يُعطَى بالجدول التَّالي(٥):

الجدول (5) مُتوسّط أهمّيّة الرَّوابط البيئيَّة أو مُعدَّل الإعادة والتّكرار في الشَّبكة rl

القطاع الصناعي	إجمالي النفايات/التدفقات (طن)	A السيناريو (rl)	B السيناريو (rl)	C السيناريو (rl)
الصناعات الغذائية (عصائر/زيوت)	8,000	0.188 (1500/8000)	0.625 (5000/8000)	0.938 (7500/8000)
الصناعات الغذائية (ألبان)	3,500	0.143 (500/3500)	0.714 (2500/3500)	1.000 (3500/3500)
المياه الصناعية (ألبان)	2,000	0.000 (0/2000)	0.250 (500/2000)	1.000 (2000/2000)
صناعة الإسمنت والرخام	12,000	0.000 (0/12000)	0.667 (8000/12000)	1.000 (12000/12000)
الصناعات المعدنية (حديد)	9,000	0.000 (0/9000)	0.444 (4000/9000)	0.889 (8000/9000)
الصناعات الكيماوية/البلاستيكية	6,500	0.077 (500/6500)	0.615 (4000/6500)	0.923 (6000/6500)
الصناعات النسيجية	2,500	0.000 (0/2500)	0.600 (1500/2500)	0.880 (2200/2500)

النَّتائج والمُناقشة:

السيناريو A الوضع الحالي (تحسين محدود)

الافتراضات العملية لإعادة الاستخدام:

- يُعاد استخدام: ١,٥٠٠ طن عضويات غذائية، ٥٠٠ طن مصل ألبان، ٥٠٠ طن بلاستيك.
- باقي التدفقات تبقى نفايات.
- الروابط المفعلة: $L_e = 3$ عندئذ:

$$C_e = \frac{\frac{L_e}{S(s-1)}}{2} = \frac{3}{6 * \frac{5}{2}} = \frac{6}{30} = 0.2$$

$$\mathrm{EMI_I} = 1{,}500 \times 3 + 500 \times 2 + 500 \times 5 = 8{,}000$$

حيث أنَّ القيم ٢ و٣ و٥ في المعادلة السابقة هي ما يُسمى **معاملات الترجيح البيئي** ***(Environmental Impact Factors – D).***

$$\mathrm{EIMo} = (8000 - 1500) * 3 + (3500 - 500) * 2 + (2000 * 1) + (12000 * 4) + (9000 * 4) + (6000 * 5) + (2 * 2500) = 146500$$

وبالتَّالي:

$$\mathrm{ISI} = \frac{8000}{146500 + 1} = 0.05$$

وبعد حساب قيمة rl لكل قطاع من القطاعات الستة كانت النتائج بالشكل التالي (الجدول ٦):

الجدول (٦) نتائج حساب rl لكل قطاع من القطاعات

القطاع الصناعي	إجمالي النفايات (طن)	المعاد استخدامه (طن)	Ce	Cr
الصناعات الغذائية (عصائر/زيوت)	8,000	1,500	0.20	0.038
الصناعات الغذائية (ألبان)	3,500	500	0.20	0.029
المياه الصناعية (ألبان)	2,000	0	0.20	0.000
صناعة الإسمنت والرخام	12,000	0	0.20	0.000
الصناعات المعدنية (حديد)	9,000	0	0.20	0.000
الصناعات الكيماوية/البلاستيكية	6,500	500	0.20	0.015
الصناعات النسيجية	2,500	0	0.20	0.000

السيناريو B تحسين متوسط (توسيع الروابط)

الافتراضات العملية لإعادة الاستخدام:

- عضويات غذائية:ton ٥,٠٠٠ (هضم/أعلاف/سماد).
- ألبان: ton ٢,٥٠٠ مصل +m³ ٥٠٠ مياه (استخدامات ثانوية/معالجة).
- إسمنت/رخام: ton ٨,٠٠٠ غبار/كسر (دمج في خلطات/طرق).
- خبث معدني: ton ٤,٠٠٠ (إعادة صهر/إضافات).
- بلاستيك: ton ٤,٠٠٠ (تدوير).
- نسيج: ton ١,٥٠٠ (تدوير).
- الروابط المفعلة: $L_e = 8$ عندئذ:

$$C_e = \frac{\frac{L_e}{S(s-1)}}{2} = \frac{8}{6 * \frac{5}{2}} = \frac{16}{30} = 0.53$$

$$EMI_I = 15{,}000 + 5{,}000 + 500 + 32{,}000 + 16{,}000 + 20{,}000 + 3{,}000 = 91{,}500$$

$$EMI_o = 9{,}000 + 2{,}000 + 1{,}500 + 16{,}000 + 20{,}000 + 12{,}500 + 2{,}000 = 63{,}000$$

$$ISI = \frac{91500}{63000 + 1} = 1.452$$

وبعد حساب قيمة rl لكل قطاع من القطاعات الستة كانت النتائج بالشكل التالي(الجدول (7):

الجدول (7) نتائج rl لكل قطاع وفق السيناريو B

القطاع	إجمالي تدفّقاته (طن)	المعاد استخدامه (طن)	(Ce)	(CR)
غذائية (عصائر/زيوت)	8,000	5,000	0.533	0.333
غذائية (ألبان) – مصل	3,500	2,500	0.533	0.291
مياه صناعية (ألبان)	2,000	500	0.533	0.133
إسمنت/رخام (غبار/كسر)	12,000	8,000	0.533	0.356
معادن (خبث)	9,000	4,000	0.533	0.237
كيماوية/بلاستيك	6,500	4,000	0.533	0.328
نسيج	2,500	1,500	0.533	0.320

السيناريو C متقدم – (شبكة ناضجة)

الافتراضات العملية لإعادة الاستخدام:

- عضويات غذائية:ton 7,500
- ألبان (مصل): 3,500 ton +مياه صناعية m³ 2,000
- إسمنت/رخام (غبار/كسر):ton 12,000
- خبث معدني :ton 8,000
- بلاستيك. : 6,000 ton

- نسيج: 2,200 ton
- الروابط المُفعّلة: $L_e = 12$ عندئذ:

$$C_e = \frac{\frac{L_e}{S(s-1)}}{2} = \frac{12}{6 * \frac{5}{2}} = \frac{24}{30} = 0.8$$

$$EMI_I = 22{,}500 + 7{,}000 + 2{,}000 + 48{,}000 + 32{,}000 + 30{,}000 + 4{,}400 = 145900$$
$$EMI_o = 1{,}500 + 0 + 0 + 0 + 4{,}000 + 2{,}500 + 600 = 8600$$
$$ISI = \frac{145900}{8600 + 1} = 16.96$$

الجدول (٨) نتائج rl لكل قطاع وفق السيناريو C

القطاع	المعاد استخدامه	الإجمالي	*(rl)*	*(CR)*
غذائية/عصائر	**7,500**	**8,000**	**0.938**	**0.75**
ألبان (مصل)	**3,500**	**3,500**	**1.000**	**0.80**
إسمنت/رخام	**12,000**	**12,000**	**1.000**	**0.80**
خبث معدني	**8,000**	**9,000**	**0.889**	**0.711**
بلاستيك	**6,000**	**6,500**	**0.923**	**0.738**
نسيج	**2,200**	**2,500**	**0.880**	**0.704**

وبعد حساب قيمة rl لكل قطاع من القطاعات الستة كانت النتائج بالشكل التالي:

مقارنة بين السيناريوهات السابقة (الجدول٩)

البند	*(حالي) A السيناريو*	*(تحسين متوسط) B السيناريو*	*(متقدم) Cالسيناريو*
عدد القطاعات **(S)**	6	6	6
الروابط المفعّلة	3	8	12
الاتصالية	(3/15 = 0.20)	(0.533)	(12/15 = 0.80)
فوائد بيئية مرجّحة	8,000	91,500	145,900
أعباء بيئية مرجّحة	146,500	63,000	8,600
مؤشر **ISI**	(0.055)	(1.452)	(16.96)

المناقشة:

يُظهر تحليل تطبيق مؤشرات التكافل الصناعي في مدينة حسياء الصناعية أن الانتقال من الوضع الحالي إلى سيناريوهات أكثر تطورًا ينعكس مباشرة على قوة الشبكة الصناعية وكفاءتها البيئية. فعندما يكون التعاون محدودًا، تبقى الفوائد البيئية ضعيفة، وتظل كميات كبيرة من النفايات بلا استغلال. لكن مع التوسع في الروابط بين القطاعات الصناعية، يبدأ النظام الصناعي بالتحول من مجرد تجمّع مصانع متجاورة إلى شبكة مترابطة تتبادل المواد والطاقة، وتعيد إدماج المخرجات الثانوية في دورات إنتاجية جديدة **[٢٢،٢٣، ٢١]**.

تؤكد النتائج أن بناء شبكة ذات اتصالية مرتفعة يرفع من مرونة النظام الصناعي في مواجهة التقلبات الاقتصادية والبيئية، ويُحسّن من قدرته على تحويل النفايات من عبء إلى مورد. هذه الحالة تعني أن المصانع لم تعد وحدات منفصلة، بل أصبحت جزءاً من نظام بيئي صناعي تتغذى عناصره بعضها على البعض، مما يؤدي إلى خفض التكاليف البيئية، وتحقيق مكاسب اقتصادية مضافة، وتعزيز الاستدامة على المدى الطويل.

من منظور استراتيجي، فإن تطبيق التكافل الصناعي في حسياء يقدّم نموذجًا عمليًا يمكن أن يدعم سياسات التنمية

الصناعية الخضراء في سوريا، ويخلق ميزة تنافسية للمنطقة من خلال تحسين كفاءة الموارد وتقليل البصمة

الكربونية. كما أنّه يشكّل أساساً للتّحوّل نحو منتزه صناعي بيئي Eco- Industrial Park متكامل،

كما أنّه يشكل أساسًا للتحول نحو منتزه صناعي بيئي متكامل، وهو مايعتبر أحد الاتجاهات الحديثة في إدارة المناطق الصّناعيّة عالميًا **[٢٦، ٢٥، ١٠،٢٤]**.

الاستنتاجات:

- يمثل التكافل الصناعي أداة استراتيجية لتحقيق التنمية المستدامة، من خلال تقليل النفايات، تحسين كفاءة استخدام الموارد، وتعزيز التعاون بين المصانع.
- بينت مؤشرات التكافل، أن مدينة حسياء الصناعية، في سورية، تعتبر نموذجاً مهماً لدراسة التكافل الصناعي(Industrial Symbiosis) ، حيث تضم مئات المنشآت الصناعية في قطاعات متنوعة (الغذائية، الكيماوية، المعدنية، النسيجية).
- أثبتت النتائج نجاح وتفوق السيناريو الجديد المقترح، والمسمى نموذج الديناميكيات الاجتماعية والتنظيمية.
- أعطى حساب مؤشر التكافل الصناعي **ISI** وفق السيناريو A الوضع الحالي (تحسين محدود)، قيمة منخفضة.
- تمّ الحصول على مؤشر تكافل الصناعي الأعلى (Industrial Symbiosis Indicator – **ISI**) في حالة السيناريو الثالث: السيناريو C متقدم – (شبكة ناضجة).

تُبرز نتائج الدّراسة أهمّيّة التّكافُل الصّناعي كاستراتيجيَّة فعَّالة لتَعزيز الاستدامة في المُدُن الصّناعيَّة، ممَّا يُتيح

لصنَّاع السّياسات اتّخاذ قرارات مُستنيرة تدعم تحسين الأداء البيئي والاقتصادي. من خلال الاعتماد على مُؤشّرات التَّكافُل، يمكن للمُدراء تعزيز التَّعاون بينَ المُنشآت، ممَّا يُساعد في تقليل النّفايات وزيادة كفاءَة استخدام الموارد، وبالتَّالي تحقيق تنمية صناعيَّة مُتكاملة ومُستدامة.

التَّوصيات:

- يوصى بإنشاء وحدة تنسيق للتكافل الصناعي (IS Coordination Unit) تابعة لمديرية المدينة الصناعية. يجب أن تكون مهمتها الرئيسية هي تذليل العوائق التنظيمية، ومراقبة تدفقات الموارد، وتسهيل المفاوضات بين الشركات لترجمة هذه الإمكانات التقنية إلى مشاريع تكافلية ناجحة على أرض الواقع.

- التوجه في المدينة الصناعية بحسياء، نحو التعلّم المحلي (Local Learning) ونشر الثقافة التعاونية بين المصانع، لما لهُما من تأثير على استقرار ومرونة شبكة التكافل، وكيف أن مجرد تقليد السلوكيات الإيجابية يمكن أن يتجاوز في تأثيره، بعض التكاليف الباهظة للأنظمة التكنولوجية المعقدة.

References:

[1] A. NEVES, R. GODINA, S. G. AZEVEDO, AND J. C. MATIAS, "A comprehensive review of industrial symbiosis," *J. Cleaner Prod.*, vol. 247, p. 119113, 2020.

[2] J. L. WALLS AND R. L. PAQUIN, "Organizational perspectives of industrial symbiosis: A review and synthesis," *Organ. Environ.*, vol. 28, no. 1, pp. 32–53, 2015.

[3] B. BALDASSARRE, M. SCHEPERS, N. BOCKEN, E. CUPPEN, G. KOREVAAR, AND G. CALABRETTA, "Industrial Symbiosis: towards a design process for eco-industrial clusters by integrating Circular Economy and Industrial Ecology perspectives," *J. Cleaner Prod.*, vol. 216, pp. 446–460, 2019.

[4] D. SAKR, L. BAAS, S. EL-HAGGAR, AND D. HUISINGH, "Critical success and limiting factors for eco-industrial parks: global trends and Egyptian context," *J. Cleaner Prod.*, vol. 19, no. 11, pp. 1158–1169, 2011.

[5] J. UUSIKARTANO, H. VÄYRYNEN, AND L. AARIKKA-STENROOS, "Public actors and their diverse roles in eco-industrial parks: A multiple-case study," *J. Cleaner Prod.*, vol. 296, p. 126463, 2021.

[6] M. FELICIO, D. AMARAL, K. ESPOSTO, AND X. G. DURANY, "Industrial symbiosis indicators to manage eco-industrial parks as dynamic systems," *J. Cleaner Prod.*, vol. 118, pp. 54–64, 2016.

[7] G. C. MANTESE AND D. C. AMARAL, "Agent-based simulation to evaluate and categorize industrial symbiosis indicators," *J. Cleaner Prod.*, vol. 186, pp. 450–464, 2018.

[8] G. C. MANTESE AND D. C. AMARAL, "Comparison of industrial symbiosis indicators through agent-based modeling," *J. Cleaner Prod.*, vol. 140, pp. 1652–1671, 2017.

[9] H. M. IBRAHIM, "Water integration between industries within the framework of environmental planning for industrial zones," Master's thesis, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria, 2019 **(in Arabic).**

[10] S. AL-QURADAGHI, Q. P. ZHENG, & A. EL KAMEL, "Generalized framework for the design of eco-industrial parks: Case study of end-of-life vehicles," *Sustainability*, vol. 12, no. 16, p. 6612, 2020.

[11] H. AFSHARI, B. M. TOSARKANI, M. Y. JABER, AND C. J. R. SEARCY, "The effect of environmental and social value objectives on optimal design in industrial energy symbiosis: A multi-objective approach," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 158, p. 104825, 2020.

[12] T. A. BRANCA, V. COLLA, D. ALGERMISSEN, H. GRANBOM, U. MARTINI, A. MORILLON, R. PIETRUCK, AND S. ROSENDAHL, "Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe," *Mater.*, vol. 10, no. 3, p. 345, 2020.

[13] M. DEMARTINI, F. TONELLI, K. GOVINDAN, AND S. CHAIN, "An investigation into modelling approaches for industrial symbiosis: A literature review and research agenda," *Cleaner Logist. Supply Chain*, vol. 3, p. 100020, 2022.

[14] I. A. FERREIRA, R. GODINA, AND H. CARVALHO, "Waste valorization through additive manufacturing in an industrial symbiosis setting," *Sustainability*, vol. 13, no. 1, p. 234, 2020.

[15] J. HENRIQUES, P. FERRÃO, R. CASTRO, AND J. AZEVEDO, "Industrial symbiosis: A sectoral analysis on enablers and barriers," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 1723, 2021.

[16] R. VAN BERKEL, "Quantifying sustainability benefits of industrial symbioses," *J. Ind. Ecol.*, vol. 14, no. 3, pp. 371–373, 2010.

[17] G. HERCZEG, R. AKKERMAN, AND M. Z. HAUSCHILD, "Supply chain collaboration in industrial symbiosis networks," *J. Cleaner Prod.*, vol. 171, pp. 1058–1067, 2018.

[18] Y. JI, Z. LIU, J. WU, Y. HE, AND H. XU, "Which factors promote or inhibit enterprises' participation in industrial symbiosis? An analytical approach and a case study in China," *J. Cleaner Prod.*, vol. 244, p. 118600, 2020.

[19] R. TADDEO, A. SIMBOLI, A. MORGANTE, AND S. ERKMAN, "The development of industrial symbiosis in existing contexts. Experiences from three Italian clusters," *Ecol. Econ.*, vol. 139, pp. 55–67, 2017.

[20] M. LAWAL, S. R. W. ALWI, Z. A. MANAN, AND W. S. HO, "Industrial symbiosis tools—A review," *J. Cleaner Prod.*, vol. 280, p. 124327, 2021

[21] F. BOONS, M. CHERTOW, J. PARK, W. SPEKKINK, AND H. SHI, "INdustrial symbiosis dynamics and the problem of equivalence: Proposal for a comparative framework," *J. Ind. Ecol.*, vol. 21, no. 4, pp. 938–952, 2017.

[22] L. SHI AND M. CHERTOW, "Organizational boundary change in industrial symbiosis: Revisiting the Guitang Group in China," *Sustainability*, vol. 9, no. 7, p. 1085, 2017.

[23] X. ZHANG AND L. CHAI, "Structural features and evolutionary mechanisms of industrial symbiosis networks: Comparable analyses of two different cases," *J. Cleaner Prod.*, vol. 213, pp. 528–539, 2019.

[24] R. LYBÆK, T. B. CHRISTENSEN, AND T. P. THOMSEN, "Enhancing policies for deployment of Industrial symbiosis–What are the obstacles, drivers and future way forward?" *J. Cleaner Prod.*, vol. 280, p. 124351, 2021.

[25] K. SÖDERGREN AND J. PALM, "The role of local governments in overcoming barriers to industrial symbiosis," *Cleaner Environ. Syst.*, vol. 2, p. 100014, 2021.

[26] Y. TAO, S. EVANS, Z. WEN, AND M. MA, "The influence of policy on industrial symbiosis from the Firm's perspective: A framework," *J. Cleaner Prod.*, vol. 213, pp. 1172–1187, 2019.

[27] S. JAKOBSEN AND M. STEINMO, "Drivers and barriers for industrial symbiosis: the case of Mo Industrial Park," in *Research Handbook on Industrial Symbiosis for a Circular Economy*, 2021, p. 144.

[28] K. JAMALUDDIN, S. R. W. ALWI, Z. A. MANAN, K. HAMZAH, AND J. KLEMEŠ, "A process integration method for Total Site Cooling, Heating and Power Optimisation with trigeneration systems," *J. Energy*, vol. 12, no. 6, p. 1030, 2019.

[29] J. Klemeš, V. R. Dhole, K. Raissi, S. J. Perry, and L. PUIGJANER, "Targeting and design methodology for reduction of fuel, power and CO2 on total sites," *Appl. Thermal Eng.*, vol. 17, no. 8-10, pp. 993–1003, 1997.

[30] J. J. KLEMEŠ, P. S. VARBANOV, T. G. WALMSLEY, AND X. JIA, "New directions in the implementation of Pinch Methodology (PM)," *Renewable Sustain. Energy Rev.*, vol. 98, pp. 439–468, 2018.

[31] J. J. KLEMEŠ, P. S. VARBANOV, Y. V. FAN, AND H. L. LAMB, "Twenty years of PRES: past, present and future–process integration towards sustainability," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 61, pp. 1–24, 2017.

[32] J. KORHONEN, "Four ecosystem principles for an industrial ecosystem," *J. Cleaner Prod.*, vol. 9, no. 3, pp. 253–259, 2001.

.

[33] M. LEIGH AND X. LI, "Industrial ecology, industrial symbiosis and supply chain environmental sustainability: a case study of a large UK distributor," *J. Cleaner Prod.*, vol. 106, pp. 632–643, 2015.

[34] I. MACLACHLAN, "Kwinana Industrial Area: agglomeration economies and industrial symbiosis on Western Australia's Cockburn Sound," *Appl. Geogr.*, vol. 44, no. 4, pp. 383–400, 2013.

[35] Z. A. MANAN, W. N. R. M. NAWI, S. R. W. ALWI, AND J. KLEMEŠ, "Advances in Process Integration research for CO2 emission reduction–A review," *J. Cleaner Prod.*, vol. 167, pp. 1–13, 2017.

[36] S. NOORI, G. KOREVAAR, AND A. R. RAMIREZ, "Assessing industrial symbiosis potential in Emerging Industrial Clusters: The case of Persian Gulf Mining and metal industries special economic zone," *J. Cleaner Prod.*, vol. 280, p. 124765, 2021.

[37] R. R. TAN, S. BANDYOPADHYAY, AND D. C. FOO, "Graphical pinch analysis for planning biochar-based carbon management networks," *Process Integr. Optim. Sustain.*, vol. 2, pp. 159–168, 2018.

[38] H. M. M. TAQI, E. J. MEEM, P. BHATTACHARJEE, S. SALMAN, S. M. ALI, AND B. SANKARANARAYANAN, "What are the challenges that make the

journey towards industrial symbiosis complicated?" *J. Cleaner Prod.*, vol. 370, p. 133384, 2022.

[39] S. Y. TAYA, N. E. M. ROZALIA, S. R. W. ALWI, W. S. HO, Z. A. MANAN, AND J. KLEMEŠ, "Design of grid-tied hybrid diesel-renewable energy systems using power pinch analysis," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 78, 2020.

[40] Q. WANG, H. TANG, X. YUAN, J. ZUO, J. ZHANG, Z. GAO, AND J. HONG, "Investigating vulnerability of ecological industrial symbiosis network based on automatic control theory," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 25, pp. 27321–27333, 2018.