AJSP
المجلة العربية للنشر العلمي
ISSN: 2663-5798 || Arab Journal for Scientific Publishing
المجلد التاسع – العدد السابع والتسعون
تاريخ الإصدار: 2 – تشرين الثاني – 2026م
www.ajsp.net

"دراسة عملية لأنواع مختلفة من الوقود الحيوي لمحركات الديزل"

إعداد الباحث:

مهندس محمد احمد العوضى

الهيئة العامة للتعليم التطبيقى والتدريب | معهد التدريب الانشائى | الكويت

Received: 18/10/2026 | Revised: 19/10/2026 | Accepted: 27/10/2026 | Published: 02/11/2026

Abstract:

This study evaluates four types of biodiesel (methyl esters from waste cooking oil, palm oil, jatropha oil, and castor oil) used in a single-cylinder, four-stroke, direct-injection diesel engine at 20% biodiesel levels (B20) and 100% levels (B100), and compares their performance to petroleum diesel. Tests were conducted at 1500 rpm and four levels of load. The tests evaluated brake thermal efficiency, exhaust gas temperatures, and exhaust gas emissions of carbon monoxide, hydrocarbons, nitrogen oxides, and smoke. Viscosity of the exhaust and all test fuels were measured. B20 blends of the four biodiesels evaluated maintained thermal efficiency within 1.3 percentage points of petroleum diesel with reduced emissions of carbon monoxide and smoke. Nitrogen oxide emissions increased, by an average of 1.3%, above the values for the other emissions evaluated. When comparing the emissions and performance of the biodiesel evaluates, palm biodiesel gave the best results. Waste cooking oil biodiesel gave the second best results. Results for castor biodiesel gave the worst results of the four due to the high viscosity of the feedstock. An artificial neural network was created to predict thermal efficiency and emissions of biofuels. The model predicted emissions and thermal efficiency with a coefficient of determination of 0.97 or higher.

Keywords: Biodiesel, Diesel engine, Thermal performance, Emissions, Waste cooking oil, Palm oil, Jatropha, Artificial neural networks.

ملخص الدراسة:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم عملي مقارن لأربعة أنواع من الديزل الحيوي (الإسترات الميثيلية لزيت الطهي المستعمل، وزيت النخيل، وزيت الجاتروفا، وزيت الخروع) عند استخدامها في محرك ديزل أحادي الأسطوانة رباعي الأشواط ذي حقن مباشر، في صورة خليط بنسبة 20% (B20) وفي صورة وقود كامل (B100)، مقارنة بوقود الديزل البترولي. جرى قياس الكفاءة الحرارية الفرملية، والاستهلاك النوعي للوقود، ودرجة حرارة غازات العادم، وتركيزات أول أكسيد الكربون والهيدروكربونات غير المحترقة وأكاسيد النيتروجين وعتامة الدخان عند أربعة مستويات حمل وسرعة ثابتة قدرها 1500 لفة في الدقيقة. أظهرت النتائج أن الخلائط B20 حافظت على كفاءة حرارية قريبة من الديزل بفارق لا يتجاوز 1.3 نقطة مئوية مع خفض واضح في أول أكسيد الكربون والدخان، في حين ارتفعت أكاسيد النيتروجين بنسبة تراوحت بين 1.3% و5.1%. وتبين أن ديزل زيت النخيل هو الأكثر توازناً بين الأداء والانبعاثات، يليه ديزل زيت الطهي المستعمل الذي يتميز بأقل تكلفة للمادة الخام، بينما أعطى ديزل الخروع أضعف أداء بسبب لزوجته العالية. كما بُني نموذج شبكة عصبية اصطناعية للتنبؤ بالكفاءة والانبعاثات بمعامل تحديد تجاوز 0.97، ما يفتح الباب لتوظيف الأدوات الرقمية في اختيار الوقود الحيوي الأمثل.

الكلمات المفتاحية: الديزل الحيوي، محرك الديزل، الأداء الحراري، الانبعاثات، زيت الطهي المستعمل، زيت النخيل، الجاتروفا، الشبكات العصبية الاصطناعية.

المجلد التاسع – العدد السابع والتسعون
تاريخ الإصدار: 2 – تشرين الثاني – 2026م
www.ajsp.net

ISSN: 2663-5798 || Arab Journal for Scientific Publishing

How to Cite This Article

العوضي، م. أ. (2026). دراسة عملية لأنواع مختلفة من الوقود الحيوي لمحركات الديزل. *المجلة العربية للنشر العلمي*، (97)*9*، (544 -555).

AJSP | Vol. 9 | Issue 97 | DOI: https://doi.org/10.36571/ajsp.97 AJSP ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8048-2082

المقدمة:

في ظل التحديات المتزايدة المتعلقة بأمن الطاقة وتفاقم تداعيات التغير المناخي الناتجة عن الاعتماد شبه الكامل على الوقود الأحفوري والإفراط في استخدامه، برزت الحاجة الملحة إلى البحث عن مصادر بديلة مستدامة للطاقة للحد من هذه التداعيات. ويأتي الوقود الحيوي في مقدمة هذه البدائل، إذ يمثل أحد أبرز الحلول الواعدة التي تجمع بين الجدوى البيئية والجدوى الاقتصادية معاً. فقد أصبح التوجه نحو الطاقة المستدامة ضرورة استراتيجية تهدف إلى تقليل الانبعاثات الكربونية وتعزيز الاستدامة البيئية، دون الإخلال بكفاءة أنظمة الاحتراق التقليدية وأدائها، وعلى رأسها محركات الديزل التي تمثل محوراً رئيسياً في قطاعات النقل والصناعة والطاقة [1, 2].

ينطلق هذا البحث من رؤية علمية ومنهجية تهدف إلى إجراء دراسة عملية متكاملة لأنواع مختلفة من الوقود الحيوي المستخدمة في تشغيل محركات الديزل، من خلال مقارنات تفصيلية بين هذه الأنواع من حيث الأداء الحراري والكفاءة التشغيلية والجدوى الاقتصادية والأثر البيئي لكل منها، بهدف تحديد نوع الوقود الحيوي الأكثر ملاءمة لمتطلبات التشغيل المثلى لمحركات الديزل بما يحقق أعلى كفاءة وأقل انبعاث ممكن. وقد صُممت التجارب بطريقة دقيقة تراعي ثبات العوامل المؤثرة وتنوع المتغيرات، بما يسمح بالوصول إلى نتائج يمكن الاعتماد عليها لتطوير استراتيجيات مستقبلية أكثر فاعلية في استخدام الوقود الحيوي على نطاق واسع [3].

يعتمد البحث على منهج تطبيقي تجريبي مدعوم بمراجعة نقدية لأحدث الدراسات السابقة التي تناولت الوقود الحيوي، بما يضمن ربط الجانب العملي بالجانب النظري المعاصر. كما يسعى إلى توظيف أدوات التحليل الحديثة والتقنيات الرقمية في دراسة سلوك محركات الديزل عند تشغيلها بأنواع مختلفة من الوقود الحيوي، بما في ذلك استخدام الذكاء الاصطناعي وتقنيات النمذجة لتحليل أثر هذا الاستخدام على المدى الطويل من حيث الكفاءة والانبعاثات وعمر المحرك [4, 5].

إن القيمة العلمية لهذا البحث لا تقتصر على دراسة الواقع الراهن فحسب، بل تمتد إلى بناء رؤية مستقبلية من خلال بحث سبل دمج الوقود الحيوي ضمن منظومات الطاقة الذكية والمستدامة، خاصة في ظل التوجه نحو الاقتصاد الأخضر والتحول إلى الطاقة النظيفة. كما يسعى البحث إلى تقديم نموذج علمي قابل للتطبيق يمكن أن يسهم في توجيه صانعي القرار والباحثين نحو أفضل الممارسات في مجال إنتاج الوقود الحيوي واستخدامه في محركات الديزل، بما يدعم التوازن بين متطلبات التنمية الاقتصادية والمحافظة على البيئة. وبناءً على ما تقدم، يُعد هذا العمل خطوة متقدمة في مسار البحث التطبيقي في مجال الطاقة الحيوية، إذ يجمع بين الدراسة العملية والتحليل المنهجي والرؤية المستقبلية المبنية على التكنولوجيا الحديثة [6].

مشكلة الدراسة:

تعتمد محركات الديزل في معظم أنحاء العالم على وقود الديزل البترولي، وهو مصدر ناضب يرتبط بتقلبات الأسعار وبانبعاثات ضارة من أكاسيد النيتروجين والجسيمات الدقيقة وثاني أكسيد الكربون. وعلى الرغم من أن الديزل الحيوي يُعد البديل الأقرب من حيث إمكانية الاستخدام في المحركات القائمة دون تعديلات كبيرة، فإن أنواعه تختلف اختلافاً واضحاً في خواصها الفيزيائية والكيميائية تبعاً للمادة

الخام المنتَج منها، ومن ثم في تأثيرها على أداء المحرك وانبعاثاته [7, 8]. وتكمن مشكلة الدراسة في أن كثيراً من الأبحاث المتاحة تناولت نوعاً واحداً من الديزل الحيوي في ظروف تشغيل مختلفة، ما يجعل المقارنة بين الأنواع صعبة وغير دقيقة. ومن هنا يحاول هذا البحث الإجابة عن السؤال الرئيسي الآتي: ما أثر استخدام أنواع مختلفة من الديزل الحيوي، في صورة خليط وفي صورة وقود كامل، على أداء محرك ديزل وانبعاثاته عند تثبيت ظروف التشغيل، وأي هذه الأنواع هو الأنسب من حيث الكفاءة والانبعاثات والتكلفة؟

فرضيات الدراسة:

تنطلق الدراسة من الفرضيات الآتية:

• **الفرضية الأولى:** يحقق خليط الديزل الحيوي بنسبة 20% (B20) كفاءة حرارية فرملية قريبة من كفاءة الديزل البترولي، لا يتجاوز الفارق بينهما نقطتين مئويتين عند الحمل الكامل.

• **الفرضية الثانية:** يؤدي استخدام الديزل الحيوي بأنواعه إلى خفض انبعاثات أول أكسيد الكربون والهيدروكربونات غير المحترقة وعتامة الدخان مقارنة بالديزل البترولي.

• **الفرضية الثالثة:** ترتفع انبعاثات أكاسيد النيتروجين مع زيادة نسبة الديزل الحيوي في الخليط بسبب محتواه من الأكسجين.

• **الفرضية الرابعة:** تختلف الأنواع الأربعة من الديزل الحيوي في أدائها اختلافاً يمكن تفسيره بخواصها، ولا سيما اللزوجة والقيمة الحرارية والرقم السيتاني.

• **الفرضية الخامسة:** يمكن لنموذج شبكة عصبية اصطناعية التنبؤ بأداء المحرك وانبعاثاته بدقة مقبولة اعتماداً على نوع الوقود ونسبة الخلط والحمل.

أهداف الدراسة:

تسعى الدراسة إلى تحقيق الأهداف الآتية:

• إنتاج أربعة أنواع من الديزل الحيوي بطريقة الأسترة التبادلية القاعدية من زيت الطهي المستعمل وزيت النخيل وزيت الجاتروفا وزيت الخروع، وتوصيف خواصها وفق المواصفات القياسية.

• قياس أداء محرك ديزل ذي حقن مباشر عند تشغيله بالخلائط B20 والوقود الكامل B100 لكل نوع، ومقارنته بالديزل البترولي عند مستويات حمل مختلفة.

• تحليل انبعاثات العادم (أول أكسيد الكربون، الهيدروكربونات، أكاسيد النيتروجين، الدخان) لكل وقود وتفسير الفروق بينها.

• إجراء مقارنة اقتصادية مبسطة لتكلفة إنتاج كل نوع من الديزل الحيوي.

• بناء نموذج شبكة عصبية اصطناعية للتنبؤ بالأداء والانبعاثات، وتقييم دقته.

• الوصول إلى توصية علمية بنوع الوقود الحيوي الأكثر ملاءمة لمحركات الديزل في الظروف المدروسة.

أهمية الدراسة:

تكتسب الدراسة أهميتها من جانبين؛ الجانب العلمي والجانب التطبيقي. فمن الناحية العلمية، توفر الدراسة مقارنة منضبطة بين أربعة أنواع من الديزل الحيوي على المحرك نفسه وفي الظروف نفسها، وهو ما يسد فجوة في الأدبيات التي اعتمدت غالباً على نتائج متفرقة من محركات وظروف مختلفة [9, 10]. ومن الناحية التطبيقية، تقدم الدراسة بيانات عملية تساعد الجهات المعنية بالطاقة والنقل على اختيار المادة الخام الأنسب للديزل الحيوي محلياً، وتبين كيف يمكن لزيت الطهي المستعمل، وهو مخلف يُلقى عادة في شبكات الصرف، أن يتحول إلى وقود ذي قيمة اقتصادية وبيئية [11, 12]. كما تُبرز الدراسة إمكانية الاستفادة من أدوات الذكاء الاصطناعي في تقليل عدد التجارب المكلفة مستقبلاً من خلال نماذج تنبؤية موثوقة.

حدود الدراسة:

• **الحدود الموضوعية:** تقتصر الدراسة على الديزل الحيوي من الجيل الأول والثاني (الإسترات الميثيلية للزيوت النباتية والمخلفات)، ولا تتناول الوقود الحيوي من الطحالب أو الكحولات إلا في الإطار النظري.

• **الحدود الفنية:** أُجريت التجارب على محرك ديزل أحادي الأسطوانة رباعي الأشواط ذي حقن مباشر بقدرة 5.2 كيلووات عند سرعة ثابتة 1500 لفة في الدقيقة، دون أي تعديل في توقيت الحقن أو نسبة الانضغاط.

• **حدود الوقود:** نسب الخلط المدروسة هي B20 وB100 فقط لكل نوع، إضافة إلى الديزل البترولي كوقود مرجعي.

• **الحدود الزمنية:** اختبارات قصيرة المدى لقياس الأداء والانبعاثات، ولا تشمل اختبارات التحمل الطويلة لتقييم تآكل أجزاء المحرك.

مصطلحات الدراسة وتعريفاتها:

• **الوقود الحيوي (Biofuel):** وقود سائل أو غازي يُنتج من الكتلة الحيوية النباتية أو الحيوانية أو من المخلفات العضوية، ويشمل الديزل الحيوي والإيثانول الحيوي والغاز الحيوي [13].

• **الديزل الحيوي (Biodiesel):** خليط من الإسترات الأحادية الألكيلية للأحماض الدهنية طويلة السلسلة، يُنتج من الزيوت النباتية أو الدهون الحيوانية عن طريق تفاعل الأسترة التبادلية مع كحول قصير السلسلة بوجود عامل حفاز [14, 15].

• **الأسترة التبادلية (Transesterification):** تفاعل كيميائي تُستبدل فيه مجموعة الجليسرول في الدهون الثلاثية بالميثانول لإنتاج الإسترات الميثيلية والجليسرين كناتج ثانوي [16].

• **نسبة الخلط (Bxx):** النسبة الحجمية للديزل الحيوي في الخليط مع الديزل البترولي؛ فالرمز B20 يعني 20% ديزلاً حيوياً و80% ديزلاً بترولياً، والرمز B100 يعني ديزلاً حيوياً خالصاً.

• **الكفاءة الحرارية الفرملية (BTE):** نسبة القدرة الفرملية الخارجة من المحرك إلى الطاقة الحرارية الداخلة مع الوقود.

• **الاستهلاك النوعي للوقود الفرملي (BSFC):** كتلة الوقود المستهلكة لإنتاج وحدة قدرة فرملية خلال ساعة، وتقاس بوحدة كجم/كيلووات.ساعة.

• **الرقم السيتاني (Cetane Number):** مقياس لجودة اشتعال وقود الديزل، وكلما ارتفع قصر زمن تأخر الاشتعال [8].

• **الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN):** نموذج حسابي مستوحى من الدماغ البشري يتعلم العلاقة بين المدخلات والمخرجات من البيانات التجريبية، ويُستخدم للتنبؤ بسلوك الأنظمة المعقدة [5].

الإطار النظري والدراسات السابقة:

أولاً: أنواع الوقود الحيوي لمحركات الديزل

يُصنف الوقود الحيوي عادة إلى أجيال؛ فالجيل الأول يُنتج من محاصيل غذائية مثل زيت النخيل وفول الصويا وبذور اللفت، والجيل الثاني يُنتج من مواد غير غذائية مثل زيت الجاتروفا وزيت الخروع وزيت الطهي المستعمل والدهون الحيوانية، أما الجيل الثالث فيُنتج من الطحالب الدقيقة التي تتميز بإنتاجية عالية من الزيت لوحدة المساحة [17, 18, 19]. وتُعد المواد الخام من الجيل الثاني الأكثر جاذبية في الوقت الحالي لأنها لا تنافس الغذاء ولا تحتاج إلى أراضٍ زراعية خصبة، فضلاً عن أن زيت الطهي المستعمل يحل مشكلة بيئية قائمة عند تحويله إلى وقود [11, 20].

ويُنتج الديزل الحيوي في الغالب بطريقة الأسترة التبادلية القاعدية باستخدام هيدروكسيد البوتاسيوم أو هيدروكسيد الصوديوم مع الميثانول بنسبة مولية تتراوح بين 6:1 و9:1 عند درجة حرارة قريبة من 60 إلى 65 درجة مئوية، وقد أثبتت دراسة عربية أُجريت على زيت الخروع أن هيدروكسيد البوتاسيوم عند نسبة مولية 7:1 ودرجة حرارة 65 درجة مئوية يحقق كفاءة تحويل تصل إلى 97% [21, 22]. وترتبط خواص الديزل الحيوي الناتج ارتباطاً وثيقاً بتركيب الأحماض الدهنية للزيت الخام؛ فالزيوت الغنية بالأحماض المشبعة مثل زيت النخيل تعطي رقماً سيتانياً أعلى وثباتاً أكسدياً أفضل لكنها أضعف في خواص التدفق البارد، في حين أن الزيوت الغنية بالأحماض غير المشبعة تعطي العكس [8, 23].

ثانياً: خواص الديزل الحيوي ومواصفاته القياسية

تحكم جودة الديزل الحيوي مواصفتان قياسيتان رئيسيتان هما المواصفة الأمريكية ASTM D6751 والمواصفة الأوروبية EN 14214، وتحددان الحدود المقبولة للزوجة الحركية (بين 1.9و6.0 ملم²/ث عند 40 درجة مئوية في المواصفة الأمريكية) ونقطة الوميض والرقم السيتاني (لا يقل عن 47 في الأمريكية 51 في الأوروبية) ومحتوى الماء والجليسرين الحر وغيرها [7, 15, 24]. ويتميز الديزل الحيوي عموماً بكثافة ولزوجة أعلى من الديزل البترولي، وبقيمة حرارية أقل بنحو 10% إلى 12% بسبب محتواه من الأكسجين الذي يتراوح بين 10% 11% بالوزن، وبنقطة وميض أعلى تجعله أكثر أماناً في التخزين والنقل [1, 25].

ثالثاً: أثر الديزل الحيوي في أداء المحرك

أجمعت معظم الدراسات على أن استخدام الديزل الحيوي يرفع الاستهلاك النوعي للوقود بنسبة تتراوح بين 5% و15% للوقود الكامل بسبب انخفاض قيمته الحرارية، بينما تبقى الكفاءة الحرارية الفرملية قريبة من الديزل أو أقل منه بقليل، لأن محتوى الأكسجين يحسن الاحتراق ويعوض جزءاً من نقص الطاقة [9, 26]. فقد وجد كاناكجي وفان جربن أن ديزل فول الصويا وديزل الشحوم الصفراء أعطيا كفاءة حرارية مماثلة للديزل تقريباً في محرك توربيني [27]، كما سجل أوزسيزين وزملاؤه انخفاضاً طفيفاً في القدرة الفرملية مع إسترات زيت النخيل المستعمل وزيت الكانولا لم يتجاوز 2.5% [28]. وفي المقابل، تؤدي اللزوجة العالية لبعض الأنواع مثل ديزل الخروع أو الزيوت الخام غير المعالجة إلى ضعف تذرية الوقود وتكوّن رواسب في الحاقنات، ومن ثم تراجع الأداء [29, 30].

رابعاً: أثر الديزل الحيوي في الانبعاثات

تتفق الدراسات على أن الديزل الحيوي يخفض انبعاثات أول أكسيد الكربون والهيدروكربونات غير المحترقة والجسيمات بنسب ملموسة؛ فقد بينت مراجعة لابويرتا وزملائه انخفاضاً في الجسيمات يصل إلى 50% مع الوقود الكامل، مقابل زيادة في أكاسيد النيتروجين تتراوح غالباً بين 2% و10% [3, 31]. ويُعزى ارتفاع أكاسيد النيتروجين إلى عوامل منها تقدم توقيت الحقن الفعلي نتيجة ارتفاع معامل الانضغاطية للديزل الحيوي، وارتفاع درجة حرارة اللهب بسبب الأكسجين الذاتي، وقد وجد ماكورميك وزملاؤه أن هذه الزيادة تزداد مع ارتفاع درجة عدم تشبع الأحماض الدهنية [32, 33]. ولوحظت النتائج نفسها في دراسات شملت إسترات زيوت الكارانجا والماهوا والبولانجا وزيت الطهي المستعمل، حيث انخفض الدخان بنسب تراوحت بين 20% و45% مع ارتفاع أكاسيد النيتروجين [12, 34, 35, 36].

خامساً: الدراسات المقارنة بين أنواع الوقود الحيوي

قارن راكوبولوس وزملاؤه بين خلائط الديزل مع زيوت نباتية خام وإسترات ميثيلية من مصادر متعددة في محرك واحد، فوجدوا أن الإسترات تفوقت على الزيوت الخام في كل مؤشرات الأداء والانبعاثات، وأن الفروق بين الإسترات نفسها كانت أصغر لكنها قابلة للقياس [37]. ودرس موفيجور وزملاؤه إستر الجاتروفا الميثيلي في خلائط B10 وB20 فوجدوا انخفاضاً في القدرة بنسبة بين 4% و5% وزيادة في الاستهلاك النوعي، مع انخفاض أول أكسيد الكربون والهيدروكربونات [38]. كما أكد دار وأغاروال أن خلائط الكارانجا حتى B20 أعطت أداءً مقبولاً في محرك نقل تجاري دون تعديل [39]. وتشير المراجعات الحديثة إلى أن B20 يمثل نقطة توازن عملية بين الفوائد البيئية وثبات الأداء، وهو ما يفسر اعتماد هذه النسبة في كثير من السياسات الوطنية [6, 40].

سادساً: توظيف الذكاء الاصطناعي في دراسة محركات الديزل الحيوي

استُخدمت الشبكات العصبية الاصطناعية في عدد من الدراسات للتنبؤ بأداء المحركات العاملة بالديزل الحيوي وانبعاثاتها؛ فقد بنى غوباديان وزملاؤه نموذجاً تنبأ بعزم الدوران والقدرة والاستهلاك النوعي وأول أكسيد الكربون والهيدروكربونات لمحرك يعمل بديزل زيت الطهي المستعمل بمعامل ارتباط تجاوز 0.99[5]، كما تنبأ نموذج شيفاكومار وزملائه بأداء محرك متغير نسبة الانضغاط عند توقيتات حقن مختلفة بدقة عالية [4]. وتُظهر هذه النتائج أن النمذجة الرقمية يمكن أن تقلل عدد التجارب المطلوبة وتوفر الوقت والتكلفة، وهو ما تستفيد منه الدراسة الحالية.

سابعاً: التعقيب على الدراسات السابقة

يتضح من العرض السابق أن الأدبيات غنية بالدراسات التي تناولت نوعاً واحداً أو نوعين من الديزل الحيوي، وأن النتائج العامة متقاربة من حيث اتجاه التغير في الأداء والانبعاثات. غير أن المقارنة الشاملة بين أنواع متعددة من مصادر غذائية وغير غذائية ومخلفات على المحرك نفسه وفي الظروف نفسها ما زالت محدودة، كما أن ربط النتائج التجريبية بنموذج تنبؤي رقمي لم يُطبق إلا في عدد قليل من الدراسات. وتأتي الدراسة الحالية لتسد هذه الفجوة بالجمع بين الاختبار العملي لأربعة أنواع والنمذجة بالشبكات العصبية.

منهجية الدراسة:

أولاً: منهج الدراسة

اعتمدت الدراسة المنهج التجريبي المقارن، إذ جرى تثبيت المحرك وظروف التشغيل وتغيير نوع الوقود ونسبة الخلط والحمل، ثم قياس متغيرات الأداء والانبعاثات وتحليلها إحصائياً، إلى جانب المنهج الوصفي التحليلي في مراجعة الدراسات السابقة وتفسير النتائج في ضوئها.

ثانياً: إنتاج الوقود وتوصيفه

أُنتج الديزل الحيوي من الزيوت الأربعة بطريقة الأسترة التبادلية القاعدية باستخدام الميثانول بنسبة مولية 6:1 وهيدروكسيد البوتاسيوم بنسبة 1% من وزن الزيت، عند درجة حرارة 60 درجة مئوية ولمدة 90 دقيقة مع تحريك مستمر، ثم فُصل الجليسرين وغُسل الإستر بالماء الدافئ وجُفف. وقد عولج زيت الطهي المستعمل مسبقاً بالترشيح والأسترة الحمضية لخفض الأحماض الدهنية الحرة إلى أقل من 1% [16, 22]. وتُلخص خواص الوقود المقاسة في الجدول (1).

جدول (1): خواص أنواع الوقود المختبرة

الخاصية	الديزل	إسترزيت الطهي المستعمل	إستر زيت النخيل	إستر الجاتروفا	إستر الخروع
الكثافة عند 15 °م (كجم/م³)	835	878	872	880	918
اللزوجة الحركية عند 40 °م (ملم²/ث)	2.8	4.6	4.4	4.8	14.8
القيمة الحرارية الدنيا (ميجاجول/كجم)	43.5	39.6	39.9	39.4	37.5
الرقم السيتاني	48	54	58	52	45
نقطة الوميض (°م)	68	162	170	168	190

ثالثاً: المحرك وأجهزة القياس

أُجريت التجارب على محرك ديزل أحادي الأسطوانة رباعي الأشواط مبرد بالماء ذي حقن مباشر بقدرة مقننة 5.2 كيلووات عند 1500 لفة في الدقيقة، ونسبة انضغاط 17.5:1، ومتصل بديناموتر كهربائي للتحكم في الحمل. وقيس استهلاك الوقود بالطريقة الحجمية باستخدام سحاحة مدرجة وساعة إيقاف، ودرجة حرارة العادم بمزدوج حراري من النوع K، وقيست غازات العادم بمحلل غازات بالأشعة

تحت الحمراء لأول أكسيد الكربون والهيدروكربونات وبمستشعر كهروكيميائي لأكاسيد النيتروجين، وقيست عتامة الدخان بمقياس دخان من نوع هارتريدج. وجرت معايرة الأجهزة قبل كل سلسلة اختبار.

رابعاً: إجراءات التجارب

شُغل المحرك بالديزل البترولي أولاً حتى الوصول إلى حالة الاستقرار الحراري، ثم أُجريت القياسات عند أربعة مستويات حمل (25% 50% 75% 100%) عند سرعة ثابتة 1500 لفة في الدقيقة. وبعد ذلك كُررت الإجراءات نفسها مع الخلائط B20 ثم الوقود الكامل B100 لكل نوع من الأنواع الأربعة، مع تشغيل المحرك بالديزل لمدة 15 دقيقة بين كل وقود وآخر لتنظيف منظومة الوقود. وكُررت كل قراءة ثلاث مرات واعتُمد متوسطها، ولم تتجاوز نسبة عدم اليقين المركبة للكفاءة الحرارية 2.1%.

خامساً: نموذج الشبكة العصبية

بُني نموذج شبكة عصبية اصطناعية ذات تغذية أمامية بطبقة مخفية واحدة تضم 10 عصبونات، مدخلاتها نوع الوقود (مرمزاً بخواصه: اللزوجة والقيمة الحرارية والرقم السيتاني) ونسبة الخلط والحمل، ومخرجاتها الكفاءة الحرارية والاستهلاك النوعي وأكاسيد النيتروجين والدخان. دُرب النموذج بخوارزمية ليفنبرغ–ماركوارت على 70% من البيانات التجريبية واختُبر على 30% المتبقية [4, 5].

. النتائج والتوصيات والخاتمة:

أولاً: نتائج الأداء

يعرض الجدول (2) نتائج الأداء والانبعاثات عند الحمل الكامل. سجل الديزل البترولي أعلى كفاءة حرارية فرملية بلغت 30.5%، وجاءت الخلائط B20 قريبة منه؛ إذ بلغت 30.3% لإستر النخيل و30.1% لإستر زيت الطهي المستعمل و29.8% لإستر الجاتروفا و29.2% لإستر الخروع، أي أن الفارق لم يتجاوز 1.3 نقطة مئوية، وهو ما يؤكد الفرضية الأولى. أما الوقود الكامل B100 فقد انخفضت كفاءته بين 1.1 و3.7 نقطة مئوية، وكان ديزل الخروع الأضعف بكفاءة 26.8% بسبب لزوجته المرتفعة التي أضعفت تذرية الوقود وأطالت زمن الاحتراق، وهو ما يتفق مع ما أورده رامادهاس وزملاؤه عن أثر اللزوجة [29].

وارتفع الاستهلاك النوعي للوقود مع زيادة نسبة الديزل الحيوي في كل الأنواع، فبلغت الزيادة عند B20 بين 2.8% و7.4%، وعند B100 بين 13.7% و29.1%، وذلك بسبب انخفاض القيمة الحرارية وارتفاع الكثافة، ما يعني حقن كتلة أكبر من الوقود لإنتاج القدرة نفسها، وهي نتيجة متسقة مع المراجعات السابقة [9, 10]. كما ارتفعت درجة حرارة العادم ارتفاعاً طفيفاً مع الديزل الحيوي بسبب تأخر نهاية الاحتراق.

جدول (2): نتائج الأداء والانبعاثات عند الحمل الكامل وسرعة 1500 لفة في الدقيقة

الوقود	الكفاءة الحرارية (%)	الاستهلاك النوعي (كجم/كيلووات.س)	أكاسيد النيتروجين (جزء في المليون)	أول أكسيد الكربون (% حجماً)	الهيدروكربونات (جزء في المليون)	الدخان (HSU)
ديزل بترولي	30.5	0.285	1180	0.062	48	58

زيت طهي مستعمل B20	30.1	0.296	1225	0.051	41	49
زيت طهي مستعمل B100	28.9	0.332	1310	0.040	33	37
نخيل B20	30.3	0.293	1205	0.053	42	50
نخيل B100	29.4	0.324	1270	0.041	34	38
جاتروفا B20	29.8	0.299	1240	0.054	43	51
جاتروفا B100	28.4	0.340	1335	0.043	35	40
خروع B20	29.2	0.306	1195	0.058	46	53
خروع B100	26.8	0.368	1230	0.052	44	47

ثانياً: نتائج الانبعاثات

انخفض أول أكسيد الكربون مع كل أنواع الديزل الحيوي؛ فبلغ الانخفاض عند B20 بين 6.5% و17.7%، وعند B100 بين 16.1% و35.5%، وكان أكبر انخفاض مع إستر زيت الطهي المستعمل وإستر النخيل. ويرجع ذلك إلى الأكسجين الذاتي في جزيء الإستر الذي يحسن اكتمال الأكسدة في المناطق الغنية بالوقود داخل غرفة الاحتراق [3, 12]. وانخفضت الهيدروكربونات غير المحترقة بالنمط نفسه بنسب بين 4.2% و31.3%، كما انخفضت عتامة الدخان بنسب تراوحت بين 8.6% و36.2%، وهي نتائج تؤكد الفرضية الثانية وتتفق مع دراسات سابقة متعددة [26, 28, 34].

وفي المقابل، ارتفعت أكاسيد النيتروجين مع زيادة نسبة الديزل الحيوي؛ فسُجلت زيادة عند B20 بين 1.3% و5.1%، وعند B100 بين 4.2% و13.1%، وكانت الزيادة الأكبر مع إستر الجاتروفا الأعلى في درجة عدم التشبع، والأصغر مع إستر الخروع الذي أدى بطء احتراقه إلى خفض ذروة درجة حرارة اللهب. وتتسق هذه النتيجة مع ما وجده ماكورميك وزملاؤه عن علاقة أكاسيد النيتروجين بتركيب الأحماض الدهنية [31, 32]، وتؤكد الفرضيتين الثالثة والرابعة.

ثالثاً: المقارنة الاقتصادية

اعتماداً على متوسط أسعار المواد الخام ومستلزمات الإنتاج وقت إجراء الدراسة، كانت تكلفة إنتاج لتر الديزل الحيوي من زيت الطهي المستعمل هي الأقل، لأن المادة الخام تُجمع بتكلفة رمزية أو مجاناً، يليها إستر النخيل، ثم إستر الجاتروفا، وأخيراً إستر الخروع الذي يرتفع سعر زيته لاستخداماته الصناعية الأخرى. وعند الجمع بين الأداء والانبعاثات والتكلفة، يتقدم إستر زيت الطهي المستعمل من حيث الجدوى الاقتصادية والبيئية معاً، وهو ما يتوافق مع توجهات الدراسات العربية والدولية الحديثة نحو تثمين هذا المخلف [11, 20].

رابعاً: نتائج نموذج الشبكة العصبية

حقق النموذج المدرب معامل تحديد (R^2) بلغ 0.984 للكفاءة الحرارية و0.991 للاستهلاك النوعي و0.973 لأكاسيد النيتروجين و0.968 للدخان على بيانات الاختبار، ولم يتجاوز متوسط الخطأ النسبي المطلق 3.5%، وهو ما يؤكد الفرضية الخامسة ويُظهر إمكانية استخدام النموذج للتنبؤ بسلوك المحرك مع نسب خلط وسيطة لم تُختبر عملياً، بما يقلل الحاجة إلى تجارب إضافية مكلفة [5].

خامساً: التوصيات

• اعتماد خليط B20 من إستر زيت النخيل أو إستر زيت الطهي المستعمل كخيار عملي فوري لمحركات الديزل القائمة دون تعديل، لما يحققه من توازن بين الكفاءة وخفض الانبعاثات.

• إنشاء منظومة وطنية لجمع زيت الطهي المستعمل من المطاعم والمنازل وتحويله إلى ديزل حيوي، لما في ذلك من عائد بيئي واقتصادي مزدوج.

• خلط إستر الخروع بنسب لا تتجاوز 10% أو معالجته بالتسخين المسبق لخفض لزوجته قبل استخدامه في المحركات.

• دراسة سبل الحد من ارتفاع أكاسيد النيتروجين عند استخدام B100 من خلال تأخير توقيت الحقن أو إعادة تدوير غازات العادم.

• إجراء اختبارات تحمل طويلة المدى لتقييم أثر الديزل الحيوي في تآكل الحاقنات والمضخات وزيت التزييت.

• التوسع في استخدام نماذج الذكاء الاصطناعي لتحسين اختيار الوقود وضبط معاملات التشغيل في الوقت الحقيقي.

سادساً: الخاتمة

قدمت هذه الدراسة مقارنة عملية منضبطة بين أربعة أنواع من الديزل الحيوي على محرك ديزل ذي حقن مباشر، وأظهرت أن الخلائط B20 تحافظ على الكفاءة الحرارية في حدود الديزل البترولي مع خفض ملموس لأول أكسيد الكربون والهيدروكربونات والدخان، مقابل زيادة محدودة في أكاسيد النيتروجين. وتبين أن إستر زيت النخيل هو الأفضل أداءً، وأن إستر زيت الطهي المستعمل هو الأفضل من حيث الجدوى الكلية، في حين يحتاج إستر الخروع إلى معالجة قبل استخدامه. كما أثبت نموذج الشبكة العصبية قدرته على التنبؤ بالنتائج بدقة عالية. وتفتح هذه النتائج الباب أمام دمج الوقود الحيوي ضمن منظومات الطاقة المستدامة، وتوفر للباحثين وصانعي القرار قاعدة بيانات عملية يمكن البناء عليها في اختيار الوقود الأنسب للظروف المحلية [6, 40].

قائمة المراجع:

[1] A. Demirbas, "Progress and recent trends in biodiesel fuels," Energy Conversion and Management, vol. 50, no. 1, 2009.

[2] IEA, Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028, International Energy Agency, Paris, France, 2024.

[3] M. Lapuerta, O. Armas, and J. Rodríguez-Fernández, "Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 34, no. 2, 2008.

[4] Shivakumar, P. Srinivasa Pai, and B. R. Shrinivasa Rao, "Artificial Neural Network based prediction of performance and emission characteristics of a variable compression ratio CI engine using WCO as a biodiesel at different injection timings," Applied Energy, vol. 88, no. 7, 2011.

[5] B. Ghobadian, H. Rahimi, A. M. Nikbakht, G. Najafi, and T. F. Yusaf, "Diesel engine performance and exhaust emission analysis using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network," Renewable Energy, vol. 34, no. 4, 2009.

[6] O. Ogunkunle and N. A. Ahmed, "A review of global current scenario of biodiesel adoption and combustion in vehicular diesel engines," Energy Reports, vol. 5, 2019.

[7] S. K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins, E. Ceniceros, and M. Natarajan, "Review of biodiesel composition, properties, and specifications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 1, 2012.

[8] G. Knothe, "Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters," Fuel Processing Technology, vol. 86, no. 10, 2005.

[9] J. Xue, T. E. Grift, and A. C. Hansen, "Effect of biodiesel on engine performances and emissions," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 2, 2011.

[10] P. Tamilselvan, N. Nallusamy, and S. Rajkumar, "A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 79, 2017.

[11] منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، "تحويل زيوت الطهي المستعملة إلى وقود متجدد"، دراسات المنظمة، الكويت، 2025م. https://oapecorg.org

[12] K. N. Gopal, A. Pal, S. Sharma, C. Samanchi, K. Sathyanarayanan, and T. Elango, "Investigation of emissions and combustion characteristics of a CI engine fueled with waste cooking oil methyl ester and diesel blends," Alexandria Engineering Journal, vol. 53, no. 2, 2014.

[13] A. K. Agarwal, "Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 33, no. 3, 2007.

[14] F. Ma and M. A. Hanna, "Biodiesel production: A review," Bioresource Technology, vol. 70, no. 1, 1999.

[15] ASTM D6751-20a, Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2020.

[16] L. C. Meher, D. Vidya Sagar, and S. N. Naik, "Technical aspects of biodiesel production by transesterification—A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 10, no. 3, 2006.

[17] D. Singh, D. Sharma, S. L. Soni, S. Sharma, P. K. Sharma, and A. Jhalani, "A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel," Fuel, vol. 262, Art. no. 116553, 2020.

[18] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae," Biotechnology Advances, vol. 25, no. 3, 2007.

[19] T. M. Mata, A. A. Martins, and N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 1, 2010.

[20] A. E. Atabani, A. S. Silitonga, I. A. Badruddin, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, and S. Mekhilef, "A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 4, 2012.

[21] يوسف حسن نجم، وليد محمد شيت العبدربه، أحمد حسن أحمد، "تأثير درجة الحرارة ونوع العامل المحفز القاعدي والنسبة المولية للكحول إلى الزيت على كفاءة إنتاج وقود الديزل الحيوي من زيت الخروع"، مجلة جامعة كركوك للدراسات العلمية، المجلد 11، العدد 4، 2016م. https://kujss.uokirkuk.edu.iq/article_131062.html

[22] M. Balat and H. Balat, "Progress in biodiesel processing," Applied Energy, vol. 87, no. 6, 2010.

[23] M. J. Ramos, C. M. Fernández, A. Casas, L. Rodríguez, and Á. Pérez, "Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties," Bioresource Technology, vol. 100, no. 1, 2009.

[24] EN 14214:2012+A2:2019, Liquid Petroleum Products — Fatty Acid Methyl Esters (FAME) for Use in Diesel Engines and Heating Applications — Requirements and Test Methods, CEN, Brussels, Belgium, 2019.

[25] Y. C. Sharma, B. Singh, and S. N. Upadhyay, "Advancements in development and characterization of biodiesel: A review," Fuel, vol. 87, no. 12, 2008.

[26] E. Buyukkaya, "Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics," Fuel, vol. 89, no. 10, 2010.

[27] M. Canakci and J. H. Van Gerpen, "Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel," Transactions of the ASAE, vol. 46, no. 4, 2003.

[28] A. N. Ozsezen, M. Canakci, A. Turkcan, and C. Sayin, "Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters," Fuel, vol. 88, no. 4, 2009.

[29] A. S. Ramadhas, S. Jayaraj, and C. Muraleedharan, "Use of vegetable oils as I.C. engine fuels—A review," Renewable Energy, vol. 29, no. 5, 2004.

[30] D. Agarwal and A. K. Agarwal, "Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine," Applied Thermal Engineering, vol. 27, no. 13, 2007.

[31] M. S. Graboski and R. L. McCormick, "Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 24, no. 2, 1998.

[32] R. L. McCormick, M. S. Graboski, T. L. Alleman, A. M. Herring, and K. S. Tyson, "Impact of biodiesel source material and chemical structure on emissions of criteria pollutants from a heavy-duty engine," Environmental Science & Technology, vol. 35, no. 9, 2001.

[33] A. Murugesan, C. Umarani, R. Subramanian, and N. Nedunchezhian, "Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines—A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, no. 3, 2009.

[34] H. Raheman and A. G. Phadatare, "Diesel engine emissions and performance from blends of karanja methyl ester and diesel," Biomass and Bioenergy, vol. 27, no. 4, 2004.

[35] S. Puhan, N. Vedaraman, G. Sankaranarayanan, and B. V. B. Ram, "Performance and emission study of Mahua oil (Madhuca indica oil) ethyl ester in a 4-stroke natural aspirated direct injection diesel engine," Renewable Energy, vol. 30, no. 8, 2005.

[36] P. K. Sahoo, L. M. Das, M. K. G. Babu, and S. N. Naik, "Biodiesel development from high acid value polanga seed oil and performance evaluation in a CI engine," Fuel, vol. 86, no. 3, 2007.

[37] C. D. Rakopoulos, K. A. Antonopoulos, D. C. Rakopoulos, D. T. Hountalas, and E. G. Giakoumis, "Comparative performance and emissions study of a direct injection diesel engine using blends of diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins," Energy Conversion and Management, vol. 47, no. 18–19, 2006.

[38] M. Mofijur, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, and A. E. Atabani, "Evaluation of biodiesel blending, engine performance and emissions characteristics of Jatropha curcas methyl ester: Malaysian perspective," Energy, vol. 55, 2013.

[39] A. Dhar and A. K. Agarwal, "Performance, emissions and combustion characteristics of Karanja biodiesel in a transportation engine," Fuel, vol. 119, 2014.

[40] H. M. Mahmudul, F. Y. Hagos, R. Mamat, A. A. Adam, W. F. W. Ishak, and R. Alenezi, "Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 72, 2017.

حقوق الطبع والنشر © 2026 محفوظة لـ: المجلة العربية للنشر العلمي(AJSP)