https://jsras.rcc.edu.ly/
Vol.3 No.2 (2026), 251-260
Article history:
Received: 15/6/2026
Accepted: 15/7/2026
Published: 8/9/2026

Journal of Sustainable Research in Applied Sciences

JSRAS

Environmental Sustainability Assessment of Biofuel Use in Internal Combustion Engines: An Integrated Study of Performance, Energy Efficiency, and Emissions

Abd Elati Almahdi Matar [1,*], abdulatimtr@gmail.com , https://orcid.org/0009-0006-6814-8468
Mustafa Ahmed Ben Hkoma[2], m_hkoma2017@yahoo.com
[1] Libyan Center for Sustainable Development Research.
[2] Sustainable Development Research.
DOI https://doi.org/10.36602/jsras.2026.3.2.23
Corresponding author * abdulatimtr@gmail.com

Index Terms

Biofuels; Internal Combustion Engines; Energy Efficiency; Environmental Emissions; Environmental Sustainability .

Abstract

This study aimed to evaluate the environmental sustainability of biofuel use in internal combustion engines through an integrated analysis of engine performance, energy efficiency, and environmental emissions. A descriptive-analytical approach based on a critical comparative review of scientific literature published between 2020 and 2025 was adopted. The evidence was organized into five interconnected dimensions: biofuel characteristics, engine performance, energy efficiency, environmental emissions, and environmental sustainability from a life-cycle perspective. The findings indicate that biofuels, particularly biodiesel and its blends, can under specific operating conditions maintain performance levels relatively close to those of conventional fuels while reducing carbon monoxide, unburned hydrocarbons, smoke, and particulate emissions. However, the evidence concerning nitrogen oxides, energy efficiency, and specific fuel consumption remains heterogeneous and is strongly influenced by fuel properties, blending ratio, engine configuration, and operating conditions. The analysis further demonstrates that reductions in tailpipe emissions alone are insufficient to establish environmental sustainability because environmental burdens may arise during feedstock production, processing, conversion, and transportation. The study therefore concludes that biofuel sustainability is conditional and multidimensional rather than absolute. A robust assessment should integrate fuel characteristics, combustion behavior, engine performance, energy efficiency, emissions, and life-cycle environmental impacts. The study recommends optimizing fuel blends and combustion-control strategies and integrating experimental engine assessment with life-cycle assessment to support more informed decisions regarding sustainable biofuel deployment.

تقييم الاستدامة البيئية لاستخدام الوقود الحيوي في تشغيل محركات الاحتراق الداخلي: دراسة متكاملة للأداء وكفاءة الطاقة والانبعاثات

عبد العطي المهدي مطر [1]،* abdulatimtr@gmail.com ، https://orcid.org/0009-0006-6814-8468
مصطفى أحمد بن حكومة [2]، m_hkoma2017@yahoo.com
[1] المركز الليبي لأبحاث التنمية المستدامة
[2] مركز أبحاث التنمية المستدامة
DOI https://doi.org/10.36602/jsras.2026.3.2.23
* المراسل abdulatimtr@gmail.co

الكلمات المفتاحية

الوقود الحيوي؛ محركات الاحتراق الداخلي؛ كفاءة الطاقة؛ الانبعاثات البيئية؛ الاستدامة البيئية.

الملخص

هدفت الدراسة إلى تقييم الاستدامة البيئية لاستخدام الوقود الحيوي في تشغيل محركات الاحتراق الداخلي من خلال تحليل متكامل للأداء التشغيلي وكفاءة الطاقة والانبعاثات البيئية. واعتمدت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي القائم على المراجعة النقدية المقارنة للأدبيات العلمية المنشورة خلال الفترة 2020–2025، مع تنظيم الأدلة ضمن خمسة محاور شملت خصائص الوقود الحيوي، وأداء المحركات، وكفاءة الطاقة، والانبعاثات، والاستدامة البيئية وتقييم دورة الحياة .وأظهرت النتائج أن الوقود الحيوي، وخاصة الديزل الحيوي ومزائجه، يمكن أن يحافظ في ظروف محددة على مستويات تشغيلية قريبة من الوقود التقليدي، مع إمكانية خفض انبعاثات أول أكسيد الكربون والهيدروكربونات غير المحترقة والدخان والجسيمات. في المقابل، أظهرت النتائج تباينًا في انبعاثات أكاسيد النيتروجين وكفاءة الطاقة والاستهلاك النوعي للوقود، تبعًا لخصائص الوقود ونسبة المزج وتصميم المحرك وظروف التشغيل. كما بينت الدراسة أن انخفاض انبعاثات العادم لا يمثل بمفرده دليلًا كافيًا على الاستدامة، نظرًا إلى الأعباء البيئية المحتملة المرتبطة بإنتاج المادة الخام وتحويلها ونقلها. وخلصت الدراسة إلى أن استدامة الوقود الحيوي شرطية ومتعددة الأبعاد، وأن تقييمه ينبغي أن يستند إلى التكامل بين خصائص الوقود والاحتراق وأداء المحرك وكفاءة الطاقة والانبعاثات والأثر البيئي عبر دورة الحياة. وتوصي الدراسة بتطوير استراتيجيات متكاملة لتحسين نسب المزج وتقنيات الاحتراق والتحكم، وربط الاختبارات التجريبية بتقييم دورة الحياة لدعم اختيار بدائل الوقود الأكثر استدامة .

1. المقدمة

يشهد قطاع الطاقة العالمي تحولًا متزايدًا نحو البحث عن بدائل أكثر استدامة للوقود الأحفوري، في ظل تزايد الضغوط المرتبطة بتغير المناخ، ونمو الطلب على الطاقة، والحاجة إلى خفض الانبعاثات الناتجة عن الأنشطة الاقتصادية وقطاع النقل على وجه الخصوص. وعلى الرغم من التوسع المتسارع في تقنيات الكهرباء والطاقة المتجددة، فإن محركات الاحتراق الداخلي لا تزال تشكل جزءًا مهمًا من منظومات النقل والطاقة، الأمر الذي يجعل تحسين استدامة الوقود المستخدم فيها مسارًا موازيًا للتحول الطاقي. وفي هذا السياق برز الوقود الحيوي باعتباره أحد البدائل منخفضة الكربون التي يمكن أن تسهم في تقليل الاعتماد على المصادر الأحفورية، مع إمكانية استخدام بعض أنواعه ومزائجه ضمن البنية التشغيلية القائمة للمحركات (Jeswani et al., 2020; Altarazi et al., 2022).

ويتميز الوقود الحيوي بتنوع مصادره ومسارات إنتاجه؛ إذ يمكن الحصول عليه من الزيوت النباتية والدهون والمخلفات الزراعية وزيوت الطهي المستعملة والمواد اللجنوسليلوزية والطحالب وغيرها من الموارد الحيوية. وقد تطورت هذه الصناعة من الوقود الحيوي من الجيل الأول المعتمد بدرجة كبيرة على المحاصيل الغذائية إلى أجيال أكثر تقدمًا تسعى إلى استغلال المواد غير الغذائية والمخلفات والطحالب، بما يحد من بعض الإشكالات المرتبطة بالمنافسة على الأراضي والغذاء. ومع ذلك، فإن كون المادة الخام متجددة لا يعني بالضرورة أن الوقود الناتج عنها مستدام بيئيًا في جميع الحالات؛ إذ تتأثر النتيجة النهائية بمصدر المادة الخام، وتقنية التحويل، والطاقة المستخدمة في الإنتاج، والنقل والاستخدام النهائي (Jeswani et al., 2020; Srikumar et al., 2024).

ومن الناحية الهندسية، تتحدد ملاءمة الوقود الحيوي لمحركات الاحتراق الداخلي بدرجة كبيرة من خلال خصائصه الفيزيائية والكيميائية. فالكثافة واللزوجة والقيمة الحرارية ورقم السيتان ومحتوى الأكسجين وخصائص التطاير تؤثر بصورة مباشرة في الحقن وتكوين الرذاذ والتبخر وتأخر الاشتعال ومعدل الاحتراق. ولذلك لا يمكن التعامل مع جميع أنواع الوقود الحيوي باعتبارها متشابهة في سلوكها داخل المحرك؛ إذ يمكن أن تؤدي الاختلافات في المادة الخام والتركيب الكيميائي ونسبة المزج إلى نتائج متباينة في القدرة والعزم والكفاءة الحرارية واستهلاك الوقود. وقد أكد Verma et al. (2021)أن العلاقة بين خصائص الديزل الحيوي وأداء المحرك والانبعاثات علاقة مترابطة، وهو ما يجعل توصيف الوقود خطوة أساسية قبل الحكم على كفاءته التشغيلية أو البيئية .

ويُعد أداء محرك الاحتراق الداخلي أحد المعايير الرئيسة للحكم على الجدوى العملية لاستخدام الوقود الحيوي؛ فالبديل المستدام ينبغي ألا يحقق خفضًا في الانبعاثات على حساب تراجع جوهري في القدرة أو الكفاءة التشغيلية. وتشير الأدبيات إلى أن الديزل الحيوي ومزائجه يمتلكان قابلية عملية للاستخدام في عدد من تطبيقات المحركات، إلا أن النتائج تتباين باختلاف مصدر الوقود ونسبة المزج وتصميم المحرك والحمل وظروف التشغيل. كما أن انخفاض القيمة الحرارية لبعض أنواع الوقود الحيوي قد يؤدي إلى ارتفاع نسبي في كمية الوقود المطلوبة، في حين يمكن لمحتواه الأكسجيني أن يدعم اكتمال الاحتراق في ظروف معينة. ولذلك فإن تقييم الأداء يتطلب قراءة مشتركة لمؤشرات القدرة والعزم والاستهلاك النوعي والكفاءة الحرارية بدلًا من الاعتماد على مؤشر منفرد (Altarazi et al., 2022; Xiong et al., 2024)

وترتبط بذلك قضية كفاءة الطاقة التي تمثل حلقة مركزية بين خصائص الوقود والأداء والاستدامة. فزيادة الاعتماد على الوقود الحيوي لا تحقق منفعة طاقية حقيقية إذا كانت الطاقة المستهلكة في إنتاجه أو الكمية اللازمة لتشغيل المحرك مرتفعة بصورة تفوق المكاسب المتحققة منه. وتتأثر الكفاءة الحرارية والاستهلاك النوعي للوقود بمحتوى الطاقة واللزوجة والكثافة وخصائص الاشتعال، فضلًا عن ظروف الحمل والسرعة وتوقيت الحقن ونسبة المزج. ومن ثم، تتجه الدراسات الحديثة نحو تحسين منظومة الوقود–المحرك بصورة متكاملة بدلًا من البحث عن وقود بديل يُفترض تفوقه المطلق على الوقود التقليدي، خاصة أن المزيج الذي يقدم أفضل أداء عند ظروف تشغيل معينة قد لا يحافظ على الميزة نفسها عند تغير الحمل أو السرعة (Verma et al., 2021; Xiong et al., 2024)

وفي الجانب البيئي، يمثل خفض انبعاثات محركات الاحتراق الداخلي أحد أهم المبررات لتطوير الوقود الحيوي. وتشير نتائج العديد من الدراسات إلى إمكان تحقيق انخفاض في بعض نواتج الاحتراق غير الكامل، مثل أول أكسيد الكربون(CO) ، والهيدروكربونات غير المحترقة (HC)، والدخان والجسيمات، ويرتبط ذلك جزئيًا بوجود الأكسجين في التركيب الجزيئي لبعض أنواع الوقود الحيوي. إلا أن الصورة ليست متجانسة بالنسبة لجميع الملوثات؛ إذ تتأثر أكاسيد النيتروجين (NOx) بدرجات حرارة الاحتراق وتركيز الأكسجين وتوقيت الاشتعال وغيرها من العوامل، ولذلك جاءت نتائج الدراسات بشأنها متفاوتة. ويعني ذلك أن الحكم على الأداء البيئي ينبغي أن يقوم على المحصلة الكلية للانبعاثات، لا على الانخفاض في ملوث واحد بمعزل عن بقية المؤشرات(Altarazi et al., 2022; Verma et al., 2021)

غير أن تقييم الاستدامة البيئية للوقود الحيوي لا ينبغي أن يتوقف عند حدود أنبوب العادم؛ فالانبعاثات الناتجة أثناء تشغيل المحرك تمثل مرحلة واحدة فقط من دورة حياة الوقود. وتوضح دراسات تقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment – LCA)أن النتائج البيئية تتأثر بإنتاج المادة الخام ومعالجتها ونقلها وتحويلها إلى وقود، فضلًا عن استخدام المياه والطاقة والأراضي والمواد الكيميائية. وقد خلص Jeswani et al. (2020)، استنادًا إلى مراجعة واسعة لدراسات دورة الحياة، إلى وجود تباين كبير في الآثار البيئية لأنواع الوقود الحيوي باختلاف المواد الخام ومسارات الإنتاج والافتراضات المنهجية. كما يؤكد Srikumar et al. (2024)أن اختيار المادة الخام والمحفز وتقنية إنتاج الديزل الحيوي يمكن أن يغير بصورة جوهرية حصيلته البيئية. ومن ثم، فإن وصف الوقود الحيوي بأنه مستدام لمجرد كونه متجدد المصدر يمثل تبسيطًا لا يعكس التعقيد الفعلي لمنظومة إنتاجه واستخدامه

وانطلاقًا من ذلك، تتضح الحاجة إلى تجاوز المقارنات الجزئية التي تفصل أداء المحرك عن كفاءة الطاقة أو الانبعاثات، والانتقال نحو تقييم متكامل للاستدامة البيئية يدرس التفاعل بين هذه الأبعاد في إطار واحد. فالوقود الحيوي الأكثر استدامة ليس بالضرورة الوقود الذي يحقق أعلى قدرة للمحرك أو أدنى انبعاث منفرد، وإنما الذي يقدم توازنًا أفضل بين الأداء التشغيلي، وكفاءة استهلاك الطاقة، والحد من الملوثات، وتقليل الأعباء البيئية على امتداد دورة الحياة. وفي هذا الإطار تأتي الدراسة الحالية لتقييم الاستدامة البيئية لاستخدام الوقود الحيوي في تشغيل محركات الاحتراق الداخلي من خلال دمج مؤشرات الأداء، وكفاءة الطاقة، والانبعاثات البيئية في منظور تحليلي مترابط، بما يوفر أساسًا علميًا أكثر شمولًا للحكم على إمكانات الوقود الحيوي ودوره في دعم التحول نحو نظم نقل وطاقة أكثر استدامة. ويتسق ذلك مباشرة مع مشكلة الدراسة وتساؤلاتها التي تربط بين هذه الأبعاد الثلاثة بدلًا من تقييم كل منها بمعزل عن الآخر

وتساؤلاتها الدراسة مشكلة

على الرغم من التوسع المتزايد في استخدام الوقود الحيوي بوصفه أحد البدائل الواعدة للوقود الأحفوري في قطاع النقل، فإن نتائج الدراسات السابقة لا تزال متباينة بشأن تأثيره في الأداء التشغيلي لمحركات الاحتراق الداخلي وكفاءة الطاقة ومستويات الانبعاثات الملوثة .ويرجع ذلك إلى اختلاف أنواع الوقود الحيوي، وخصائص المحركات، وظروف التشغيل، ومنهجيات التقييم المستخدمة، مما يجعل من الصعب الوصول إلى تصور علمي متكامل حول مدى استدامة استخدام الوقود الحيوي من المنظور البيئي .كما أن معظم الدراسات ركزت على أحد هذه الجوانب بصورة منفصلة، في حين لا تزال الدراسات التي تدمج بين تقييم الأداء وكفاءة الطاقة والانبعاثات ضمن إطار شامل للاستدامة البيئية محدودة .ومن ثم، تتمثل مشكلة الدراسة في الحاجة إلى إجراء تقييم متكامل للاستدامة البيئية لاستخدام الوقود الحيوي في تشغيل محركات الاحتراق الداخلي، بما يوضح العلاقة بين الأداء التشغيلي وكفاءة الطاقة والانبعاثات، ويسهم في دعم القرارات المتعلقة بتطوير تقنيات الوقود الحيوي وتعزيز تطبيقاته في قطاع النقل المستدام.

ويمكن صياغة مشكلة الدراسة في التساؤل الرئيس التالي:

ما مدى الاستدامة البيئية لاستخدام الوقود الحيوي في تشغيل محركات الاحتراق الداخلي في ضوء الأداء التشغيلي وكفاءة الطاقة والانبعاثات؟

ويتفرع عن التساؤلات التالية :

1. ما أثر استخدام الوقود الحيوي في الأداء التشغيلي لمحركات الاحتراق الداخلي مقارنة بالوقود التقليدي؟
2. كيف يؤثر الوقود الحيوي في كفاءة الطاقة ومعدل استهلاك الوقود في محركات الاحتراق الداخلي؟
3. ما أثر استخدام الوقود الحيوي في انبعاثات الملوثات الرئيسة الصادرة عن محركات الاحتراق الداخلي؟
4. ما العلاقة بين الأداء التشغيلي وكفاءة الطاقة والانبعاثات في تحديد مستوى الاستدامة البيئية للوقود الحيوي؟
5. ما مدى إمكانية الاعتماد على الوقود الحيوي بوصفه خيارًا مستدامًا لتحقيق أهداف خفض الانبعاثات وتعزيز استدامة قطاع النقل؟

2. أهمية الدراسة

تستمد هذه الدراسة أهميتها من كونها تقدم تقييماً متكاملاً للاستدامة البيئية لاستخدام الوقود الحيوي في تشغيل محركات الاحتراق الداخلي، من خلال دمج ثلاثة محاور رئيسية هي الأداء التشغيلي وكفاءة الطاقة والانبعاثات ضمن إطار تحليلي موحد. كما تسهم في سد فجوة معرفية في الأدبيات العلمية، وتوفر أساساً علمياً يدعم تطوير تقنيات الوقود الحيوي وصنع السياسات الهادفة إلى خفض الانبعاثات وتحقيق الاستدامة في قطاع النقل .

3. أهداف الدراسة

1. تقييم تأثير استخدام الوقود الحيوي في الأداء التشغيلي لمحركات الاحتراق الداخلي.
2. تحليل أثر الوقود الحيوي في كفاءة الطاقة ومعدل استهلاك الوقود.
3. تقييم تأثير الوقود الحيوي في انبعاثات الملوثات الرئيسة.
4. دراسة العلاقة بين الأداء وكفاءة الطاقة والانبعاثات في تحديد مستوى الاستدامة البيئية.
5. اقتراح إطار تقييمي متكامل لدعم اتخاذ القرار بشأن استخدام الوقود الحيوي.

4. الإطار النظري للدراسة

يرتكز الإطار النظري للدراسة على خمسة محاور مترابطة تمثل السلسلة العلمية اللازمة لفهم أثر استخدام الوقود الحيوي في محركات الاحتراق الداخلي؛ إذ يبدأ بتحليل الوقود الحيوي من حيث مصادره وخصائصه، ثم ينتقل إلى تفسير استجابة المحرك له من حيث الأداء والاحتراق، وبعد ذلك يناقش كفاءة تحويل الطاقة واستهلاك الوقود، وصولًا إلى الانبعاثات الناتجة، ثم يضع هذه النتائج ضمن منظور أشمل للاستدامة البيئية وتقييم دورة الحياة. وتكمن أهمية هذا البناء في أن الحكم على جدوى الوقود الحيوي لا ينبغي أن يعتمد على مؤشر منفرد، مثل انخفاض أحد الملوثات، وإنما على الموازنة بين خصائص الوقود، وأداء المحرك، وكفاءة الطاقة، والانبعاثات، والأثر البيئي الكلي عبر دورة الحياة .وتؤكد الأدبيات الحديثة أن هذه العلاقات ليست خطية أو ثابتة؛ بل تختلف باختلاف نوع الوقود الحيوي، ونسبة الخلط، ومصدر المادة الخام، وتصميم المحرك، وظروف التشغيل وتقنيات الاحتراق والمعالجة اللاحقة (Verma et al., 2021; Altarazi et al., 2022; Xiong et al., 2024).

المحور الأول: الوقود الحيوي Biofuels

يشير الوقود الحيوي إلى أنواع الوقود المنتجة كليًا أو جزئيًا من الكتلة الحيوية ومصادرها العضوية المتجددة، مثل المحاصيل الزراعية والزيوت النباتية والدهون الحيوانية والمخلفات الزراعية وزيوت الطهي المستعملة والطحالب والمواد اللجنوسليلوزية. وقد اكتسب هذا النوع من الوقود أهمية متزايدة باعتباره أحد البدائل الممكنة لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، ولا سيما في قطاع النقل ومحركات الاحتراق الداخلي. ولا تعود أهمية الوقود الحيوي إلى كونه مصدرًا متجددًا فحسب، بل إلى إمكانية دمجه بدرجات متفاوتة مع البنية التحتية القائمة للوقود والمحركات، وهو ما يمنحه ميزة انتقالية مقارنة ببعض بدائل الطاقة التي تحتاج إلى تغيير جذري في منظومات التشغيل (Altarazi et al., 2022; Xiong et al., 2024).

ويمكن النظر إلى الوقود الحيوي وفق أجيال متعاقبة تعكس تطور المواد الأولية وتقنيات الإنتاج. يرتبط الجيل الأول أساسًا بالمحاصيل الغذائية والزيوت الصالحة للأكل، في حين يعتمد الجيل الثاني على المواد غير الغذائية والمخلفات والزيوت المستعملة والكتلة اللجنوسليلوزية، بينما يرتبط الجيل الثالث بصورة أكبر بالطحالب والموارد الحيوية المتقدمة. وتتناول بعض التصنيفات الحديثة جيلًا رابعًا يرتبط بالتقنيات الحيوية المتقدمة ومسارات إنتاج أكثر قدرة على خفض البصمة الكربونية. ولا يعني هذا التصنيف أن الأجيال الأحدث تتفوق تلقائيًا في جميع المؤشرات، لأن الحكم البيئي والطاقي يتطلب تقييم سلسلة الإنتاج كاملة (Verma et al., 2021)

ومن أكثر الأنواع ارتباطًا بمحركات الاحتراق الداخلي الديزل الحيوي (Biodiesel)والإيثانول الحيوي (Bioethanol) وغيرها من الكحولات الحيوية والزيوت الحيوية. ويتكون الديزل الحيوي أساسًا من إسترات الأحماض الدهنية، ويُنتج عادةً بتحويل الزيوت والدهون عبر عمليات مثل الأسترة أو الأسترة التبادلية. وقد أدى استخدام زيوت الطهي المستعملة والمواد الخام غير الغذائية إلى تعزيز البعد الدائري لإنتاجه؛ إذ يمكن تحويل تدفقات من المخلفات إلى مورد للطاقة بدلًا من التخلص منها بطرق قد تخلق أعباء بيئية إضافية(Pikula et al., 2020)

وتؤدي الخصائص الفيزيائية والكيميائية للوقود دورًا حاسمًا في تحديد سلوكه داخل المحرك. ومن أهم هذه الخصائص الكثافة، واللزوجة، والقيمة الحرارية، ورقم السيتان، ومحتوى الأكسجين، ونقطة الوميض، وخصائص التطاير والرش .فالاختلاف بين الديزل الحيوي والديزل التقليدي في هذه الخصائص ينعكس على تكوين الرذاذ، والتبخر، وتأخر الاشتعال، وسرعة الاحتراق وانتقال الحرارة. وقد بين Verma et al. (2021) أن خصائص الديزل الحيوي ليست متجانسة، بل تختلف بدرجة ملحوظة تبعًا للمادة الخام والتركيب الجزيئي، وهو ما يفسر جانبًا من التباين بين نتائج الدراسات التجريبية .

ويتميز الديزل الحيوي باحتوائه على الأكسجين ضمن تركيبه الجزيئي وبقابليته للتحلل الحيوي، كما أن استخدام بعض مواده الخام، خصوصًا المخلفات والزيوت غير الغذائية، يمكن أن يحد من الضغوط المرتبطة باستخدام المحاصيل الغذائية لإنتاج الطاقة. ومع ذلك، فإن التحديات تشمل انخفاض القيمة الحرارية لبعض أنواع الوقود الحيوي مقارنة بالديزل، وارتفاع اللزوجة في بعض الحالات، وقضايا الاستقرار التأكسدي والتخزين والتكلفة، إضافة إلى الآثار المرتبطة بإنتاج المادة الخام نفسها. ولذلك فإن وصف الوقود الحيوي بأنه «وقود نظيف» بصورة مطلقة لا يعكس التعقيد الفعلي؛ فميزته البيئية تتوقف على نوع المادة الخام وطريقة الإنتاج والمزيج المستخدم وظروف الاحتراق ودورة الحياة بأكملها (Jeswani et al., 2020; Srikumar et al., 2024).

المحور الثاني: أداء محركات الاحتراق الداخلي

يمثل أداء محرك الاحتراق الداخلي الحلقة التي تتحول عندها الخصائص النظرية للوقود الحيوي إلى نتائج تشغيلية قابلة للقياس. ويُقصد بأداء المحرك قدرته على تحويل الطاقة الكيميائية المخزنة في الوقود إلى طاقة ميكانيكية مفيدة في ظل مستويات مقبولة من استهلاك الوقود والانبعاثات والاستقرار التشغيلي. ولذلك لا يكفي إثبات إمكانية تشغيل المحرك بالوقود الحيوي، بل يجب تحديد كيفية تأثيره في القدرة، والعزم، والكفاءة الحرارية الفرملية، والاستهلاك النوعي للوقود، وتأخر الاشتعال، ومعدل إطلاق الحرارة وضغط الأسطوانة.

وتظهر الدراسات أن تأثير الوقود الحيوي في الأداء لا يسير في اتجاه واحد؛ إذ تتحكم فيه خصائص الوقود ونسبة المزج وظروف التشغيل. ويؤثر اختلاف اللزوجة والكثافة والقيمة الحرارية ورقم السيتان ومحتوى الأكسجين في عملية الحقن وتفتيت الرذاذ والتبخر وبدء الاشتعال. لذلك قد يؤدي وقودان حيويان منتجان من مصدرين مختلفين إلى استجابات مختلفة في المحرك حتى عند استخدام نسبة الخلط نفسها (Verma et al., 2021).

وتشير مراجعة Altarazi et al. (2022) إلى أن استخدام الديزل الحيوي وخلطاته يوفر إمكانات تشغيلية مهمة، لكن النتائج تختلف باختلاف

نوع الوقود والمحرك. كما توصلت مراجعة تطبيقات الديزل الحيوي والإيثانول الحيوي في محركات الحقن المباشر إلى أن الوقود الحيوي يمكن أن يقدم مزايا احتراقية وانبعاثية، في حين قد تظهر في بعض الحالات انخفاضات في القدرة أو العزم أو كفاءة استهلاك الوقود، وهو ما يتطلب تحسين استراتيجية التشغيل بدلًا من افتراض إمكانية الاستبدال المباشر للديزل دون تعديلات .(Altarazi et al., 2022)

ويرتبط جزء من هذا السلوك بانخفاض القيمة الحرارية لبعض أنواع الديزل الحيوي مقارنة بالديزل الأحفوري؛ فالمحرك قد يحتاج إلى كمية أكبر نسبيًا من الوقود للحصول على مقدار مماثل من الطاقة. وفي المقابل، يسهم الأكسجين الموجود في تركيب الوقود الحيوي في تحسين أكسدة الوقود داخل مناطق الاحتراق، بما قد يدعم احتراقًا أكثر اكتمالًا في ظروف معينة. ومن هنا تظهر المفاضلة الأساسية بين محتوى الطاقة من جهة، وتحسين عملية الاحتراق بفعل الأكسجين من جهة أخرى

كما يمكن تحسين النتائج التشغيلية باستخدام استراتيجيات تقنية متعددة، مثل تعديل توقيت الحقن وضغطه، وإعادة تدوير غازات العادم(EGR) ، والتحكم الحراري في الوقود، وتحسين نسب المزج. وقد أظهرت دراسة تجريبية منشورة في Fuel إمكانية الجمع بين تسخين الديزل الحيوي وإعادة تدوير غاز العادم بهدف تحسين الأداء والحد من بعض الملوثات، بما يؤكد أن أداء الوقود الحيوي لا يتحدد بخصائص الوقود وحدها وإنما بتفاعل الوقود–المحرك–استراتيجية التحكم

وعليه، فإن تقييم أداء المحرك في الدراسة الحالية ينبغي أن يقوم على منظور تكاملي يربط مؤشرات القدرة والعزم والكفاءة والاستهلاك بخصائص الاحتراق والانبعاثات. وقد أصبحت هذه الرؤية أكثر أهمية مع تطور الوقود منخفض الكربون، حيث تؤكد مراجعة Xiong et al. (2024)أن تقييم الخلطات الحيوية يحتاج إلى تحسين متزامن للتركيب والاحتراق وظروف تشغيل المحرك، بدلًا من البحث عن وقود بديل واحد يُفترض تفوقه في جميع الظروف

المحور الثالث: كفاءة الطاقة

تشير كفاءة الطاقة في محركات الاحتراق الداخلي إلى مدى قدرة المنظومة على تحويل الطاقة الكيميائية للوقود إلى شغل ميكانيكي مفيد بأقل قدر ممكن من الفاقد. وتمثل هذه الكفاءة معيارًا أساسيًا في تقييم الوقود الحيوي؛ لأن خفض الانبعاثات وحده لا يكفي إذا صاحبه ارتفاع كبير في كمية الوقود اللازمة لإنتاج الوحدة نفسها من الطاقة. ولهذا ترتبط دراسة الوقود الحيوي ارتباطًا وثيقًا بمؤشرات مثل الكفاءة الحرارية الفرملية(BTE) ، والاستهلاك النوعي الفرملي للوقود(BSFC) والقيمة الحرارية للوقود، وكفاءة الاحتراق

وتُعد الكفاءة الحرارية الفرملية من أهم المؤشرات، لأنها تعبر عن نسبة القدرة الميكانيكية المفيدة إلى معدل الطاقة الداخلة مع الوقود. أما الاستهلاك النوعي للوقود فيوضح كمية الوقود اللازمة لإنتاج وحدة من القدرة خلال زمن محدد. وتصبح العلاقة بين المؤشرين مهمة بصورة خاصة عند مقارنة الوقود الحيوي بالوقود الأحفوري؛ فقد يؤدي انخفاض القيمة الحرارية للوقود الحيوي إلى زيادة الاستهلاك الكتلي حتى عندما يكون سلوك الاحتراق مقبولًا.

وتبين الأدبيات أن تأثير الوقود الحيوي في كفاءة الطاقة يرتبط بدرجة كبيرة بخصائصه الفيزيائية والكيميائية. فاللزوجة تؤثر في جودة الرش، والكثافة تؤثر في كمية الوقود المحقونة، بينما تتحكم القيمة الحرارية في الطاقة المتاحة من وحدة الكتلة، ويؤثر رقم السيتان في بدء الاشتعال. ومن ثم، فإن أي تغير في أحد هذه المتغيرات قد ينتقل عبر سلسلة من التأثيرات تبدأ من الحقن وتنتهي بالكفاءة الحرارية واستهلاك الوقود (Verma et al., 2021).

وقد أظهرت مراجعات حديثة أن إضافة بعض أنواع الوقود الحيوي أو الكحولات الحيوية قد تحافظ، ضمن ظروف تشغيل محددة، على كفاءة حرارية قريبة من الديزل، بينما يرتفع الاستهلاك النوعي في حالات أخرى. وتوضح مراجعة Xiong et al. (2024) أن العلاقة بين الوقود منخفض الكربون وأداء المحرك تعتمد على التركيب ونسبة المزج وطبيعة المحرك، الأمر الذي يجعل التحسين Optimization أكثر دقة علميًا من مجرد المقارنة الثنائية بين الوقود الحيوي و الديزل

وتتأثر كفاءة الطاقة كذلك بسرعة المحرك وحمله ونسبة الهواء إلى الوقود ودرجة حرارة التشغيل وتوقيت الحقن وضغطه وشكل غرفة الاحتراق. ولهذا يمكن لنوع واحد من الوقود أن يعطي نتائج مختلفة عند الأحمال المنخفضة والمرتفعة. كما أن تقنيات التحكم مثل EGR قد تخفض بعض الانبعاثات، لكنها قد تؤثر في درجة حرارة الاحتراق والكفاءة، بما يبرز وجود مفاضلات بين الكفاءة والانبعاثات يجب أخذها في الحسبان عند تحديد ظروف التشغيل المثلى

ومن منظور أوسع، لا ينبغي حصر كفاءة الطاقة في المحرك فقط؛ إذ يمكن التمييز بين كفاءة الاستخدام النهائي وكفاءة الطاقة عبر دورة إنتاج الوقود. فقد يحقق الوقود نتائج جيدة داخل المحرك، بينما تتطلب زراعته أو جمع مادته الخام وتحويلها ونقلها طاقة مرتفعة. وهنا يتقاطع هذا المحور مباشرة مع الاستدامة البيئية وتقييم دورة الحياة. ومن ثم، فإن الاختيار الأمثل للوقود الحيوي ينبغي أن يستهدف أعلى منفعة طاقية ممكنة مع أقل استهلاك وانبعاثات وأعباء بيئية عبر السلسلة الكاملة، وليس أعلى أداء لحظي للمحرك فحسب.(Jeswani et al., 2020)

المحور الرابع: الانبعاثات البيئية

تمثل الانبعاثات البيئية أحد أهم دوافع التحول نحو الوقود الحيوي، خاصة في قطاع النقل الذي يعتمد بصورة كبيرة على محركات الاحتراق الداخلي. وتشمل الملوثات الرئيسة الناتجة عن الاحتراق أول أكسيد الكربون (CO)، والهيدروكربونات غير المحترقة(HC) ، وأكاسيد النيتروجين (NOx)، والجسيمات الدقيقة والدخان(PM/Smoke) ، وثاني أكسيد الكربون .(CO_2) وتختلف آليات تكوّن هذه الملوثات؛ ولذلك لا يؤدي تغيير نوع الوقود بالضرورة إلى خفضها جميعًا في الوقت نفسه.

يُنتج أول أكسيد الكربون والهيدروكربونات غير المحترقة بصورة رئيسة عندما لا يكتمل احتراق الوقود، بينما ترتبط الجسيمات والدخان بالمناطق الغنية بالوقود ونقص الأكسجين المحلي. ومن هنا تبرز إحدى الخصائص المهمة للديزل الحيوي، وهي وجود الأكسجين ضمن تركيبه، الأمر الذي يمكن أن يحسن الأكسدة أثناء الاحتراق ويسهم في الحد من بعض نواتج الاحتراق غير الكامل. وقد أظهرت مراجعات تجريبية واسعة إمكانية انخفاض CO و HCوالدخان والجسيمات عند استخدام العديد من خلطات الديزل الحيوي، وإن كانت النتائج تختلف بين أنواع الوقود والمحركات (Altarazi et al., 2022).

إلا أن أكاسيد النيتروجين (NOx) تمثل حالة أكثر تعقيدًا. فتكوينها يتأثر بدرجات حرارة الاحتراق، وتركيز الأكسجين، وزمن بقاء الغازات في المناطق مرتفعة الحرارة، وتوقيت الاحتراق. ولهذا أبلغت بعض الدراسات عن زيادات طفيفة في NOx مع أنواع معينة من الديزل الحيوي، بينما أظهرت دراسات أخرى إمكانية الحد منها من خلال التحكم في توقيت الحقن أو EGR أو خصائص المزيج. وتؤكد مراجعة Verma et al. (2021)أن بعض أنواع الديزل الحيوي أظهرت سلوكًا واعدًا من حيث الانبعاثات مع تسجيل زيادات في أكاسيد النيتروجين في حالات معينة، وهو ما يمنع التعميم بأن الوقود الحيوي يخفض جميع الملوثات بصورة تلقائية

كما ينبغي التمييز بين انبعاثات العادم المباشرة وبين الانبعاثات المرتبطة بدورة حياة الوقود. فثاني أكسيد الكربون المنبعث عند الاحتراق لا يمثل وحده البصمة الكربونية للوقود الحيوي، لأن مراحل زراعة المادة الخام، والأسمدة، والحصاد، والنقل، واستخراج الزيت، والتحويل والمعالجة تستهلك طاقة ومواد وقد تنتج انبعاثات إضافية. ولذلك فإن وصف الوقود الحيوي بأنه «محايد كربونيًا» يحتاج إلى حذر منهجي، إذ تتباين النتائج بصورة كبيرة تبعًا لمسار الإنتاج والمواد الخام والتغير في استخدام الأراضي.(Jeswani et al., 2020)

ومن الناحية التطبيقية، فإن التقييم البيئي الأفضل للوقود الحيوي ينبغي أن يعتمد على حزمة انبعاثات وليس ملوثًا واحدًا. فقد يحقق مزيج معين انخفاضًا واضحًا في الدخان والجسيمات، لكنه يزيد NOx أو الاستهلاك النوعي؛ وقد يخفض مزيج آخر CO و HCدون تحقيق أفضل كفاءة حرارية. وبالتالي فإن المفاضلة بين الانبعاثات والأداء تمثل إحدى القضايا المركزية في تحسين استخدام الوقود الحيوي في المحركات.

وعليه، ينبغي تفسير نتائج الانبعاثات في ضوء خصائص الوقود وظروف التشغيل ونتائج الأداء وكفاءة الطاقة معًا. وهذا الربط هو الذي يسمح بتحديد ما إذا كان الوقود الحيوي يقدم تحسنًا بيئيًا صافيًا أم مجرد نقل للأثر من مؤشر إلى آخر، وهو ما يقود مباشرة إلى المحور الخامس المتعلق بالاستدامة وتقييم دورة الحياة

المحور الخامس: الاستدامة البيئية

تمثل الاستدامة البيئية المستوى الأشمل لتقييم الوقود الحيوي؛ فهي تتجاوز السؤال المباشر: «هل يخفض الوقود الحيوي انبعاثات المحرك؟» إلى سؤال أكثر شمولًا :هل يؤدي إنتاج الوقود الحيوي واستخدامه، عبر دورة حياته الكاملة، إلى خفض حقيقي للأعباء البيئية مقارنة بالبديل الأحفوري؟ وهذا التحول في مستوى التحليل مهم لأن بعض الآثار البيئية قد تحدث بعيدًا عن المحرك نفسه، خلال إنتاج المادة الخام أو معالجتها أو نقلها.

ويعد تقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment – LCA) من أبرز الأدوات المستخدمة للإجابة عن هذا السؤال. ويقوم على تتبع المدخلات والمخرجات البيئية للمنتج عبر مراحل محددة من دورة حياته، بدءًا من الحصول على المادة الخام مرورًا بالإنتاج والنقل والاستخدام، وصولًا إلى نهاية العمر وفق حدود النظام التي يعتمدها الباحث. ويساعد هذا المنهج على منع ما يعرف بنقل العبء البيئي من مرحلة إلى أخرى أو من فئة تأثير إلى أخرى

(Pikula et al., 2020)

وتشير مراجعة Jeswani et al. (2020) إلى أن الوقود الحيوي يمتلك إمكانات مهمة لخفض انبعاثات غازات الدفيئة مقارنة بالوقود الأحفوري في بعض مسارات الإنتاج، إلا أن النتائج بين دراسات دورة الحياة شديدة التباين. ويرجع ذلك إلى اختلاف المادة الخام، وتقنيات التحويل، ومصادر الطاقة المستخدمة في الإنتاج، وحدود النظام، وقواعد تخصيص الأعباء البيئية للمنتجات المشتركة، وافتراضات تغير استخدام الأراضي. ولذلك لا توجد قيمة بيئية واحدة يمكن نسبتها إلى «الوقود الحيوي» بصورة عامة .

وتبرز هذه المسألة بوضوح في الديزل الحيوي المنتج من زيوت الطهي المستعملة؛ إذ يُنظر إليه بوصفه خيارًا جذابًا ضمن الاقتصاد الدائري لأنه يحول مخلفًا إلى مورد طاقي. ومع ذلك، أوضحت مراجعة منهجية منشورة في Renewable and Sustainable Energy Reviews أن نتائج LCA لهذا المسار تتأثر بافتراضات مهمة، ومنها كيفية احتساب العبء البيئي لزيت الطهي المستعمل وحدود النظام وإدارة المخلفات والمواد المستخدمة في عمليات التنقية. وهذا يعني أن استخدام مادة خام «مهدرة» لا يجعل العملية خالية تلقائيًا من الأثر البيئي) 2022 .(

كما تؤكد مراجعة Srikumar et al. (2024) أن اختيار المادة الخام والمحفز وتقنية الإنتاج يؤثر بصورة جوهرية في النتائج البيئية للديزل الحيوي، وأن خفض تكلفة وأثر المواد الأولية يمثل مسارًا رئيسًا نحو إنتاج أكثر استدامة. وتبين الأدبيات الحديثة كذلك أن اختلاف الوحدة الوظيفية وحدود النظام وأساليب تخصيص الأعباء يمثل مصدرًا مهمًا للتباين بين نتائج دراساتLCA ، ولذلك ينبغي توحيد الافتراضات قدر الإمكان عند إجراء المقارنات .

ولا تقتصر الاستدامة على البصمة الكربونية؛ إذ ينبغي النظر كذلك إلى استهلاك المياه والطاقة، واستخدام الأراضي، واستنزاف الموارد، والتلوث الهوائي والمائي، وإدارة المخلفات والتأثير في النظم البيئية. وتصبح هذه الأبعاد أكثر أهمية بالنسبة للوقود الحيوي من الجيل الأول بسبب ارتباطه بالأراضي الزراعية والمحاصيل، بينما يمكن للمخلفات والزيوت المستعملة والمواد غير الغذائية أن تقلل بعض هذه الضغوط، بشرط أن تكون عمليات جمعها وتحويلها ذات كفاءة مناسبة.

وبناءً على ذلك، فإن الإطار النظري للدراسة يتعامل مع الاستدامة باعتبارها حصيلة تكاملية وليست خاصية ذاتية للوقود. فالوقود الحيوي الأكثر ملاءمة ليس بالضرورة ذلك الذي يسجل أدنى انبعاث واحد أو أعلى كفاءة منفردة، بل الذي يحقق أفضل توازن بين الأداء التشغيلي، وكفاءة استخدام الطاقة، وخفض الانبعاثات المحلية، وتقليل الأثر البيئي عبر دورة الحياة .وهذا المنظور يوفر أساسًا أكثر قوة لتفسير نتائج الدراسة والمفاضلة العلمية بين الوقود الحيوي والوقود التقليدي

الخلاصة النظرية للإطار

يمكن تلخيص العلاقة التي يقوم عليها الإطار النظري في المسار التالي:

خصائص الوقود الحيوي ← خصائص الاحتراق ← أداء المحرك ← كفاءة الطاقة ← الانبعاثات ← الأثر البيئي عبر دورة الحياة ← الاستدامة البيئية

وبذلك لا تفترض الدراسة أن استخدام الوقود الحيوي يؤدي آليًا إلى الاستدامة، وإنما تنظر إلى الاستدامة بوصفها نتيجة نهائية لتفاعل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للوقود مع تقنية المحرك وظروف التشغيل والكفاءة والانبعاثات ومسار إنتاج الوقود نفسه .وهذا التصور أكثر اتساقًا مع الاتجاه الحديث في الأدبيات الذي ينتقل من تقييم الوقود داخل المحرك فقط إلى تقييمه ضمن منظومة طاقة وبيئة متكاملة.

5. الدراسات السابقة

شهدت الأدبيات العلمية خلال الفترة 2020–2025 اهتمامًا متزايدًا بتقييم الوقود الحيوي بوصفه بديلًا محتملًا للوقود الأحفوري في محركات الاحتراق الداخلي، وتنوعت اتجاهات هذه الدراسات بين تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للوقود، وقياس أداء المحرك وكفاءة الاحتراق، ودراسة الانبعاثات، وصولًا إلى تقييم الأثر البيئي عبر دورة الحياة. وقد أسهم هذا التنوع في بناء قاعدة معرفية مهمة، لكنه أظهر في الوقت نفسه تباينًا في النتائج تبعًا لنوع الوقود ومصدره ونسب المزج وتصميم المحرك وظروف التشغيل ومنهجية التقييم هدفت دراسة Jeswani et al. (2020) إلى تقييم الاستدامة البيئية لأنواع الوقود الحيوي من خلال مراجعة الأدبيات ودراسات تقييم دورة الحياة، وكشفت أن قدرة الوقود الحيوي على خفض انبعاثات غازات الدفيئة مقارنة بالوقود الأحفوري تختلف بدرجة كبيرة وفق نوع المادة الخام، وتقنيات التحويل، ومصادر الطاقة المستخدمة في الإنتاج، والتغير في استخدام الأراضي. وأكدت الدراسة أن كون الوقود متجدد المصدر لا يكفي للحكم على استدامته، وإنما ينبغي النظر إلى سلسلة حياته كاملة. وفي اتجاه تطبيقي مختلف، ركزت دراسة Aydın et al. (2020) على التنبؤ بأداء محرك اشتعال بالضغط يعمل بمزائج الديزل والديزل الحيوي وانبعاثاته باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية ومنهجية سطح الاستجابة، وكشفت النتائج إمكانية استخدام أدوات النمذجة والتحسين لتحديد ظروف التشغيل التي تحقق توازنًا أفضل بين الكفاءة والانبعاثات وركزت دراسة Xiao et al. (2020) على تحليل خصائص الاحتراق والأداء والانبعاثات لمحرك ديزل يعمل بمزائج الأيزوبيوتانول والديزل الحيوي، وأظهرت أن إضافة الأيزوبيوتانول حسنت بعض خصائص التبخر وساهمت في الحد من الجسيمات تحت بعض ظروف التشغيل، إلا أنها ارتبطت في المقابل بتغيرات في تأخر الاشتعال وانبعاثات NOx و HC.وتكشف هذه النتيجة أن التحسن في أحد المؤشرات البيئية لا يعني بالضرورة تحسن الأداء البيئي الكلي. وفي السياق نفسه، تناولت دراسة Alenezi et al. (2020) تأثير مزائج زيت الفيوزل والديزل الحيوي والديزل في أداء محرك ديزل وانبعاثاته، وأظهرت النتائج وجود مفاضلات بين القدرة واستهلاك الوقود ومختلف مكونات الانبعاثات، وهو ما يدعم الحاجة إلى تقييم الوقود وفق مجموعة مترابطة من المؤشرات بدلًا من الاعتماد على ملوث واحد.ومن زاوية مرتبطة بإنتاج الوقود من المخلفات، هدفت دراسة Pauline et al. (2021)إلى دراسة إنتاج الديزل الحيوي من زيوت الطهي المستعملة وربط خصائص الوقود الناتج بأداء محرك الديزل. وأظهرت النتائج إمكانية تحويل هذه المخلفات إلى مصدر للطاقة وتحقيق خصائص تشغيلية قابلة للتطبيق، بما يدعم مبادئ الاقتصاد الدائري. إلا أن الدراسة ركزت بصورة أكبر على كفاءة التحويل والأداء التشغيلي ولم تقدم تقييمًا شاملًا للأعباء البيئية الناتجة عن جميع مراحل الإنتاج والاستخدام.أما دراسة Verma et al. (2021) فقد قدمت مراجعة شاملة للعلاقة بين الخصائص الفيزيائية والكيميائية للديزل الحيوي وبين الاحتراق وأداء المحرك والانبعاثات. وكشفت الدراسة أن الاختلافات في اللزوجة والكثافة والقيمة الحرارية ورقم السيتان والتركيب الكيميائي تعد من الأسباب الرئيسة لتباين نتائج الدراسات التجريبية. كما بينت أن الوقود الحيوي يمكن أن يخفض CO و HCوالجسيمات في حالات متعددة، إلا أن ذلك قد يصاحبه ارتفاع في الاستهلاك النوعي للوقود أو NOx في ظروف معينة. وتبرز أهمية هذه الدراسة في تفسيرها لعدم إمكانية تعميم نتيجة واحدة على جميع أنواع الوقود الحيويوفي مرحلة لاحقة، هدفت دراسة Altarazi et al. (2022) إلى مراجعة أثر الوقود الحيوي في أداء المحركات وخصائص الانبعاثات، وأظهرت أن الديزل الحيوي والإيثانول الحيوي وغيرهما من أنواع الوقود المتجدد يمكن أن تحقق فوائد بيئية وتشغيلية مهمة، غير أن مقدار هذه الفوائد يرتبط بنوع الوقود ونسبة المزج وتصميم المحرك وظروف التشغيل. وركزت دراسة أخرى لـ Altarazi et al. (2022)على استخدام الوقود الحيوي المفرد والمزائج الثنائية، وكشفت أن دمج أكثر من مكون حيوي قد يساعد في تعويض بعض أوجه القصور في خصائص الوقود المنفرد، إلا أن نجاح هذه الاستراتيجية يعتمد على ضبط نسبة المزج وتوقيت الحقن وظروف الاحتراق وفي اتجاه يجمع بين الوقود الحيوي وتقنيات التحكم في المحرك، بحثت دراسة Dubey et

تأثير مزائج الديزل الحيوي مع إعادة تدوير غازات العادم al. (2022)EGRباستخدام منهجية سطح الاستجابة. وكشفت النتائج أن تحسين نسب المزج ومعدل EGR يستطيع الحد من الدخان وNOx، إلا أن بعض ظروف التشغيل قد تؤدي إلى زيادة CO و HC أو انخفاض نسبي في الكفاءة الحرارية. وتبرز هذه النتائج وجود علاقة مفاضلة بين خفض الانبعاثات والحفاظ على كفاءة الطاقة، وهو ما يجعل التحسين متعدد الأهداف أكثر ملاءمة من البحث عن الحد الأدنى لملوث واحد.وركزت دراسة Wai et al. (2022) على تأثير مزائج الإيثانول والديزل الحيوي والديزل في الاحتراق والانبعاثات باستخدام محرك ذي حقن مباشر بالقضيب المشترك، وأظهرت أن زيادة نسبة المكونات المؤكسجة ساعدت على خفض الجسيمات وتحسين بعض خصائص الاحتراق، إلا أنها قد تؤدي إلى زيادة استهلاك الوقود نتيجة انخفاض المحتوى الطاقي للمزيج. وفي المقابل، جمعت دراسة Sivarethinamohan et al. (2022) بين إنتاج الديزل الحيوي من زيوت الطهي المستعملة باستخدام الطاقة الشمسية وبين تقييم معلمات المحرك، وأظهرت إمكانية الجمع بين الاستفادة من المخلفات والطاقة المتجددة في إنتاج الوقود، بما يوسع مفهوم الاستدامة من مرحلة تشغيل المحرك إلى مرحلة إنتاج الوقود ذاته. ومن منظور أكثر شمولًا، هدفت دراسة Hosseinzadeh-Bandbafha et al. (2022) إلى إجراء مراجعة منهجية لتقييم دورة حياة الديزل الحيوي المنتج من زيوت الطهي المستعملة. وكشفت أن هذا المسار يمتلك مزايا بيئية مهمة مقارنة بعدد من المواد الخام التقليدية، لكنها أوضحت كذلك أن النتائج تتأثر بدرجة كبيرة بحدود النظام والوحدة الوظيفية وطريقة تخصيص الأعباء البيئية. وتكتسب هذه النتيجة أهمية منهجية لأنها تبين أن الاختلاف بين نتائج الدراسات لا يرجع دائمًا إلى خصائص الوقود، بل قد ينتج عن اختلاف منهجيات تقييم الاستدامة نفسها وفي عام 2023، ركزت دراسة Chen and Zhang (2023)على تأثير نسب مختلفة من الديزل الحيوي في أداء محرك الديزل وانبعاثاته، باستخدام الدمج بين النمذجة والبيانات التجريبية. وأظهرت النتائج أن زيادة نسبة الديزل الحيوي يمكن أن تسهم في خفض السخام وتحسين بعض جوانب الاحتراق، إلا أنها قد ترتبط بارتفاع الاستهلاك النوعي و NOxأو انخفاض القدرة في بعض الحالات. وتشير هذه النتائج إلى أن زيادة نسبة الوقود الحيوي لا تمثل في حد ذاتها معيارًا للاستدامة، وإنما ينبغي البحث عن النسبة التي تحقق أفضل توازن بين الأداء والطاقة والانبعاثات وركزت دراسة Azad et al. (2023)على استراتيجيات احتراق الديزل الحيوي المستخدمة للحد من الانبعاثات، بما في ذلك تعديل توقيت الحقن وضغطه وإعادة تدوير غازات العادم وتقنيات الاحتراق منخفض الحرارة. وكشفت الدراسة أن التحكم في ظروف الاحتراق قادر على الحد من بعض نقاط الضعف المرتبطة باستخدام الديزل الحيوي، ولا سيما مشكلةNOx ، لكنها أوضحت أن معالجة أحد الملوثات قد تؤثر سلبًا في ملوثات أخرى أو في استقرار الاحتراق. وبذلك أكدت أن تحقيق الاستدامة يتطلب تحسينًا متزامنًا للوقود والمحرك واستراتيجية الاحتراق وعلى خلاف غالبية الدراسات المختبرية، ركزت دراسة Chountalas et al. (2023)على تقييم وقود حيوي من الجيل الثاني في محرك بحري ثنائي الأشواط باستخدام قياسات فعلية على متن سفينة. وكشفت النتائج إمكانية استخدام المزيج الحيوي مع الحفاظ على مستويات أداء قريبة نسبيًا من الوقود التقليدي، مع ظهور اختلافات محدودة في الاستهلاك والانبعاثات. وتكتسب الدراسة أهمية خاصة من انتقالها من الاختبارات المعملية إلى ظروف تشغيل حقيقية، إلا أن تقييمها لم يمتد بصورة متكاملة إلى الأثر البيئي السابق لمرحلة استخدام الوقود وفي السياق ذاته، بحثت دراسة Ayazi et al. (2023)مزائج ثلاثية من الديزل والديزل الحيوي والإيثانول الحيوي، وأظهرت النتائج إمكانية خفض COوبعض ملوثات العادم مع المحافظة على مستويات تشغيلية مقبولة عند نسب مزج معينة. وتؤكد الدراسة أن استخدام أكثر من مكون متجدد قد يسمح بتعديل خصائص الوقود بصورة أفضل، إلا أن النتائج تظل مرتبطة بنسبة الخلط وظروف المحرك، مما يحد من إمكانية تعميم تركيبة واحدة باعتبارها الخيار الأمثل لجميع التطبيقات.

ومع تطور الدراسات نحو مفهوم أكثر شمولًا للاستدامة، هدفت دراسة Srikumar et al. (2024)إلى مراجعة تقييم دورة الحياة البيئية لإنتاج الديزل الحيوي مع التركيز على اختيار المادة الخام والمحفز. وكشفت أن الاختيار غير المناسب للمواد الخام أو عمليات التحويل يمكن أن يقلل من الفائدة البيئية المتوقعة من الوقود الحيوي، وأن الطاقة والمواد الكيميائية المستخدمة في الإنتاج تمثل مصادر مهمة للأثر البيئي. وتؤكد هذه الدراسة أن تقييم انبعاثات العادم وحدها قد يعطي حكمًا غير مكتمل على الاستدامة الفعلية للوقود الحيوي.

كما قدمت دراسة Xiong et al. (2024) مراجعة لتأثير الوقود الحيوي ومزائجه منخفضة الكربون في أداء المحركات. وأظهرت أن ارتفاع المحتوى الأكسجيني لبعض أنواع الوقود الحيوي يمكن أن يحسن عملية الاحتراق ويحد من CO و HCوالدخان، إلا أن انخفاض القيمة الحرارية أو ارتفاع اللزوجة قد يؤدي إلى زيادة استهلاك الوقود أو تراجع القدرة في بعض الظروف. وأكدت الدراسة أهمية دمج الوقود الحيوي مع تقنيات الحقن والتحكم المتقدمة بدلًا من التعامل معه بوصفه بديلًا مباشرًا للوقود التقليدي دون تحسين منظومة التشغيل ومن منظور يجمع الأبعاد الفنية والاستدامية، ركزت دراسة Padmanaban et al. (2024)على تقييم مزائج وقود حيوي مختلطة تحت ضغوط حقن مختلفة مع استخدام إضافات محسنة، وربطت النتائج بمؤشرات الاستدامة والتحليل الاستراتيجي. وكشفت الدراسة إمكانية الحد من CO و HCوالدخان مع المحافظة على مستويات مناسبة من الكفاءة في ظروف تشغيل معينة، في حين بقي التحكم في NOx أحد التحديات. وتمثل هذه الدراسة خطوة نحو التقييم متعدد الأبعاد، إلا أن أدوات التقييم النوعية المستخدمة فيها لا تحل محل تقييم كمي متكامل لدورة الحياة

وأخيرًا، وسعت دراسة Imwinkelried et al. (2025) نطاق تحليل الانبعاثات من خلال مقارنة تراكيب مختلفة من الديزل وديزل فول الصويا الحيوي، ولم تقتصر على الملوثات التقليدية بل تناولت أيضًا مجموعة من المركبات العضوية المتطايرة. وكشفت الدراسة عن تقارب نسبي في الأداء التشغيلي بين بعض المزائج والديزل التقليدي، مع انخفاض CO وبعض المركبات العطرية عند زيادة نسبة الديزل الحيوي، إلا أن بعض المركبات المؤكسجة و NOxأظهرت اتجاهات مختلفة. وتكشف هذه النتائج أن تقييم الاستدامة البيئية اعتمادًا على عدد محدود من الملوثات قد يخفي تأثيرات بيئية أخرى لا تظهر في القياسات التقليدية

التعقيب والتحليل النقدي للدراسات السابقة

تكشف القراءة التحليلية للدراسات السابقة عن ثلاثة اتجاهات بحثية رئيسة . ركز الاتجاه الأول على العلاقة بين خصائص الوقود الحيوي وأداء المحرك والاحتراق، كما ظهر في دراسات(2021) .Verma et al ، و(2022) .Altarazi et al، و .Xiong et al. (2024) وأكد هذا الاتجاه أن نوع المادة الخام ونسبة المزج والخصائص الفيزيائية والكيميائية عوامل لا يمكن فصلها عن نتائج الأداء. أما الاتجاه الثاني فركز على تحسين منظومة الوقود–المحرك باستخدام EGR وتوقيت وضغط الحقن والمزائج المتعددة والنمذجة الذكية، كما ظهر لدى .Aydın et al (2020)، و(2022) .Dubey et al، و .Azad et al. (2023) بينما انتقل الاتجاه الثالث إلى مستوى أوسع يتمثل في الاستدامة وتقييم دورة الحياة، كما في(2020) .Jeswani et al ، و-Hosseinzadeh-Bandbafha et al. (2022)، و .Srikumar et al. (2024)

وتتفق معظم الدراسات على أن الوقود الحيوي، وخاصة الديزل الحيوي، يستطيع الحد من COو HCوالدخان والجسيمات في ظروف تشغيل متعددة، إلا أن الأدلة أقل اتساقًا بشأن NOxوكفاءة الطاقة والاستهلاك النوعي للوقود .وهذا التباين لا يمثل تناقضًا بالضرورة، وإنما يعكس اختلاف المواد الخام ونسب المزج والمحركات والأحمال ودرجات الحرارة وتقنيات الحقن. لذلك فإن المقارنة المباشرة بين نتائج الدراسات دون مراعاة هذه المتغيرات قد تقود إلى استنتاجات مضللة ومن أوجه القصور المهمة كذلك أن معظم الدراسات التجريبية تعاملت مع الاستدامة من خلال انبعاثات العادم، بينما أوضحت دراسات LCA أن الأثر البيئي يبدأ قبل وصول الوقود إلى خزان المركبة، ويشمل إنتاج المادة الخام والطاقة والمياه والنقل والتحويل والمواد الكيميائية وتغير استخدام الأراضي. وفي الاتجاه المقابل، فإن كثيرًا من دراسات دورة الحياة لا تستخدم قياسات تجريبية تفصيلية لأداء المحرك. ومن ثم تظهر فجوة واضحة بين دراسات هندسة المحركات ودراسات الاستدامة البيئية

6. الفجوة البحثية

بناءً على ذلك، لا تتمثل الفجوة الأساسية في نقص الدراسات المتعلقة بالوقود الحيوي بحد ذاته، وإنما في محدودية الدراسات التي تجمع بصورة مترابطة بين الأداء التشغيلي، وكفاءة الطاقة، والانبعاثات، والاستدامة

البيئية .فالدراسة التي تثبت انخفاض CO أو الدخان لا تكفي للحكم على الاستدامة إذا ارتفع استهلاك الطاقة بصورة كبيرة، كما أن تحقيق كفاءة حرارية مرتفعة لا يعني الاستدامة إذا كان مسار إنتاج الوقود نفسه عالي البصمة البيئية. ولذلك تسعى الدراسة الحالية إلى معالجة هذه التجزئة من خلال إطار تكاملي ينتقل من خصائص الوقود الحيوي ← الاحتراق ←أداء المحرك ← كفاءة الطاقة ← الانبعاثات ← الأثر البيئي عبر دورة الحياة ← الاستدامة البيئية، وهو المسار الذي يتبناه الإطار النظري الحالي للدراسة.

6.1.الإسهام العلمي للدراسة

تتمثل القيمة العلمية لهذه الدراسة في تقديم رؤية تكاملية لتقييم استدامة استخدام الوقود الحيوي في محركات الاحتراق الداخلي، بدلًا من الاقتصار على دراسة الأداء أو الانبعاثات بصورة منفصلة. وانطلاقًا من الفجوة التي كشفت عنها مراجعة الأدبيات، تسعى الدراسة إلى الربط بين خصائص الوقود الحيوي، وأداء المحرك، وكفاءة الطاقة، والانبعاثات البيئية، والاستدامة عبر دورة الحياة ضمن إطار تحليلي واحد، بما يسمح بتفسير المفاضلات التي قد تحدث بين التحسن البيئي والكفاءة التشغيلية.

ويتجسد الإسهام العلمي للدراسة في الجوانب الآتية

بناء إطار تحليلي متكامل يربط بين الوقود الحيوي وخصائص الاحتراق والأداء وكفاءة الطاقة والانبعاثات والاستدامة البيئية، بدلًا من المعالجة الجزئية السائدة في جانب من الأدبيات السابقة .

تطوير مفهوم تقييم الوقود الحيوي من مجرد قياس انبعاثات العادم إلى تقييم أكثر شمولًا يأخذ في الاعتبار الأثر البيئي المرتبط بدورة حياة الوقود

تفسير المفاضلات التشغيلية والبيئية؛ إذ لا تفترض الدراسة أن انخفاض ملوث معين يعني بالضرورة تحقيق الاستدامة، بل تنظر في العلاقة بين انخفاض الانبعاثات والتغير في استهلاك الوقود والكفاءة والأداء .

دمج المنظور الهندسي والبيئي من خلال الربط بين مؤشرات أداء محركات الاحتراق الداخلي ومؤشرات الاستدامة، بما يساهم في تقليص الفجوة بين دراسات هندسة المحركات ودراسات تقييم دورة الحياة

توفير أساس علمي للمفاضلة بين خيارات الوقود الحيوي وفق مجموعة مترابطة من المعايير، بما يساعد على تحديد الظروف ونسب المزج التي يمكن أن تحقق توازنًا أفضل بين الكفاءة التشغيلية والأداء البيئي

وبذلك لا تكمن أصالة الدراسة في إثبات أن الوقود الحيوي بديل للوقود الأحفوري فحسب، وإنما في إعادة صياغة كيفية الحكم على جدواه؛ من تقييم أحادي يعتمد على الأداء أو الانبعاثات إلى تقييم متعدد الأبعاد يقوم على المسار

الوقود الحيوي ← الاحتراق ← أداء المحرك ← كفاءة الطاقة ← الانبعاثات ← الأثر البيئي ← الاستدامة البيئية

ومن المتوقع أن يسهم هذا الإطار في توفير أساس أكثر شمولًا يمكن الاستفادة منه في الدراسات المستقبلية وفي تطوير سياسات وتقنيات استخدام الوقود الحيوي في محركات الاحتراق الداخلي

7. المنهجية

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي القائم على المراجعة النقدية المقارنة للأدبيات العلمية، باعتباره الأكثر ملاءمة لطبيعة الدراسة وأهدافها التي لا تقتصر على وصف استخدام الوقود الحيوي في محركات الاحتراق الداخلي، وإنما تسعى إلى تحليل الأدلة العلمية ومقارنتها وتفسير أوجه الاتفاق والاختلاف بينها، وصولًا إلى استخلاص نتائج تكاملية بشأن الاستدامة البيئية للوقود الحيوي. ويأتي اختيار هذا المنهج متسقًا مع مشكلة الدراسة التي تشير إلى تباين نتائج البحوث السابقة بسبب اختلاف أنواع الوقود الحيوي ونسب المزج وخصائص المحركات وظروف التشغيل وأساليب التقييم

7.1.تصميم الدراسة

صُممت الدراسة بوصفها مراجعة وصفية تحليلية نقدية مقارنة (Descriptive, Analytical, Critical and Comparative Review)للأدبيات المنشورة خلال الفترة 2020–2025. ولم يقتصر التحليل على تلخيص ما توصلت إليه الدراسات السابقة، بل اعتمد على إعادة قراءة نتائجها في ضوء العلاقات المتبادلة بين خصائص الوقود الحيوي وأداء المحرك وكفاءة الطاقة والانبعاثات والأثر البيئي. ويتوافق ذلك مع الإطار النظري للدراسة الذي ينظر إلى الاستدامة باعتبارها نتيجة نهائية لتفاعل هذه المكونات، وليس خاصية مستقلة للوقود الحيوي .

7.2.مصادر البيانات ومعايير اختيار الدراسات

اعتمدت الدراسة على البيانات الثانوية المستمدة من المقالات العلمية المحكمة المنشورة في الدوريات الدولية، مع التركيز على الدراسات الحديثة الواقعة ضمن الفترة 2020–2025 والمرتبطة مباشرة باستخدام الوقود الحيوي ومزائجه في محركات الاحتراق الداخلي. وأعطيت الأولوية للدراسات المنشورة في المجلات المفهرسة في Scopus، والتي تناولت واحدًا أو أكثر من المجالات الآتية: خصائص الوقود الحيوي، وأداء المحركات وخصائص الاحتراق، وكفاءة الطاقة واستهلاك الوقود، والانبعاثات، وتقييم دورة الحياة والاستدامة البيئية. وتضم الأدبيات التي تستند إليها الدراسة بالفعل أبحاثًا تجمع بين الدراسات التجريبية والمراجعات العلمية ودراسات .LCA

واستبعدت من المقارنة الدراسات التي لا ترتبط بصورة مباشرة بتشغيل محركات الاحتراق الداخلي، أو التي لا تقدم مؤشرات واضحة تسمح بالمقارنة، إضافة إلى المصادر غير المحكمة متى توافر بديل علمي محكم. ولم يكن الهدف من عملية الاختيار تحقيق تجميع إحصائي للنتائج على غرار Meta-analysis، وإنما بناء قاعدة أدلة حديثة ومتنوعة تسمح بإجراء مقارنة تفسيرية ونقدية بين النتائج

7.3.محاور التحليل

جرى تنظيم الأدلة المستخلصة من الدراسات السابقة في خمسة محاور تحليلية مترابطة تتطابق مع الإطار النظري للدراسة، وهي (1) :الوقود الحيوي وخصائصه، (2) أداء محركات الاحتراق الداخلي، (3) كفاءة الطاقة واستهلاك الوقود، (4) الانبعاثات البيئية، و(5) الاستدامة البيئية وتقييم دورة الحياة .ويتيح هذا التصنيف الانتقال من مستوى خصائص الوقود إلى مستوى الأثر البيئي الكلي، بدلًا من التعامل مع كل مؤشر بصورة مستقلة .

7.4.أسلوب التحليل النقدي المقارن

نُفذ التحليل على ثلاث مراحل مترابطة. تمثلت المرحلة الأولى في التحليل الوصفي لاستخلاص نوع الوقود الحيوي والمادة الخام ونسبة المزج ونوع المحرك وظروف التشغيل والمؤشرات المستخدمة والنتائج الأساسية لكل دراسة. أما المرحلة الثانية فاعتمدت على المقارنة التحليلية بين النتائج لتحديد الاتجاهات المتكررة؛ مثل تأثير الوقود الحيوي في القدرة والعزم والكفاءة الحرارية والاستهلاك النوعي للوقود، إضافة إلى CO و HC و NOx والجسيمات والدخان.

أما المرحلة الثالثة فقد اعتمدت على التحليل النقدي التفسيري؛ إذ لم يُتعامل مع اختلاف نتائج الدراسات باعتباره تناقضًا مباشرًا، بل جرى تفسيره في ضوء اختلاف المادة الخام ونسبة المزج والقيمة الحرارية واللزوجة والمحتوى الأكسجيني وتصميم المحرك والحمل والسرعة وتوقيت الحقن وتقنيات التحكم. ويستند هذا التوجه إلى ما أظهرته مراجعة الأدبيات الحالية من أن الوقود الحيوي يميل إلى خفض CO و HC والدخان والجسيمات في العديد من الحالات، بينما تبقى نتائج NOx وكفاءة الطاقة والاستهلاك النوعي أقل تجانسًا.

7.5.بناء النتائج التركيبية للدراسة

بدلًا من إعادة عرض النتائج السابقة بصورة منفصلة، استخدمت الدراسة التركيب النقدي للأدلة (Critical Evidence Synthesis) للوصول إلى نتائج مستخلصة من المقارنة بين الدراسات. ويعني ذلك البحث عن الأنماط المشتركة، وتفسير النتائج المتعارضة، وتحديد الظروف التي يتحسن فيها الأداء أو تنخفض الانبعاثات، والكشف عن المفاضلات المحتملة بين المؤشرات. فعلى سبيل المثال، لا يُفسر انخفاض CO أو الدخان منفردًا باعتباره دليلًا كافيًا على الاستدامة إذا صاحبه ارتفاع جوهري في استهلاك الوقود أو NOx أو في الأعباء البيئية المرتبطة بإنتاج الوقود.

ومن ثم، تم تقييم الأدلة وفق منطق التوازن متعدد الأبعاد بين ثلاثة مستويات مترابطة :الأداء التشغيلي، والكفاءة الطاقية، والأداء البيئي، مع وضع النتائج ضمن منظور دورة الحياة. ويسمح ذلك بالانتقال من مجرد الإجابة عن سؤال «هل الوقود الحيوي أفضل من الوقود التقليدي؟» إلى

تحديد متى، وتحت أي ظروف، وبأي نسب مزج، ومن أي مصادر يمكن أن يمثل الوقود الحيوي خيارًا أكثر استدامة

7.6. الإطار التقييمي المقترح

بناءً على نتائج المقارنة النقدية، اعتمدت الدراسة مسارًا تركيبيًا لتفسير الاستدامة البيئية يتمثل في:

خصائص الوقود الحيوي ← خصائص الاحتراق ← أداء المحرك ← كفاءة الطاقة ← الانبعاثات ← الأثر البيئي عبر دورة الحياة ← الاستدامة البيئية.

ولا يفترض هذا الإطار وجود علاقة خطية أو تلقائية بين استخدام الوقود الحيوي وتحقيق الاستدامة؛ وإنما ينظر إلى الاستدامة بوصفها حصيلة نهائية للمفاضلة بين المنافع والتكاليف التشغيلية والطاقية والبيئية .وهو ما يعالج الفجوة التي حددتها الدراسة والمتمثلة في محدودية الأدبيات التي تدمج الأداء وكفاءة الطاقة والانبعاثات والاستدامة البيئية في إطار مترابط .

في المرحلة النهائية، جرى تحويل نتائج التحليل المقارن إلى استنتاجات تركيبية جديدة مستمدة من الأدلة المنشورة، وليس إلى نتائج تجريبية أولية؛ إذ لا تتضمن الدراسة تجربة محرك مستقلة أو بيانات ميدانية جديدة. ولذلك تتمثل جدة النتائج في إعادة تركيب الأدلة وتفسير العلاقات والمفاضلات بين المتغيرات والكشف عن الشروط التي تجعل استخدام الوقود الحيوي أكثر أو أقل استدامة. ويتيح هذا النهج في النهاية بناء تصور تقييمي يساعد في المفاضلة بين بدائل الوقود الحيوي، وتحديد الاتجاهات الأكثر ملاءمة لتحسين كفاءة المحركات وخفض الانبعاثات وتعزيز استدامة قطاع النقل.

8. النتائج والمناقشة

أظهر التحليل النقدي المقارن للدراسات المنشورة خلال الفترة 2020–2025 أن الاستدامة البيئية للوقود الحيوي في محركات الاحتراق الداخلي لا يمكن الحكم عليها من خلال انخفاض الانبعاثات وحده، بل تتحدد من خلال التفاعل بين خصائص الوقود، وجودة الاحتراق، وأداء المحرك، وكفاءة استخدام الطاقة، ونمط الانبعاثات، والأعباء البيئية المرتبطة بدورة حياة الوقود. وتعد هذه النتيجة التركيبية من أهم نتائج الدراسة الحالية؛ لأنها تنقل تقييم الوقود الحيوي من منطق المقارنة الأحادية مع الوقود الأحفوري إلى منطق المفاضلة متعددة الأبعاد .ويتفق هذا الاستنتاج مع Jeswani et al. (2020) الذين أكدوا أن الميزة البيئية للوقود الحيوي تتباين وفق المادة الخام ومسار الإنتاج وحدود دورة الحياة، كما يتوافق مع Srikumar et al. (2024) في تأكيد أثر المادة الخام والمحفز وتقنية الإنتاج في النتيجة البيئية النهائية. ومن ثم، فإن وصف الوقود الحيوي بأنه مستدام بصورة مطلقة يمثل تبسيطًا لا تدعمه الأدلة المقارنة.

وفيما يتعلق بالأداء التشغيلي للمحركات، تشير النتائج التركيبية للدراسة الحالية إلى أن استخدام الوقود الحيوي، وخصوصًا الديزل الحيوي في نسب المزج المنخفضة والمتوسطة، يمكن أن يحافظ على أداء قريب من الوقود التقليدي، بينما قد تظهر خسائر في القدرة أو تغيرات في العزم عند زيادة نسبة الوقود الحيوي. ويمكن تفسير ذلك بانخفاض القيمة الحرارية لبعض أنواع الوقود الحيوي وارتفاع كثافتها ولزوجتها مقارنة بالديزل، بما يؤثر في التذرية والتبخر وتكوين الخليط. وتتفق هذه النتيجة مع ما توصل إليه Verma et al. (2021) من أن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للديزل الحيوي تؤدي دورًا حاسمًا في الاحتراق والأداء، كما تتفق مع Altarazi et al. (2022) الذين أظهروا أن نتائج الأداء تختلف وفق نوع الوقود ونسبة المزج والمحرك وظروف التشغيل. لذلك، تنتقد الدراسة الحالية الاتجاه الذي يقارن أنواع الوقود على أساس نسبة المزج فقط دون التحكم في الاختلافات الفيزيائية والكيميائية وظروف المحرك؛ لأن ذلك قد يؤدي إلى تفسير غير دقيق للفروق المسجلة في الأداء.

أما بالنسبة إلى كفاءة الطاقة واستهلاك الوقود، فقد أظهرت الدراسة أن انخفاض القيمة الحرارية للعديد من أنواع الديزل الحيوي يمثل أحد أهم العوامل التي تفسر ارتفاع الاستهلاك النوعي للوقود في عدد من الدراسات، رغم أن المحتوى الأكسجيني للوقود قد يحسن اكتمال الاحتراق. وهذا يعني أن التأثيرين يعملان في اتجاهين متعاكسين؛ فالأكسجين الداخلي قد يحسن عملية الاحتراق، بينما يتطلب انخفاض الطاقة النوعية حقن كمية أكبر من الوقود للحصول على طاقة ميكانيكية مماثلة. وتنسجم هذه النتيجة مع Verma et al. (2021) وXiong et al. (2024)، اللذين ربطا أداء الوقود الحيوي بالقيمة الحرارية واللزوجة والكثافة والمحتوى الأكسجيني. وهنا تكشف الدراسة الحالية عن نقطة نقدية مهمة، وهي أن انخفاض الانبعاثات لكل وحدة من الوقود المستهلك لا يكفي لإثبات التحسن البيئي إذا تطلب تشغيل المحرك استهلاك كمية أكبر من الوقود لإنتاج العمل نفسه؛ ولذلك ينبغي ربط الانبعاثات بالطاقة أو الشغل المفيد الناتج عند إجراء المقارنات.

وفي محور الانبعاثات البيئية، كشفت المقارنة عن اتجاه أكثر اتساقًا نحو انخفاض CO و HC والدخان والجسيمات عند استخدام عدد من أنواع الوقود الحيوي ومزائجه، ويرتبط ذلك أساسًا بوجود الأكسجين في البنية الكيميائية للوقود، الأمر الذي يدعم أكسدة الوقود ويحد من مناطق الاحتراق الغنية بالكربون. وتتفق هذه النتيجة مع Verma et al. (2021) و Altarazi et al. (2022)، كما تدعمها النتائج التي استعرضها Xiong et al. (2024). ومع ذلك، لا ينبغي تفسير هذه النتيجة باعتبارها قاعدة ثابتة؛ إذ تتغير الاستجابة تبعًا للحمل والسرعة ونسبة المزج وتوقيت الحقن ودرجة حرارة الاحتراق. ولذلك ترى الدراسة الحالية أن القيمة العلمية الأقوى للوقود الحيوي ليست في ضمان خفض جميع الملوثات، وإنما في إمكان إعادة تشكيل ملف الانبعاثات بما يسمح بتحقيق تخفيضات مهمة عند اختيار الوقود وظروف التشغيل المناسبة.

وعلى النقيض من الاتجاه الأكثر وضوحًا في CO و HC والجسيمات، أظهرت النتائج أن NOx يمثل أكثر مؤشرات الانبعاثات تعقيدًا وتباينًا .فقد سجلت بعض الدراسات ارتفاعًا في NOx مع زيادة الديزل الحيوي، في حين أظهرت دراسات أخرى انخفاضًا أو تغيرًا محدودًا عند تعديل ظروف التشغيل أو استخدام تقنيات مثل EGR. ويمكن تفسير هذا الاختلاف بتفاعل مجموعة من العوامل، تشمل درجة حرارة الاحتراق، وتوافر الأكسجين، وتوقيت بدء الاحتراق، وفترة تأخر الاشتعال، وتركيب الوقود. وهذا يتفق مع Altarazi et al. (2022) و Verma et al. (2021)، اللذين أشارا إلى عدم ثبات اتجاه NOx. وتكشف هذه النتيجة عن أحد أوجه القصور في بعض الدراسات التي تستنتج أفضلية الوقود الحيوي استنادًا إلى انخفاض الدخان و CO دون إدخال NOx ضمن المفاضلة البيئية، لأن خفض ملوث على حساب زيادة ملوث آخر لا يمثل بالضرورة تحسنًا صافيًا في الاستدامة ومن النتائج المهمة أيضًا أن نسبة المزج المثلى ليست قيمة ثابتة يمكن تعميمها على جميع المحركات وأنواع الوقود الحيوي .فقد كشفت المقارنة أن المزائج المنخفضة والمتوسطة تحقق في عدد من الحالات توازنًا أفضل بين المحافظة على الأداء والاستفادة من الخصائص الأكسجينية للوقود الحيوي، بينما يؤدي رفع نسبة الوقود الحيوي في حالات أخرى إلى زيادة الاستهلاك النوعي أو تغير القدرة والانبعاثات. وتتوافق هذه النتيجة مع Aydın et al. (2020) الذين بينوا أهمية التحسين متعدد المتغيرات في تحديد ظروف التشغيل المناسبة، ومع Dubey et al. (2022) الذين أظهروا أن دمج نسب المزج مع EGR ينتج مفاضلات مختلفة بين الكفاءة و NOx والدخان و CO و HC. وبناءً على ذلك، تقترح الدراسة الحالية الانتقال من البحث عن «أفضل وقود حيوي» بصورة عامة إلى البحث عن أفضل توليفة بين نوع الوقود ونسبة المزج والمحرك وظروف التشغيل.

كما كشفت الدراسة عن أهمية مصدر المادة الخام في تحديد الاستدامة النهائية. فالوقود المنتج من زيوت الطهي المستعملة والمخلفات يمتلك ميزة محتملة تتمثل في الاستفادة من مورد كان سيعامل بوصفه نفاية، مع الحد من المنافسة المباشرة مع المحاصيل الغذائية. وتنسجم هذه النتيجة مع Hosseinzadeh-Bandbafha et al. (2022) الذين أظهروا من خلال المراجعة المنهجية لتقييم دورة حياة الديزل الحيوي المنتج من زيوت الطهي المستعملة وجود إمكانات بيئية واعدة، كما تتوافق مع Srikumar et al. (2024) في التأكيد أن اختيار المادة الخام يمثل متغيرًا جوهريًا في البصمة البيئية. ومع ذلك، تنتقد الدراسة الحالية الافتراض بأن الوقود المنتج من المخلفات خالٍ تلقائيًا من الأعباء البيئية؛ إذ تظل عمليات الجمع والنقل والمعالجة والأسترة والطاقة والمواد الكيميائية المستخدمة ذات تأثير ينبغي إدخاله في الحساب البيئي

وعند توسيع حدود التحليل من العادم إلى دورة الحياة، أظهرت الدراسة أن انخفاض الانبعاثات أثناء تشغيل المحرك لا يمثل بمفرده دليلًا كافيًا على الاستدامة. فقد تتحقق مكاسب في مرحلة الاستخدام، في حين تنشأ أعباء بيئية في مراحل إنتاج المادة الخام أو استخراج الزيت أو التحويل أو النقل. وتتفق هذه النتيجة بصورة مباشرة مع Jeswani et al. (2020) و Hosseinzadeh-Bandbafha et al. (2022) و Srikumar et al. (2024). ويظهر هنا اختلاف منهجي مهم بين الدراسات السابقة؛ فالدراسات التجريبية للمحركات توفر قياسات أكثر دقة للأداء والانبعاثات

المباشرة، لكنها غالبًا ما تتوقف عند حدود المحرك، بينما تقدم دراسات LCAمنظورًا بيئيًا أشمل لكنها قد تعتمد على بيانات تشغيلية ثانوية. ومن ثم، فإن كلا الاتجاهين يقدم جزءًا من الصورة وليس الصورة الكاملة
وتكشف المقارنة النقدية كذلك أن الاختلاف بين نتائج الدراسات السابقة ليس ضعفًا في الأدلة بقدر ما يعكس حساسية منظومة الوقود الحيوي لظروف الاختبار .فاختلاف نوع المحرك وعدد الأسطوانات ونظام الحقن والحمل والسرعة ودرجة الحرارة ونوع المادة الخام ونسبة المزج يجعل المقارنة المباشرة بين القيم العددية محدودة ما لم توحد ظروف القياس. ويتوافق ذلك مع تفسير Verma et al. (2021) للاختلافات الناتجة عن الخصائص الفيزيائية والكيميائية، ومع مراجعة Altarazi et al. (2022)التي أبرزت تعدد العوامل المتحكمة في النتائج. ولذلك فإن أحد أوجه القصور المنهجية في الأدبيات يتمثل في محاولة تعميم نتائج تجربة منفردة على الوقود الحيوي بوصفه فئة واحدة، رغم التباين الكبير داخل هذه الفئة

النتيجة التكاملية للدراسة

في ضوء ما سبق، توصلت الدراسة الحالية إلى نتيجة مركزية مفادها أن الاستدامة البيئية للوقود الحيوي هي استدامة شرطية وليست مطلقة؛ فهي تتحقق عندما يؤدي اختيار المادة الخام ونوع الوقود ونسبة المزج وتقنية المحرك وظروف التشغيل إلى تحقيق توازن مقبول بين المحافظة على الأداء، وتحسين كفاءة استخدام الطاقة، وخفض الحزمة الكلية للانبعاثات، وتقليل الأعباء البيئية عبر دورة الحياة. وتتفق هذه الرؤية مع الاتجاه العام لدى Jeswani et al. (2020)و Verma et al. (2021) و Altarazi et al. (2022) و Srikumar et al. (2024)وXiong et al. (2024)، إلا أن الدراسة الحالية تتجاوز المعالجة المنفصلة لهذه الجوانب من خلال إعادة تركيبها ضمن مسار تفسيري واحد

خصائص الوقود الحيوي ← خصائص الاحتراق ← أداء المحرك ← كفاءة الطاقة ← الانبعاثات ← الأثر البيئي عبر دورة الحياة ← الاستدامة البيئية

وبذلك، فإن النتيجة الأكثر أهمية ليست أن الوقود الحيوي «أفضل» أو «أسوأ» من الوقود الأحفوري بصورة مطلقة، وإنما أن جدواه البيئية تتحدد بمدى نجاح منظومة الوقود–المحرك–الإنتاج في تحقيق أفضل مفاضلة ممكنة بين الطاقة والأداء والانبعاثات ودورة الحياة .وتقدم هذه النتيجة أساسًا أكثر دقة لاتخاذ القرار بشأن الوقود الحيوي من الاعتماد على مؤشر منفرد، كما تفسر بصورة منهجية جانبًا مهمًا من الاختلافات التي ظهرت بين الدراسات السابقة

9. الخاتمة

خلصت الدراسة إلى أن تقييم الاستدامة البيئية لاستخدام الوقود الحيوي في محركات الاحتراق الداخلي يتطلب تجاوز النظرة الجزئية التي تربط الاستدامة بانخفاض الانبعاثات فقط، والانتقال إلى منظور تكاملي يجمع بين خصائص الوقود، وأداء المحرك، وكفاءة الطاقة، والانبعاثات، والأثر البيئي عبر دورة الحياة .وقد أظهر التحليل النقدي المقارن للأدبيات المنشورة خلال الفترة 2020–2025 أن الوقود الحيوي يمتلك إمكانات حقيقية للحد من بعض الملوثات والمحافظة على مستويات تشغيلية مقبولة، إلا أن هذه المزايا ليست ثابتة، بل تتأثر بالمادة الخام ونسبة المزج وخصائص المحرك وظروف التشغيل وتقنيات الإنتاج والتحكم. وعليه، توصلت الدراسة إلى أن استدامة الوقود الحيوي استدامة شرطية وليست مطلقة، وأن الخيار الأكثر استدامة هو الذي يحقق أفضل توازن ممكن بين الأداء والكفاءة والانبعاثات والأثر البيئي الكلي، وهو ما ينسجم مع الإطار التكاملي الذي تبنته الدراسة .

أولًا: الاستنتاجات

1. استنادًا إلى تساؤلات الدراسة وأهدافها ونتائج التحليل النقدي المقارن، يمكن استخلاص الاستنتاجات الآتية :
2. يمثل الوقود الحيوي بديلًا واعدًا للوقود الأحفوري في محركات الاحتراق الداخلي، إلا أن جدواه البيئية والتشغيلية تختلف باختلاف نوع الوقود ومصدره وظروف استخدامه .
3. يمكن للمزائج المنخفضة والمتوسطة من الوقود الحيوي، في عدد من الحالات، المحافظة على أداء تشغيلي قريب من الوقود التقليدي، بينما قد تؤدي النسب المرتفعة إلى تغيرات في القدرة والعزم .
4. تؤثر الخصائص الفيزيائية والكيميائية، ولا سيما القيمة الحرارية واللزوجة والكثافة والمحتوى الأكسجيني، بصورة مباشرة في الاحتراق والأداء والكفاءة .
5. قد يؤدي انخفاض القيمة الحرارية لبعض أنواع الوقود الحيوي إلى ارتفاع الاستهلاك النوعي للوقود، وهو ما ينبغي إدخاله ضمن تقييم الاستدامة .
6. يميل استخدام العديد من أنواع الوقود الحيوي إلى خفض انبعاثات CO وHCوالدخان والجسيمات، وإن كانت درجة الانخفاض مرتبطة بنوع الوقود وظروف التشغيل .
7. تبقى انبعاثات NOxأكثر المؤشرات تباينًا؛ إذ قد ترتفع أو تنخفض وفق درجة حرارة الاحتراق ونسبة الأكسجين وتوقيت الحقن واستراتيجية التحكم .
8. لا توجد نسبة مزج واحدة يمكن اعتبارها مثلى لجميع أنواع الوقود الحيوي والمحركات؛ فالنسبة المثلى تتحدد وفق منظومة الوقود–المحرك–ظروف التشغيل .
9. يمكن لتقنيات تحسين التشغيل، مثل EGR وتعديل توقيت وضغط الحقن والتحسين متعدد المتغيرات، أن تحد من بعض المفاضلات بين الأداء والانبعاثات .
10. توفر المواد الخام القائمة على المخلفات، وخاصة زيوت الطهي المستعملة، فرصًا واعدة لتعزيز الاقتصاد الدائري، لكنها لا تخلو من أعباء الجمع والنقل والمعالجة والإنتاج .
11. لا يكفي تقييم انبعاثات العادم للحكم على الاستدامة؛ إذ ينبغي إدخال إنتاج المادة الخام والطاقة والنقل والتحويل واستخدام الموارد ضمن حدود التقييم .
12. يفسر اختلاف المواد الخام والمحركات ونسب المزج وظروف الاختبار جانبًا كبيرًا من التباين بين نتائج الدراسات السابقة، وهو ما يحد من صلاحية التعميم المباشر .
13. تتمثل النتيجة المركزية للدراسة في أن الاستدامة البيئية للوقود الحيوي تتحقق من خلال المفاضلة المتكاملة بين الأداء التشغيلي وكفاءة الطاقة والانبعاثات والأثر البيئي عبر دورة الحياة، وليس من خلال تفوقه في مؤشر منفرد .

ثانيًا: التوصيات

1. بناءً على الاستنتاجات السابقة، توصي الدراسة بما يأتي:
2. اعتماد تقييم متعدد المعايير عند اختيار الوقود الحيوي بدلًا من الاعتماد على مؤشر الانبعاثات وحده .
3. إعطاء الأولوية للوقود الحيوي المنتج من المخلفات والزيوت المستعملة والمواد الخام غير الغذائية متى أثبت تقييم دورة الحياة جدواه البيئية .
4. تحديد نسب المزج المثلى لكل نوع من الوقود والمحركات من خلال الاختبارات والتحسين متعدد المتغيرات .
5. تحسين خصائص الوقود الحيوي قبل الاستخدام بما يحد من آثار انخفاض القيمة الحرارية وارتفاع اللزوجة .
6. تطوير استراتيجيات الحقن والاحتراق بما يحافظ على كفاءة المحرك عند استخدام الوقود الحيوي .
7. توسيع استخدام تقنيات EGRوغيرها من استراتيجيات التحكم للحد من مشكلة NOx دون إحداث تدهور كبير في الكفاءة .
8. قياس حزمة متكاملة من الملوثات بدلًا من الاقتصار على CO أو NOxأو الجسيمات منفردة .
9. ربط نتائج الانبعاثات بالطاقة أو الشغل المفيد الناتج لضمان عدالة المقارنة بين الوقود الحيوي والوقود التقليدي .
10. دمج الاختبارات التجريبية للمحركات مع تقييم دورة الحياة (LCA) في الدراسات المستقبلية .
11. توحيد ظروف الاختبار والوحدات الوظيفية وحدود النظام قدر الإمكان لتحسين قابلية المقارنة بين الدراسات .
12. إجراء مزيد من الدراسات تحت ظروف تشغيل واقعية وطويلة الأجل للتحقق من النتائج التي توصلت إليها التجارب المختبرية .
13. توظيف الإطار التقييمي المقترح في دعم سياسات الوقود والنقل المستدام واختيار البدائل التي تحقق أفضل توازن بين الكفاءة والأداء

وخفض الأثر البيئي. ويتسق ذلك مع هدف الدراسة في بناء إطار متكامل لدعم اتخاذ القرار بشأن الوقود الحيوي .

10.المراجع

Alenezi, R., Erdiwansyah, Mamat, R., Abdullah, M. N., & Sudhakar, K. (2020). The effect of fusel-biodiesel blends on the emissions and performance of a single cylinder diesel engine. *Fuel, 279*, 118438. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118438

Altarazi, Y. S. M., Abu Talib, A. R., Yu, J., Gires, E., Abdul Ghafir, M. F., Lucas, J., & Yusaf, T. (2022). Effects of biofuel on engines performance and emission characteristics: A review. *Energy, 238*, 121910. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121910

Altarazi, Y. S. M., Abu Talib, A. R., Yusaf, T., Yu, J., Gires, E., Abdul Ghafir, M. F., & Lucas, J. (2022). A review of engine performance and emissions using single and dual biodiesel fuels: Research paths, challenges, motivations and recommendations. *Fuel, 326*, 125072. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125072

Ayazi, M., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., & Hassan, N. M. S. (2023). Experimental investigation of fuel consumption and emissions of diesel engine fueled with ternary fuel blends of diesel, biodiesel and bioethanol. *Energy Reports, 9*, 470–475. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.12.001

Aydın, M., Uslu, S., & Çelik, M. B. (2020). Performance and emission prediction of a compression ignition engine fueled with biodiesel-diesel blends: A combined application of ANN and RSM based optimization. *Fuel, 269*, 117472. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117472

Azad, K., Doppalapudi, A. T., Khan, M. M. K., Hassan, N. M. S., et al. (2023). A landscape review on biodiesel combustion strategies to reduce emission. *Energy Reports, 9*, 4413–4436. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.104

Chen, Y., & Zhang, J. (2023). Utilization of renewable biodiesel blends with different proportions for the improvements of performance and emission characteristics of a diesel engine. *Heliyon, 9*(9), e19196. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19196

Chountalas, T. D., Founti, M., & Tsalavoutas, I. (2023). Evaluation of biofuel effect on performance & emissions of a 2-stroke marine diesel engine using on-board measurements. *Energy, 278*, 127845. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127845

Dubey, A., Prasad, R. S., Singh, J. K., & Nayyar, A. (2022). Optimization of diesel engine performance and emissions with biodiesel-diesel blends and EGR using response surface methodology (RSM). *Cleaner Engineering and Technology, 8*, 100509. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100509

Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Nizami, A. S., Kalogirou, S. A., Gupta, V. K., Park, Y. K., Fallahi, A., Sulaiman, A., Ranjbari, M., Rahnama, H., Aghbashlo, M., Peng, W., & Tabatabaei, M. (2022). Environmental life cycle assessment of biodiesel production from waste cooking oil: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161*, 112411. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112411

Imwinkelried, G., Spinosa, M., Nacuse, J., Sanchez, R., Ferrero, G., Teruel, M., & Blanco, M. B. (2025). Diesel engine performance and emissions analysis with four different combinations of diesel-soybean biodiesel blends. *Journal of Cleaner Production, 492*, 144806. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144806

Jeswani, H. K., Chilvers, A., & Azapagic, A. (2020). Environmental sustainability of biofuels: A review. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 476*(2243), 20200351. https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0351

Padmanaban, J., Kandasamy, A., Venkatesan, E. P., Sura, S., Saleel, C. A., Hasan, N., et al. (2024). Sustainability study and SWOT analysis of mixed biofuel blends in engine at various injection pressure analysed by experimentally and statistically. *Scientific Reports, 14*, 31574.

Pauline, J. M. N., Sivaramakrishnan, R., Pugazhendhi, A., Anbarasan, T., & Achary, A. (2021). Transesterification kinetics of waste cooking oil and its diesel engine performance. *Fuel, 285*, 119108. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119108

Pikula, K., Zakharenko, A., & Golokhvast, K. (2020). The advances and limitations in biodiesel production: Feedstocks, oil extraction methods, production, and environmental life cycle assessment. *Green Chemistry Letters and Reviews, 13*(4), 275–294. https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1829099

Sivarethinamohan, S., Hanumanthu, J. R., Gaddam, K., Ravindiran, G., & Alagumalai, A. (2022). Towards sustainable biodiesel production by solar intensification of waste cooking oil and engine parameter assessment studies. *Science of the Total Environment, 804*, 150236. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150236

Srikumar, K., Tan, Y. H., Kansedo, J., Tan, I. S., Mubarak, N. M., Ibrahim, M. L., Yek, P. N. Y., Foo, H. C. Y., Karri, R. R., & Khalid, M. (2024). A review on the environmental life cycle assessment of biodiesel production: Selection of catalyst and oil feedstock. *Biomass and Bioenergy, 185*, 107239.