مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٩) العدد (١٤) ٢٠٢٥
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (9) No. (14) 2025

التحليل التشخيصي لانبعاثات غازات العادم ومؤشرات الدخان لمحرك ديزل ذو استطاعة متوسطة تحت ظروف تشغيل مختلفة

أ. د. م. ثائر احمد ابراهيم*

د. م. عدنان علي أحمد**

م. ميس عبد الوهاب ابراهيم***

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٨/٦ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٥/١١/٩)

□ ملخّص □

يهدف هذا البحث إلى تطوير منهجية تشخيصية فعّالة لتحديد أعطال محرك ديزل من نوع Ford ZSD-424مزود بشاحن توربيني ونظام حقن الكتروني، وهو محرك تجريبي ذو استطاعة (24 kw)، عمره الاستثماري أكثر من ٢٥٠ ساعة عمل. من خلال تحليل انبعاثات غازات العادم، ومؤشرات الضبابية والدخان عند أربع حالات تشغيل مختلفة (الحالة الطبيعية، انخفاض ضغط السحب، انخفاض ضغط الأسطوانة، انخفاض كمية الوقود المحقون في الاسطوانات). حيث تم جمع وتحليل بيانات القياس باستخدام جهاز تحليل غازات العادم لقياس كفاءة الاحتراق وجهاز الضبابية والدخان لتقييم جودة الاحتراق الجسيمي.

تم تحليل كل مؤشر ضمن حالات التشغيل الأربعة وربطه بنوع العطل المحتمل، ثم اقتراح حلول عملية لكل حالة. وقد أظهرت النتائج أن كل حالة لها أثر مختلف على المؤشرات حيث انحرفت القيم عن المجال المسموح به لغازات العادم (O_2 CO_2, CO, HC, NOx) فكانت نسبة الانحراف في حالة انخفاض الضغط في مجاري السحب على التتالي بمقدار% (16.4, 17.46, 4.7, 18, 11)، ونسبة الانحراف في حالة انخفاض ضغط الاسطوانات على التتالي بمقدار % (16.4, 15.4, 20, 19.6, 14.29)، وكانت نسبة الانحراف في حالة انخفاض كمية الوقود على التتالي بمقدار % (2.5, 19.42, 20.9, 19.9, 17.3) والتي تعتبر مؤشراً على حدوث أعطال في أنظمة الحقن والإشعال، وكانت النسبة المئوية لانحراف القيم عن المجال المسموح به لمؤشرات الضبابية والدخان (Opacity, K, FSN) في حالة انخفاض الضغط في مجاري السحب على التتالي % (17, 18.9, 8)، وفي حالة انخفاض ضغط الاسطوانات على التتالي % (16.16, 14.5, 18.8)، وكانت نسبة الانحراف في حالة انخفاض كمية الوقود على التتالي % (8.7, 4, 1.4)، والتي تعتبر مؤشراً على حدوث عطل في حساس الضغط ووحدة التحكم الالكتروني (ECU)، مما يتيح إمكانية بناء نموذج للتشخيص المبكر والكشف اللحظي عن الأعطال والصيانة التنبؤية.

الكلمات المفتاحية: محرك ديزل، كشف الأعطال، غازات العادم، الضبابية، الدخان.

* أستاذ في كلية الهندسة التقنية، قسم هندسة الأتمتة الصناعية– جامعة طرطوس.

** أستاذ مساعد في كلية الهندسة التقنية، قسم هندسة المكننة الزراعية– جامعة طرطوس.

*** طالبة دراسات عليا (دكتوراه) في كلية الهندسة التقنية، قسم هندسة الأتمتة الصناعية– جامعة طرطوس.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٩) العدد (١٤) ٢٠٢٥
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (9) No. (14) 2025

Diagnostic Analysis Of Exhaust Gas Emissions And Smoke Indicators Of a Medium-Power Diesel Engine Under Different Operating Conditions

Dr. Their Ahmad Ibrahim *
Dr. Adnan Ali Ahmad **
Eng. Mays Abd Alwahab Ibrahim***

(Received 6/8/2025 . Accepted 9/11/2025)

□ **ABSTRACT** □

This research aims to develop an effective diagnostic methodology for identifying faults in a Ford ZSD-424 turbocharged diesel engine with an electronic injection system It is a 24 kW experimental engine with an investment life of more than 250 working hours. This methodology is based on analyzing exhaust gas emissions, fog and smoke indicators at four different operating conditions: normal, low intake pressure, low cylinder pressure, and reduced fuel injection.

Each indicator within the four operating conditions was analyzed and linked to the type of potential failure, and practical solutions were then proposed for each case. The results showed that each condition had a different impact on the indicators, with values deviating from the permissible range for exhaust gases (O_2 CO_2, CO, HC, Nox), The percentage of deviation in the case of low pressure in the intake ducts was (11, 18, 4.7, 17.46, 16.4%), the percentage of deviation in the case of low cylinder pressure was (14.29, 19.6, 20, 15.4, 16.4%), and the percentage of deviation in the case of low fuel quantity was (17.3, 19.9, 20.9, 19.42, 2.5%), which is considered an indicator of malfunctions in the injection and ignition systems. The percentage deviation of values from the permissible range for the fog and smoke indicators (Opacity, K, FSN) in the case of low pressure in the intake ducts was (8, 18.9, 17)% respectively, and in the case of low cylinder pressure was (18.8, 14.5, 16.16)% respectively, and the percentage deviation in the case of low fuel quantity was (1.4, 4, 8.7)% respectively. This is considered an indicator of a malfunction in the pressure sensor and the electronic control unit (ECU), which allows for the possibility of building a model for early diagnosis, real-time fault detection, and predictive maintenance.

Keywords: Diesel engine, fault detection, exhaust gases, opacity, smoke.

1- المقدمة

تُعد محركات الديزل الحديثة، والمزودة بأنظمة شحن توربيني وتحكم إلكتروني في الحقن، من العناصر الرئيسية في التطبيقات الصناعية والنقل، نظراً لكفاءتها العالية وقدرتها على العمل تحت ظروف تشغيل قاسية. ومع ذلك فإنَ أدائها يتأثر بشكل مباشر بعدة متغيرات تشغيلية، مثل ضغط الهواء الداخل، ضغط الأسطوانة، كمية الوقود المحقونة، واستراتيجية توقيت الحقن. أي اضطراب في هذه المتغيرات يمكن أن يؤدي إلى تغيرات ملحوظة في سلوك المحرك، تظهر من خلال زيادة انبعاثات غازات العادم، وارتفاع مؤشرات الضبابية والدخان. [1,2]

في الحقيقة، إنَ تحليل غازات العادم من الأدوات الأساسية في تقييم كفاءة الاحتراق وتشخيص أعطال محركات الديزل إذ توفر نسب مكونات العادم مؤشرات مباشرة عن جودة عملية الاحتراق ونوعية الخليط الداخل إلى الأسطوانة. في المحركات المزودة بشواحن توربينية وأنظمة حقن الكترونية، قد يؤدي انخفاض ضغط السحب، أو انخفاض ضغط الانضغاط داخل الأسطوانة، أو نقص كمية الوقود المحقونة إلى تدهور أداء المحرك وزيادة ملحوظة في الانبعاثات الضارة مثل (أول أكسيد الكربون(CO)، الهيدروكربونات غير المحترق(HC)، وأكاسيد النيتروجين (NOx)) .

لذلك تعددت الدراسات حول تشخيص أعطال محركات الديزل حيث قام الباحث (Fang, 2022) بإجراء دراسة حول أداء محركات الديزل في المناطق المرتفعة، لاحظ الباحث أن انخفاض كثافة الهواء الداخل إلى الأسطوانة يقلل من كفاءة الاحتراق ويزيد من انبعاثات العادم، مع تدني الضغط داخل الأسطوانة. [3]

كما قام الباحث (Sharma, 2019) بتحليل مكونات غازات العادم (CO, CO_2, O_2, HC, NOx) لتحديد نوعية العطل داخل غرفة الاحتراق لمحركات الديزل، خلُصت الدراسة إلى أن غازات العادم تمثل مؤشراً كافياً لتشخيص عدة أعطال دون الحاجة إلى تدخل ميكانيكي مباشر. [4]

كما قام الباحث (Zhang, 2020) بدراسة اعتمدت على تحليل بيانات الحساسات المتعددة (غازات العادم الاهتزاز، الضغط) لتشخيص أعطال محركات الديزل باستخدام خوارزميات التعلم الآلي (SVM& ANN)وأظهرت النتائج دقة عالية في التمييز بين الأعطال، وأوصى الباحث بتكامل أنظمة الحساسات مع وحدات التحكم الذكية لتحقيق تشخيص وتنبؤ ذاتي بالأعطال. [5]

مما سبق، سنحاول في هذا البحث تشخيص أعطال محركات الديزل متوسطة الاستطاعة وأسبابها باستخدام آلية متكاملة تعتمد على تحليل بيانات مأخوذة من جهاز تحليل غازات العادم وجهاز قياس الضبابية والدخان لتحديد نوع العطل واقتراح طريقة المعالجة المناسبة .

2- مشكلة البحث وأهميته

تواجه محركات الديزل الحديثة المزودة بأنظمة التحكم الالكتروني تحديات كبيرة في الحفاظ على الأداء الأمثل عند ظروف تشغيل متنوعة، وتُعد أعطال أنظمة الحقن والاحتراق والهواء من أكثر المشكلات شيوعاً والتي يصعب التنبؤ المبكر بها دون وجود نظام تشخيص متكامل للمحرك.

تكمن أهمية هذا البحث في تشخيص أعطال محركات الديزل ذات الاستطاعة المتوسطة باستخدام حساسات قادرة على مراقبة التغيرات الدقيقة في انبعاثات العادم ومؤشرات الضبابية والدخان، لتشخيص الأعطال بدقة واقتراح الحلول في مراحل مبكرة، مما يسهم في تقليل التكاليف وتحسين كفاءة التشغيل.

٣- هدف البحث

يهدف البحث إلى بناء نموذج تشخيصي للأعطال الميكانيكية في محرك الديزل متوسط الاستطاعة من خلال:

- تقييم مؤشرات غازات العادم عند ظروف تشغيل مختلفة.
- تحليل مؤشرات الدخان وعلاقتها بكفاءة الاحتراق.
- دراسة أثر انحراف القراءات على تشخيص الأعطال.
- اقتراح حلول تصحيحية لكل حالة تشغيل غير طبيعية.

4- طرائق البحث ومواده

تم إجراء الدراسة على محرك ديزل رباعي الأشواط متوسط الاستطاعة من نوع Ford ZSD-424 مزود بشاحن توربيني ونظام حقن الكتروني، وهو محرك تجريبي ذو استطاعة ٢٤ kw، عمره الاستثماري أكثر من ٢٥٠ ساعة عمل، مبين في الشكل (١). تم جمع وتحليل بيانات القياس باستخدام منظومة متعددة الحساسات تشمل:

-جهاز تحليل غازات العادم Emission Automotive Gas Analyzer (O_2, CO_2, CO, NOx, Hc) لقياس كفاءة الاحتراق، الشركة المصنعة (KOENG) وهو كوري الصنع من طراز (KEG-500)موضح في الشكل (2)، تاريخ صناعته تقريباً في أواخر العقد السابق، وبلغت تكرارية القياس FS= ±2% يعني أن أقصى انحراف متوقع عند إعادة نفس القياس عدة مرات لا يتجاوز ±٢% من القيمة الكاملة للمجال، وكان زمن استجابة الجهاز حوالي ١٠ ثوانٍ.

-جهاز الضبابية والدخان Opacity Smoke Meter (Opacity, K, FSN) لتقييم جودة الاحتراق الجسيمي الموضح في الشكل (3) وهو من طراز (OP-201) يحمل اسم العلامة التجارية (KOENG)بلد المنشأ كوريا تاريخ صناعته ٢٠٢٠، تبلغ دقة الجهاز1%>، وزمن الاستجابة 0.5 ثانية.

الشكل (١) : محرك ديزل رباعي الاشواط (FORD ZSD-424)

الشكل (٢) : جهاز قياس غازات العادم(KEG-500)

الشكل (٣) : جهاز قياس الضبابية والدخان

تمت الدراسة عند أربع حالات تشغيل هي:

١-حالة العمل الطبيعي.

٢-حالة انخفاض ضغط السحب.

٣-حالة انخفاض ضغط الأسطوانة.

٤-حالة تقليل كمية الوقود المحقون.

إن تخفيض الضغط في الاسطوانة ليس جزءاً من دورة عمل المحرك، بل هو نظام مساعد يُستخدم في الشاحنات الثقيلة للمساعدة في إبطائها دون الاعتماد الكامل على الفرامل الميكانيكية، مما يحميها من التلف بسبب السخونة الزائدة أثناء النزول من المرتفعات. هنا تم تخفيض الضغط في الاسطوانة باتباع الخطوات التالية أثناء دورة العادم:

شوط الضغط: في نهاية شوط الضغط يكون الهواء مضغوطاً بشدة داخل الأسطوانة وتصل درجة حرارته إلى مئات الدرجات المئوية. هذه الطاقة المخزنة (على شكل ضغط وحرارة) هي التي تشغل المحرك في الظروف العادية.

فتح صمام العادم مبكراً: بدلاً من ترك هذه الطاقة تدفع المكبس للأسفل في شوط القدرة، يقوم نظام الكبح بفتح صمام العادم في نهاية شوط الضغط.

تحرير الطاقة المخزنة: يؤدي فتح صمام العادم فجأة إلى خروج الهواء المضغوط والساخن بسرعة كبيرة إلى أنابيب العادم. بدلاً من تحويل طاقة الضغط إلى حركة دورانية لعمود المرفق، تتبدد هذه الطاقة على شكل ضجيج واهتزازات وحرارة في العادم.

شوط السحب: عندما يتحرك المكبس للأسفل في شوط السحب، يكون الضغط داخل الأسطوانة قد انخفض بشدة، لذلك لا يبذل عمود المرفق جهد لسحب الهواء، بل يجب عليه بذل جهد لتحريك المكبس ضد فراغ جزئي.

ينخفض الضغط داخل الأسطوانة تقريباً إلى ضغط يقترب من الضغط الجوي (١ بار).

أما بالنسبة لتخفيض الضغط في مجاري السحب فهو جزء أساسي من دورة عمل المحرك وهدفه الرئيسي هو خفض انبعاثات أكاسيد النيتروجين (NOx) الضارة. حيث يتم أخذ جزء من غازات العادم (التي تم احتراقها

مسبقاً) بعد خروجها من رأس الأسطوانة. ثم تبريد الغاز: يتم تمرير غاز العادم عبر مبادل حراري (cooler) لتبريده.

ومن ثم إعادة تدويره إلى مجرى السحب: يتم حقن هذا الغاز المبرد مرة أخرى في مجرى الهواء الساحب (قبل دخوله إلى الأسطوانة) عبر صمام (EGR). حيث يتم تقليل تدفق الهواء الداخل بنسبة تقارب ١٠–١٥ % من الضغط الاسمي.

–دراسة تحليلية لغازات العادم ومؤشرات الدخان

٥–١ تحليل غازات العادم:

يُعد تحليل انبعاثات غازات العادم من أهم مؤشرات كفاءة الاحتراق الداخلي، حيث يشير انخفاض أو ارتفاع تركيز غاز معين إلى وجود خلل في كمية الهواء أو الوقود، أو توقيت الحقن، أو كفاءة الاحتراق بشكل عام. [6]

تم حساب نسبة الانحراف بالعلاقة التالية:

$$\text{نسبة الانحراف} = \frac{\text{القيمة العليا} - \text{متوسط القيمة عند التشغيل الطبيعي}}{\text{القيمة العليا}} * 100$$

هذه العلاقة تعبر عن نسبة ابتعاد أو اقتراب القيم الطبيعية عن الحد الأعلى. إذا كانت النسبة قريبة من ١٠٠ % يعني أن المتوسط الطبيعي منخفض جداً مقارنة بالحد الأعلى. وإذا كانت النسبة قريبة من الصفر يعني أن المتوسط الطبيعي يقترب من القيمة العليا. يوضح الجدول (1) قيم غازات العادم التي تم قياسها عند كل حالة عمل

جدول ١: قياس غازات العادم عند كل حالة عمل من الحالات المدروسة.

البارامتر	مجال العمل في حالة العمل الطبيعي	القيمة المقاسة في حالة انخفاض الضغط في مجاري السحب	القيمة المقاسة في حالة انخفاض ضغط الاسطوانات	القيمة المقاسة في حالة انخفاض كمية الوقود
O2(%)	9.69 – 14.52	13	13.5	14
Co2(%)	1.4 – 2.7	2.5	2.55	2.56
Co(%)	0.01 – 0.05	0.021	0.025	0.0253
Hc(ppm)	10 – 24	20.5	20	21
NOx(ppm)	300-900	700	700	600

تم أخذ القراءات عند سرعة عمل متوسطة n=1500 rpm، بدون تحميل. يوضح الجدول (٢) حساب نسبة الانحراف لكل مؤشر من غازات العادم في كل حالة من حالات العمل. كما تم حساب متوسط القيمة عند التشغيل الطبيعي بجمع القراءات التي تم أخذها ضمن مجال العمل الطبيعي وقسمتها على عددها.

جدول٢: حساب نسبة الانحراف لكل مؤشر من غازات العادم في كل حالة من حالات العمل.

البارامتر	متوسط القيمة عند التشغيل الطبيعي	نسبة الانحراف في حالة انخفاض الضغط في مجاري السحب	نسبة الانحراف في حالة انخفاض ضغط الاسطوانات	نسبة الانحراف في حالة انخفاض كمية الوقود
O2(%)	11.57	11 %	14.29 %	١٧,٣ %
Co2(%)	2.05	18 %	19.6 %	١٩,٩ %
Co(%)	0.02	4.7 %	20 %	٢٠,٩ %
Hc(ppm)	16.92	17.46 %	15.4 %	١٩,٤٢ %
NOx(ppm)	585	16.4 %	16.4 %	2.5 %

يمثل الجدول متوسط قيم مكونات غازات العادم لمحرك Ford ZSD-424 في حالة التشغيل الطبيعي، إضافةً إلى نسب انحرافها في ثلاث حالات عطل رئيسية. تُظهر النتائج أن ارتفاع نسبة O_2 وتراجع CO_2 و COيشيران إلى ضعف عملية الاحتراق الناتج عن انخفاض ضغط السحب أو الأسطوانة أو نقص الوقود. كما أن زيادة HC تعكس احتراقاً غير مكتمل، بينما انخفاض NOx في حالة نقص الوقود يدل على انخفاض درجة حرارة الاحتراق، توضح هذه الانحرافات العلاقة المباشرة بين كفاءة الاحتراق وتغير ظروف التشغيل داخل المحرك.

2-5 تحليل مؤشرات الدخان:

تشير مؤشرات الضبابية والدخان إلى مدى كفاءة احتراق الخليط داخل الأسطوانة، إن ارتفاع قيم الضبابية (Opacity) أو معامل الامتصاص (K) أو FSN (filter smoke number) يدل على احتراق غير مكتمل أو كمية وقود زائدة، يبين الجدول (٣) تغير مؤشرات الضبابية والدخان مع الحالات الأربعة المدروسة.

جدول 3: قياس مؤشرات الضبابية والدخان عند كل حالة عمل من الحالات المدروسة.

البارامتر	مجال العمل في حالة العمل الطبيعي	القيمة المقاسة في حالة انخفاض الضغط في مجاري السحب	القيمة المقاسة في حالة انخفاض ضغط الاسطوانات	القيمة المقاسة في حالة انخفاض كمية الوقود
Opacity(%)	6.5 – 23.3	١٥	١٧	١٤
K (1/m)	0.09 - 0.83	0.5٨	0.5٥	0.49
FSN	0-1.5	1	0.99	0.91

ويوضح الجدول (٤)، حساب نسبة الانحراف لمؤشرات الضبابية والدخان ومعامل الامتصاص في كل حالة من حالات العمل.

جدول ٤: حساب نسبة الانحراف لمؤشرات الضبابية والدخان عند كل حالة عمل من الحالات المدروسة.

البارامتر	متوسط القيمة عند التشغيل الطبيعي	نسبة الانحراف في حالة انخفاض الضغط في مجاري السحب	نسبة الانحراف في حالة انخفاض ضغط الاسطوانات	نسبة الانحراف في حالة انخفاض كمية الوقود
Opacity(%)	١٣,٨	8 %	١٨,٨ %	1.4 %
K (1/m)	٠,٤٧	18.9 %	14.5 %	٤ %
FSN	0.83	17 %	16.16 %	8.7 %

يبيّن الجدول متوسط قيم مؤشرات الضبابية والدخان أثناء التشغيل الطبيعي للمحرك ونسب انحرافها عند ثلاث حالات عطل. تُظهر النتائج أن ارتفاع Opacity وK وFSN في حالتي انخفاض ضغط السحب وضغط الأسطوانات يدل على نقص كمية الهواء وضعف الاحتراق. أما في حالة انخفاض كمية الوقود فتتراجع هذه المؤشرات بوضوح نتيجة نقص الوقود المحترق وانخفاض الدخان الناتج. تعكس هذه التغيرات الحساسية العالية لمؤشرات الدخان تجاه توازن نسبة الوقود إلى الهواء وكفاءة الاحتراق داخل المحرك.

٦- النتائج والمناقشة

تبين الجداول التالية تحليل مفصل لكل حالة عمل من الحالات المدروسة بناءً على مؤشرات غازات العادم مع التشخيص والعلاج المناسب لها.

1-حالة العمل الطبيعي:

جدول ٥: تشخيص وعلاج غازات العادم في حالة العمل الطبيعي

البارامتر	حالة العمل الطبيعي			
	مجال القياس	الحالة	التشخيص	الحل
Co (%)	0.01-0.05	منخفض	حالة عمل طبيعية	لا يوجد عطل، نظام الحقن مضبوط ضغط جيد، احتراق مكتمل
Co2 (%)	1.4-2.7	مرتفع نسبياً	قيمته العالية دليل احتراق كامل	
O2(%)	9.69-14.52	مرتفع	تشغيل سليم	
Hc(ppm)	10-24	منخفض	احتراق أكثر كفاءة	
NOx(ppm)	300-900	طبيعي	طبيعي	

٢-حالة العمل عند انخفاض الضغط في مجاري السحب: [7]

جدول ٦: تشخيص وعلاج غازات العادم في حالة العمل عند انخفاض الضغط في مجاري السحب

البارامتر	انخفاض الضغط في مجاري السحب			
	القيمة المقاسة	الحالة	التشخيص	الحل
Co (%)	٠,٠٢١	مرتفع قليلاً	احتراق غير كامل	تنظيف أو تغيير حساس ضغط الهواء فحص الانابيب والفلاتر اختبار شاحن التوربو تبديل زيت المحرك
Co2 (%)	٢,٥	طبيعي	احتراق غير كامل بسبب نقص الهواء	فحص الشاحن التوربيني فحص التسرب في نظام العادم فحص التسرب في مجرى الهواء
O2(%)	١٣	مرتفع قليلاً	احتراق غير كامل زيادة نسبة الاوكسجين غير المحترق نتيجة لان كمية الهواء أكبر من الوقود المحترق فعلياً أو نتيجة ضعف الاحتراق	فحص التوربين أو توقيت الحقن فحص وجود انسداد في البخاخات
Hc(ppm)	٢٠,٥	منخفض	احتراق غير كامل توقيت اشعال غير سليم	فحص نظام الوقود أو توقيت الحقن وفحص الكرتيير
Nox(ppm)	700	منخفض نسبياً	احتراق غير كامل، حيث أن فعالية أنظمة التحكم في الانبعاثات يعتمد على درجة حرارة الاحتراق	فحص الشاحن التوربيني أو الحقن

٣-حالة العمل عند انخفاض الضغط في الاسطوانات: [7] [8]

جدول ٧: تشخيص وعلاج غازات العادم في حالة العمل عند انخفاض الضغط في الاسطوانات

البارامتر	انخفاض الضغط في الاسطوانات			
	القيمة المقاسة	الحالة	التشخيص	الحل
Co (%)	0.٠٢٥	مرتفع قليلاً	احتراق جزئي في العادم	اختبار ضغط الاسطوانات فحص الصمامات وحلقات المكبس تغيير(head gasket)
Co2 (%)	٢,٥٥	مرتفع قليلاً	احتراق غير كامل ناتج عن قلة إنتاج co2 بسبب انخفاض الضغط	فحص التآكل في حلقات المكبس فحص التسريب في صمامات الأسطوانة فحص عدم وجود كسر في بواجي الرأس
O2(%)	13.٥	مرتفع	احتراق غير كامل، ضغط منخفض وخليط ضعيف	فحص حاقن الوقود (كمية وقود قليلة) التأكد من عدم وجود تسرب في التخلخل
Hc(ppm)	20	منخفض	احتراق جزئي ضعف الشرارة في البينزين أو الحقن في الديزل	فحص نظام الإشعال فحص الصمام وحلقات المكبس فحص نظام التحكم في الملوثات
NOx(ppm)	700	منخفض	احتراق ضعيف لأنه يتكون في درجات حرارة احتراق مرتفعة وهي منخفضة هنا	فحص الصمام وحساس الضغط

٤- حالة العمل عند انخفاض كمية الوقود المحقون في الاسطوانات: [٨]

جدول ٨: تشخيص وعلاج غازات العادم في حالة العمل عند انخفاض كمية الوقود المحقون في الاسطوانات

البارامتر	انخفاض كمية الوقود المحقون في الاسطوانات			
	القيمة المقاسة	الحالة	التشخيص	الحل
Co (%)	0.0253	منخفض	احتراق نظيف	فحص ضغط مضخة الوقود فحص البخاخات وتنظيفها (MAP)فحص حساس الضغط
Co2 (%)	2.56	طبيعي	خلل في عملية الاحتراق	فحص نظام التحكم الالكتروني في الحقن
O2(%)	14	مرتفع	احتراق غير كامل نسبة هواء مرتفعة أو كمية وقود قليلة	فحص الحساسات الالكترونية فحص مضخة حقن الوقود فحص البخاخات
Hc(ppm)	21	منخفض	احتراق غير كامل	فحص مضخة الوقود
NOx(ppm)	600	منخفض	احتراق ضعيف	فحص مضخة الوقود

كما تبين الجداول التالية تحليل وتفسير تغيرات الضبابية والدخان مع تشخيص الأعطال واقتراح الحلول في كل حالة.

١-حالة العمل الطبيعي:

جدول ٩: تشخيص وعلاج مؤشرات الضبابية والدخان في حالة العمل الطبيعي

البارامتر	حالة العمل الطبيعي			
	مجال القياس	الحالة	التشخيص	الحل
Opacity(%)	6.5-23.3	منخفض	احتراق كامل سليم	ضغط سحب طبيعي لا يوجد عطل أقل قيم في كل المؤشرات
K (1/m)	0.09-0.83	منخفض		
FSN	0-1.5	قليلة شبه معدوم		

2- حالة العمل عند انخفاض الضغط في مجاري السحب: [٩]

جدول ١٠: تشخيص وعلاج مؤشرات الضبابية والدخان في حالة العمل عند انخفاض الضغط في مجاري السحب

البارامتر	انخفاض الضغط في مجاري السحب			
	القيمة المقاسة	الحالة	التشخيص	الحل
Opacity(%)	15	مرتفعة قليلاً	احتراق ناقص	فحص نظام الحقن والهواء وإعادة المعايرة صيانة الشاحن التوربيني التأكد من عدم وجود تسريب في أنابيب السحب
K (1/m)	0.58	مرتفع		فحص نظامEGR
FSN	1	مرتفع		فحص وتنظيف فلتر الهواء و فحص نظامEGR

٣- حالة العمل عند انخفاض الضغط في الاسطوانات: [٩]

جدول ١١: تشخيص وعلاج مؤشرات الضبابية والدخان في حالة العمل عند انخفاض الضغط في الاسطوانات

البارامتر	انخفاض الضغط في الاسطوانات			
	القيمة المقاسة	الحالة	التشخيص	الحل
Opacity(%)	١٧	مرتفعة	احتراق غير كامل	فحص حساس الضغط فحص حلقات المكبس فحص التسرب في الصمامات
K (1/m)	0.5٥	مرتفع نسبياً		فحص حساسات نظام الحقن الالكتروني
FSN	٠,٩٩	مرتفعة نسبياً		فحص حساسات نظام الحقن الالكتروني فحص الشنابر وصيانة نظام التشحيم فحص رأس الأسطوانة وإصلاح التشققات

4-حالة العمل عند تخفيض كمية الوقود المحقون في الاسطوانات: [٩]

جدول ١٢: تشخيص وعلاج مؤشرات الضبابية والدخان في حالة العمل عند انخفاض كمية الوقود المحقون في الاسطوانات

البارامتر	انخفاض كمية الوقود المحقون في الاسطوانات			
	القيمة المقاسة	الحالة	التشخيص	الحل
Opacity(%)	١٤	منخفضة	احتراق غير كامل	فحص حساسات(ECU)
K (1/m)	٠,٤٩	متوسطة		فحص وتنظيف البخاخات فحص مضخة الحقن واستبدالها عند الحاجة فحص وحدة التحكم الإلكتروني(ECU)
FSN	0.91	متوسطة		فحص حساسات(ECU)

٧- الاستنتاجات

١. أظهرت النتائج أنَ الأجهزة والحساسات المستخدمة ذات دقة عالية في القياس.

٢. تعتبر الانحرافات عن النتائج الطبيعية لقيم ونسب غازات العادم والضبابية مؤشراً على اقتراب حدوث أعطال في منظومة الاحتراق في المحرك.

٣. أظهرت الدراسة أن دمج قياسات من حساسات وأجهزة قياس متعددة يوفر أداة فعالة لتشخيص أعطال محرك الديزل بدقة عالية، بحيث أن كل حالة تشغيل لها أثر مختلف واضح على مؤشرات الغازات، الدخان والضبابية مما يتيح إمكانية بناء نظام للتنبؤ بالأعطال ومعالجتها مبكراً.

٨-التوصيات

- استخدام أنظمة مراقبة متعددة الحساسات(حساس درجة حرارة سائل التبريد، حساس الاهتزاز...) من أجل تشخيص أكثر دقة لأعطال محركات الديزل الصناعية.

- استخدام النتائج في تصميم نظام صيانة تنبؤية فعال باستخدام الشبكات العصبونية.

٩-قائمة المراجع

1- Kong, S., Reitz, R. D., & Senecal, P. K. *"Modeling engine spray and combustion processes"*, Springer International Publishing, (2021).

2- Robert Bosch GmbH. "*Bosch Automotive Handbook* (10th ed.)".Stuttgart, Germany & Warrendale, PA, USA: SAE International (2021).

3- Fang, X., Zhang, C., Liu, Y., & Liu, Z."*Experimental investigation on effects of fuel injection and intake parameters on combustion and performance of a turbocharged diesel engine at different altitudes"*. Frontiers in Energy Research, Article 1090948 (2022).

4- Sharma, A. K., & Gupta, N. *"Diesel engine fault diagnosis based on exhaust gas analysis*. Energy Conversion and Management", 198, 112392. (2019).

5- Zhang, M., Lee, J., & Bae, S. "*Diagnostic and prognostic methods for diesel engine faults using sensor data*". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(12), 10721–10729. (2020).

6-Wang, Y., Chen, H., Liu, J., & Zhao, H. *"Fault diagnosis of diesel engines based on exhaust emission characteristics using machine learning techniques*". Applied Energy, 336, 120822. (2023).

7- Franzetti, J., Selleri, T., Fonseca González, N., Melas, A., Gioria, R., & Suarez-Bertoa, R. *"Measuring NOx during periodic technical inspection of diesel vehicles"*. *Environmental Sciences Europe*, **36**, Article 175. (2024).

8- Chen, X., Jiang, Y., & Zhao, Z. "*Prediction of combustion and exhaust emissions of a CI engine fueled with diesel-biodiesel blends with different EGR rates". Frontiers in Energy Research, **11**, Article 1205840. (2023).*

9- Yang, H.-H., Kumar, A., Dhital, N. B., Wang, L.-C., Wu, C.-H., Kamyab, H., & Yusuf, M. *"Evaluating the feasibility of estimating particulate mass emissions of older-model diesel vehicle using smoke opacity measurements*". *Scientific Reports*, **14**, Article 31494. (2024).