



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Biyodizel yakıt kullanan içten yanmalı motorlarda aşınma-sürtünme optimizasyonu ve tahmini için Taguchi ve yapay sinir ağı uygulaması

An artificial neural network and Taguchi approach to the optimization of wear and friction for biodiesel fuel

Yazar(lar) (Author(s)): Hüseyin Kahraman^{1*}, İdris Cesur², Beytullah Eren³, Aslan Çoban⁴

ORCID¹: 0000-0003-3322-9904

ORCID²: 0000-0001-7487-5676

ORCID³: 0000-0001-6747-7004

ORCID⁴: 0000-0001-5896-2964

To cite to this article: Kahraman H., Cesur İ., Eren B. ve Çoban A., “Biyodizel yakıtının tribolojik özelliklerinin yapay sinir ağı ve taguchi yaklaşımı ile optimizasyonu”, *Journal of Polytechnic*, 26(4): 1543-1553, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Kahraman H., Cesur İ., Eren B. ve Çoban A., “Biyodizel yakıtının tribolojik özelliklerinin yapay sinir ağı ve taguchi yaklaşımı ile optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 26(4): 1543-1553, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1216411

Biyodizel Yakıt Kullanan İçten Yanmalı Motorlarda Aşınma-Sürtünme Optimizasyonu ve Tahmini için Taguchi ve Yapay Sinir Ağı Uygulaması

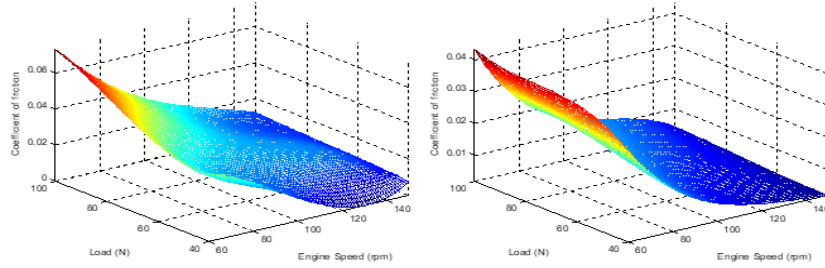
An Artificial Neural Network and Taguchi Approach to the Optimization of Wear and Friction for Biodiesel Fuel

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Motorlardaki silindir-segman çifti arasındaki aşınmanın ölçülmesi/ Measurement of wear between the cylinder and piston rings in engines
- ❖ Taguchi yöntemi ile az sayıda deney ile çok fazla faktörün etkileşimi/ Interaction of too many factors with few experiments with Taguchi method
- ❖ YSA modeli ile sınırlı sayıdaki veri kullanılarak sonuçların tahmin edilmesi/ Using the ANN model to estimate the outcomes with a small number of data

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Alternatif yakıtların sürtünme ve aşınma üzerindeki etkileri incelenmiştir. / The impact of alternative fuels on wear and friction were investigated.



Şekil. Aşınma miktarı / Figure. Amount of wear

Amaç (Aim)

Biyodizel yakıtlı bir motorun aşınma özelliklerinin incelenmesi. / Investigation of wear characteristics of a biodiesel fueled engine.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Dizel ve biyodizel yakıtların sürtünme ve aşınma üzerindeki etkileri incelenmiştir. / The effects of diesel and biodiesel fuels on friction and wear were investigated.

Özgünlük (Originality)

Tribolojik özellikler Taguchi metodu ile belirlenmiş ve YSA modeli tahmin edilmiştir./The tribological properties were determined by the Taguchi method and the ANN model was estimated.

Bulgular (Findings)

Dizel yakıtla karşılaştırıldığında, biyodizel yakıtta daha az sürtünme ve aşınma değerleri elde edilmiştir. / When compared to diesel fuel, the usage of biodiesel produced less friction and wear.

Sonuç (Conclusion)

Biyodizel yakıtı, daha düşük sürtünme katsayısına ve aşınmaya sahiptir. YSA modeli, güçlü tahmin potansiyeline sahiptir. / Biodiesel fuel has a lower friction coefficient and abrasion. ANN model has strong prediction potential.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Biyodizel Yakıt Kullanan İçten Yanmalı Motorlarda Aşınma-Sürtünme Optimizasyonu ve Tahmini için Taguchi ve Yapay Sinir Ağı Uygulaması

Araştırma Makalesi / Research Article

Hüseyin KAHRAMAN^{1*}, İdris CESUR¹, Beytullah EREN², Aslan ÇOBAN¹

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya, Türkiye

²Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya, Türkiye

(Geliş/Received : 08.12.2022 ; Kabul/Accepted : 10.01.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 30.01.2023)

ÖZ

Dünyada ham petrolün azalması nedeniyle alternatif yakıt araştırmaları her geçen gün artmaktadır. Dizel motorlarda petrole alternatif yakıt kullanılmasının diğer bir amacında çevreye daha az kirletici emisyon salmasıdır. Alternatif yakıtlarda dışarıya temiz emisyon salmasına karşın aynı zamanda motor veriminin de yüksek olması istenmektedir. Dizel motorlarında dizel yakıtına alternatif en iyi yakıt biyodizellerdir. Ayrıca motorlarda verim kaybının azaltılması segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınma miktarını azaltılması ile olmaktadır. Bu çalışmada; dizel motorlarda alternatif yakıt olarak yaygın kullanılan biyodizel yakıtının segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınma davranışları dizel yakıtına göre karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. Çalışmanın birinci aşamasında Taguchi yöntemi kullanılarak sürtünme ve aşınma karakteristiklerinin optimum şartları veren deney parametreleri belirlenmiştir. İkinci aşamada, deneysel çalışma yapılarak dizel ve biyodizel yakıtının tribolojik özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise segman-silindir çifti arasında oluşan aşınma mekanizması yapay sinir ağları (YSA) ile modellenmiştir. Yapılan çalışma ile; biyodizelin dizel yakıtına göre sürtünme katsayısının daha düşük olması ve bu nedenle aşınma miktarının daha düşük olduğu saptanmıştır. Aşınma miktarları karşılaştırıldığında optimum şartlar; biyodizel yakıtı, 150d/d ve 40 N yük altında elde edilmiştir. Deney sonuçları YSA model ile tahmin edilmiştir. Bu sayede deney sayıları azaltılarak segman-silindir çifti arasındaki tribolojik özellikler incelenebilecektir.

Anahtar Kelimeler: İçten yanmalı motorlar, biyodizel, aşınma, Taguchi yöntemi, yapay sinir ağları.

An Artificial Neural Network and Taguchi Approach to the Optimization of Wear and Friction for Biodiesel Fuel

ABSTRACT

Alternative fuel researches are increasing day by day due to the decrease in crude oil in the world. Another purpose of using alternative fuel to petroleum in diesel engines is to release fewer polluting emissions to the environment. Although it releases clean emissions in alternative fuels, it is also desirable to have high engine efficiency. Biodiesel is the best alternative to diesel fuel in diesel engines. In addition, the reduction of efficiency loss in engines is achieved by reducing the amount of friction and wear between the ring-cylinder couple. In this study; The friction and wear behavior of biodiesel fuel, which is widely used as an alternative fuel in diesel engines, between the ring-cylinder couple was compared with diesel fuel. The study consists of three stages; In the first stage of the study, the experimental parameters that give the optimum conditions of friction and wear characteristics were determined by using the Taguchi method. In the second stage, the tribological properties of diesel and biodiesel fuel were investigated by conducting an experimental study. In the last stage of the study, the wear mechanism between the ring-cylinder pair was modeled with artificial neural networks (ANN). With the work done; It has been determined that the friction coefficient of biodiesel is lower than diesel fuel and therefore the amount of wear is lower. Optimum conditions when the amount of wear is compared; biodiesel fuel was obtained under 150 rpm and 40 N load. Experimental results were predicted by the developed ANN model. In this way, the tribological properties between the ring-cylinder pair can be examined by reducing the number of experiments.

Keywords: Internal combustion engines, biodiesel, wear on engines, Taguchi method, artificial neural networks.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Araştırmacılar uzun yıllardır, içten yanmalı motorların verimini iyileştirmek için çalışmaktadırlar [1]. İçten yanmalı motorlarda meydana gelen enerji kayıplarının en

önemli kısmı, birbirine göre rölatif hareket yapan parçalar arasında meydana gelen mekanik kayıplardır [2]. İndike gücün önemli bir kısmı sürtünmeyi yenmek için kullanılmaktadır. Bu nedenle, mekanik sürtünmeler motorun verimliliği ve yakıt ekonomisi açısından önemlidir. Dizel motorlarında, mekanik olarak çalışan yakıt pompaları da önemli derecede mekanik kayıpların

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : huseyink@subu.edu.tr

olması nedeni ile sürtünme kayıpları daha da yüksek değerlere ulaşmaktadır. Mekanik kayıplar, kayıp enerjinin yaklaşık %17'sini oluşturur. Motorlarda mekanik kayba neden olan mekanizmalar, piston-krank mekanizması, segman-silindir gömleği, dizel motorlarında yakıt pompası ve diğer yardımcı düzenekler olarak sıralanabilir. Mekanik kayıplardan silindir gömleği ile segmanlar arasındaki sürtünme kaybı motorlarda oldukça etkilidir ve tüm kayıpların yaklaşık %30'unu oluşturur [2-11].

İçten yanmalı motorlarda dinamik çalışma koşulları nedeni ile pistonun silindir içerisinde konumuna bağlı olarak yağlama rejiminde değişimler meydana gelebilmektedir. Pistonun yön değiştirdiği ölü noktalarda piston hızının sıfır olması nedeni ile sürtünme katsayısı artmakta, hidrodinamik yağlama rejiminden karışık yağlama ya da sınır yağlama rejimine geçiş yapılmaktadır. Minimum yağ kalınlığının yanma boyunca üst ölü nokta (ÜÖN)'da olduğu bilinmektedir. Segman üzerine etki eden gaz basıncının ile yağ film tabakası kalınlığı ters orantılıdır. Genişleme zamanında hidrodinamik yağlama olarak adlandırılan olay gerçekleşir ki bu olay; piston hızının artması ile yağ filmi kalınlığı da artmaktadır. Yüksek devir çalışma şartlarında, gaz basıncının artmasına bağlı olarak segmana gelen yükler de artmaktadır. Artan yük nedeniyle yağ filminde incelemeler meydana gelebilmektedir. Ayrıca motor yağının viskozitesi ise motor sıcaklığının artması ile azalmaktadır. Taşıt motorlarında, soğuk ilk hareket zamanı, ani yük ve hız değişimleri motorlarda yağlama rejiminin değişmesine neden olan diğer faktörlerdir [6-8].

İçten yanmalı motorlarda sürtünme katsayısının artması aynı zamanda parça yüzeylerinden aşınan malzeme kaybını da artırmaktadır. Dolayısıyla motorda kullanılan yağlama yağının özellikleri kadar kullanılan yakıtın da, yanma esnasında yağın absorbe olması söz konusu olabileceğinden, yakıtın yağlayıcılık özelliğinin iyi olması aşınma ve sürtünme kayıplarının azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Bunun birlikte, kullanılan yakıtın yağlayıcı özelliğinin iyileşmesi, dizel motorlarında yakıt pompasından kaynaklanan mekanik sürtünme kayıplarında azalmalara neden olacağı açıktır [1-2].

İçten yanmalı motorlarda meydana gelen mekanik kayıplar üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Araştırmaların çoğunda pin-on disk deney düzenekleri kullanılmıştır. Bu sistemler ile dönen motor parçaları arasındaki sürtünme ve aşınma karakteristiklerindeki değişimler, doğru şekilde tespit edilebilmektedir. Ancak motorlarda iş, pistonunun silindir içerisinde doğrusal hareket yapmasıyla elde edilmektedir. Dolayısıyla segman-silindir arasında oluşan sürtünme ve aşınma karakteristiklerinin belirlenmesinde, gerçek çalışma şartlarını yansıtan deney düzenekleri kullanılması gerekmektedir [1-11].

Literatür incelendiğinde, biyodizel, dizel motorlar için alternatif yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmalarda biyodizel yakıtı, dizel yakıtına eklenerek kullanılmıştır [14-21]. Handan ve ark. [22], bir aşınma cihazında SAE10W40 ve SAE5W40 motor yağlarına %10 ile %90 farklı hacimsel oranlarında biyodizel (Palm Metil Ester) karıştırılmasının sürtünme ve aşınma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yağın içerisindeki biyodizel miktarı arttıkça sürtünme katsayısı ve aşınma miktarının arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, yağlama rejimi, yük miktarı arttıkça hidrodinamik yağlama rejiminden karışık yağlama rejime geçiş yaptığını ve buna bağlı olarak malzemede aşınmaya neden olduğunu deneysel olarak belirlemişlerdir. Chaudhari ve Sutaria [23], doğrusal hareket eden bir aşınma cihazında, yağlayıcı olarak SAE40 ve SAE10W30 yağlayıcılarının farklı devir ve viskozitelerinde aşınma ve sürtünme üzerine etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışma, 60N yük ve 300 rpm ile 1500 rpm arasında farklı devirlerde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, devir arttıkça sürtünme katsayısının düştüğü gözlemlenmiştir. En düşük sürtünme katsayısını SAE10W30 yağlayıcısı ve 1500 rpm'de elde edilmiştir [23]. Hisham ve ark. [11], dört farklı yağlayıcının farklı koşullar altında deneysel olarak sürtünme ve aşınma üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalarında yağlayıcı olarak, SAE40, atık yemeklik yağ, 5% atık yemeklik yağ + 95% SAE40 ve 10% atık yemeklik yağ + 90% SAE40 kullanılmışlardır. Deneyler, 200, 250 ve 300 rpm devir aralıkları ve 2, 5.5 ve 9 kg yük altında gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda, sürtünme katsayısı ve aşınma üzerinde devir, yük ve yağlayıcının etkisi olduğunu saptamışlardır. En iyi sonuç SAE40 yağlayıcısında elde etmişlerdir. SAE40 yağlayıcısına katılan atık yemek yağı oranı arttıkça sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı artmaktadır. Sung ve ark. [25], Segmanın silindir üzerinde doğrusal hareketi esnasında yağlama rejimlerinde meydana gelen geçişler sonucu sürtünme katsayısındaki değişimleri deneysel olarak incelemişlerdir. Sınır yağlamanın gözlemlendiği ölü nokta konumlarında maksimum sürtünme katsayısının oluştuğunu, piston hızının en yüksek değere ulaştığı orta strok boyunca ise minimum sürtünme katsayısının olduğunu tespit etmişlerdir. 5W30 yağlama yağı kullanarak gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda, sürtünme katsayısının ölü noktalarda 0.14, orta strok boyunca 0.03 olduğunu tespit etmişlerdir.

Wu ve ark. [26], emme manifolduna soğuk EGR uygulanan LPG (Sıvı Petrol Gazı) ile dizel/biyodizel karışımları kullanan bir dizel motorunun yanma özelliklerini araştırmak ve optimum faktörleri belirlemek için Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Deneyler farklı yüklerle 1500 rpm'de gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, Taguchi yöntemi ile yapılan tahminlerin deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğunu göstermiş ve bu yöntemin bu çalışmada deneysel çalışma sayısını azaltmada etkili olduğunu göstermiştir. Çalışmada, özgül yakıt sarfiyatı ve NOx emisyonları açısından optimum sonuçları B10 (A1), %40 LPG (B3) ve %20 EGR kombinasyonu ile elde edilmiştir. Ganapathy ve ark. [27], Jatropa biyodizel ile çalışan bir motorun termodinamik

model analizinde optimum çalışma parametrelerini ve motor tasarımını belirlemek için Taguchi'nin optimizasyon yaklaşımını kullanmışlardır. Jatropa biyodizel ile çalışan motorun performansını belirlemek için ısı yayılımı için çift Wiebe katsayısı dayalı bir termodinamik model kullanılmıştır. Önemli motor tasarım ve çalışma parametrelerinden birbirleri ile etkileşim halinde olduğu düşünülen on kritik parametre seçilmiştir. Lineer grafik teorisi ve Taguchi yöntemi kullanılarak motorun test sırasını belirlemek için bir L16 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Motorun performansını en üst düzeye çıkarmak için, daha yüksek daha iyi kalite özelliklerine dayalı olarak sinyal-gürültü oranı (SNR) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda sıkıştırma oranının etkili parametre olduğu belirlenmiştir. Sıkıştırma oranından sonra en iyi parametreler sırasıyla difüzyon yanmadaki ısı yayılımı miktarı, difüzyon yanma süresidir [27]. Tan ve ark. [28], Taguchi yöntemini kullanarak transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretim süreci üzerinde bir optimizasyon çalışması yürütmüşler. Biyodizel üretim prosesinde etkili parametreler molar oran, katalizör konsantrasyonu, reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresidir. Araştırmacılara göre Taguchi yöntemi, biyodizel üretimi üzerinde en etkili parametrenin reaksiyon sıcaklığı olduğunu göstermiştir.

Literatürde Babu ve ark. [29], biyodizel ve geleneksel dizel ile birlikte kullanılan direkt enjeksiyon destekli dizel motor özelliklerini (efektif verim, tork, efektif güç, silindir basıncı ve özgül yakıt tüketimi) tahmin etmek için bir YSA modeli uygulamışlardır. Bu çalışmaya göre, geliştirilen YSA modelinden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar kabul edilebilir hata sınırları içinde birbirine yakın sonuç vermiş ve motor özelliklerini gerçekçi bir şekilde tahmin etmiştir. Huang ve ark. [30], piston üretim süreçlerinin kalite iyileştirmesi için, üç deneysel model (Taguchi yöntemi, Taguchi ve yanıt yüzeyi metodolojisi ve Taguchi, genetik algoritma ve YSA) uygulamışlardır. Çalışma sonucunda Taguchi modeli diğer modellere nazaran daha iyi sonuç vermiştir. Bu çalışmada kullanılan tüm modellerin, hata oranını azaltmak ve verimliliği artırmak için piston üretim yöntemlerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deney sayısını azalttığı görülmüştür. Tosun ve ark. [31], doğal emişli bir dizel motorun performansını ve egzoz emisyonlarını tahmin etmek için yapay sinir ağları ve doğrusal regresyon kullanarak bir modelleme çalışması yürütmüştür. Yapılan bu çalışmada, istenen parametreleri (tork, karbon monoksit ve azot oksitleri) tahmin etmek için geliştirilen YSA modelinin, doğrusal regresyon modeline göre daha sonuç verdiği sonucuna ulaşılmıştır.

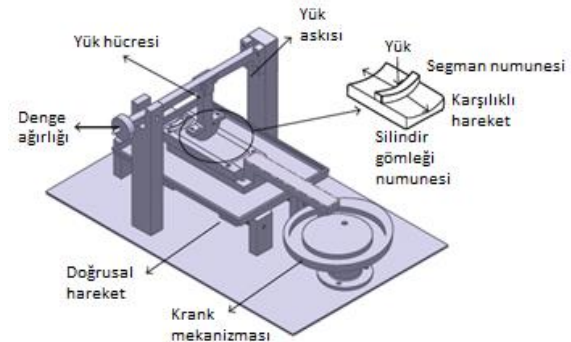
Yukarıda özetlenen literatür çalışmalarında genellikle motor performansı, egzoz emisyonları, tork değerleri, yakıt tüketimi vb. parametrelerin tahmin edilmesi için çeşitli modeller geliştirildiği ve dizel motorların geliştirme aşamasındaki deneylerin sayısının azaltılması için metotların uygulandığı görülmektedir. Ancak bir dizel motor için farklı yakıt türleri, hızları ve yükleri ile silindir gömleği ve piston segmanlarındaki aşınmayı tahmin etme ve optimize etmek için Taguchi ve YSA'nın

birlikte kullanımının literatürde yeterince araştırılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada, bir dizel motorunda farklı yakıt, hız ve yüklerde silindir-piston çifti arasındaki aşınma ve sürtünmenin Taguchi ve yapay sinir ağı yöntemi optimize edilmesi ile literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

İlk hareket ve ÜÖN civarlarında motorlarda sınır sürtünme şartları geçerli olduğu için, deneyler esnasında özellikle düşük devir aralıkları (60, 90, 120 ve 150 rpm) seçilmiştir. 1000 rpm'da çalışan bir motorda piston hızı 20 KMA' dan sonra hızla artmaktadır. Hızdaki bu yükselme, yağlama rejiminin sınır sürtünmeden hidrodinamik sürtünmeye geçmesine neden olmaktadır. Oysa deneylerde seçilen devir sayılarında anlık piston hızı değerleri, 1000 rpm meydana gelen anlık piston hız değerinden oldukça düşüktür. Bu durum, tercih edilen devirler hem ilk hareket esnasındaki aşınmalar hem de motorun ilk 20 KMA' ya kadarki düşük piston hızlarındaki sürtünmelerinin analiz edilmesinde gerçek çalışma koşullarına daha uygunluk sağlamaktadır.



Şekil 1. Piston segmanı pistonlu gömlek test makinesi, temas geometrisi ve test numunesi. (Testing equipment, contact geometry, and test sample for piston ring reciprocating liners.)

Sürtünme ve aşınma testleri doğruşal hareketli bir aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. ASTM G133-05 standartlarına uygun olarak aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma test cihazının şematik bir görünümü Şekil 1.'de verilmiştir.

Çizelge 1. Aşınma test koşulları (Tribotest conditions)

Test koşulları	Değer
Yük, N	40-60-80-100
Motor devri, rpm	60-90-120-150
Sıcaklık, °C	75
Strok, m	0.1
Yağlama oranı, ml/h	0.5
Yol, m	5000
Yağlayıcı	Dizel-Biyodizel

Aşınma deneylerinde kullanılan aşınma test düzeneği, içten yanmalı motorlardaki silindir-segman çifti arasındaki sürtünme olayını simüle eden bir tasarıma sahiptir. Test düzeneği, motor çalışma koşullarına göre segmanın silindir gömleğine kuvvet uygulama prensibine göre çalışmaktadır. Cihazda segman numunesi sabit gömlek numunesi ise hareketlidir. Segman numunesi bir taşıyıcı kola bağlanmıştır. Normal yükler ise bu kola ağırlıklar asılarak istenilen değeri elde edilecek şekilde ayarlanmaktadır. Deneylerin yapıldığı hız ve normal yükler Çizelge 1.'de verilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği sıcaklık, içten yanmalı bir motorun rejim sıcaklığı olan 75 ± 5 °C olarak seçilmiştir.

Sektörden temin edilen krom kaplamalı segmanlar, halka şeklinde kesilerek segman numuneleri elde edilmiştir. Silindir gömlek numunesi, dökme demirden imal edilmiştir. Deneylerde kullanılan segman ve silindir gömlek numunelerinin özellikleri Çizelge 2.'de verilmiştir.

Çizelge 2. Piston segmanı ve silindir gömleği özellikleri (Specifications for cylinder liners)

Numune	Malzeme	Yüzey işlemi	Sertlik (HV _{0.1})	Pürüzlülük (R _a , µm)
Segman	Dökme demir	Krom kaplama	920	0.121
Silindir	Dökme demir	Honlama	20.3	1.052

Aşınma testlerinde 5000 m mesafe kat edilmesi dikkate alınmıştır. Deneyler, 5000 m mesafeyi kapsayacak zaman süresince farklı yükler altında deneyler için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, silindir gömleği üzerindeki segman numunesinin genişliği her test için 0.010 m'ye ayarlanmıştır.

Aşınma miktarı üç yöntemle ölçülür. Bunlar: ağırlık farkı yöntemi, kalınlık farkı yöntemi ve iz değiştirme yöntemidir. Bu çalışmada, aşınma miktarının tespiti için ağırlık farkı yöntemi kullanılmıştır. Aşınma değerini belirlemek için 10-4 g ölçüm aralığı olan terazi (0,1 mg hassasiyet) kullanılmıştır. Gömlek ve segman numuneleri her deneyden önce etanol ile temizlenmiş, ardından hassas terazide ölçülmüş ve değerler kaydedilmiştir. Gömlek segman numuneleri her deneyden sonra yeniden metanol ile temizlenmiş, ardından tekrar hassas terazide ölçülmüştür. Aşınma deneyinden önceki ölçüm ile sonraki ölçüm değerleri arasındaki fark aşınma miktarı olarak kaydedilmiştir.

Deneylerde yağlayıcı olarak %100 Dizel ve %100 TYMS (tavuk yağı metil esteri) kullanılmıştır. Yağlayıcılar deney setine saatte 0,5 ml akış hızında damla damla verilmiştir. Deneylerde kullanılan yağlayıcıların özellikleri Çizelge 3.'te verilmiştir.

Çizelge 3. Deneylerde kullanılan yağlayıcıların özellikleri [25-27]. (Properties of the experiment's lubricant)

Özellikler	Birim	TYME	Euro Dizel	Standartlar
Kinematik viskozite	mm ² /s	3.5	3.25	ASTM D445
Viskozite indeksi	-	3.5-5	2-4.5	ISO 2909
Yoğunluk (15 °C)	kg/dm ³	0.860	0.84	ASTM D4052
Akma noktası	°C	-15	-10	ISO 3016
Parlama noktası	°C	120	55	ASTM D92

2.2. Deney Dizayını (Experiment Design)

Deney tasarımı Taguchi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Taguchi metodunun bir önemli özelliği, çok fazla deney yapılmadan yapılan deneylerin sinyal gürültü oranına (S/N) göre sonuçların belirlenmesidir. Çalışmada, iki farklı yağlayıcı için dört farklı hızda dört farklı yük altında optimum faktör seviyeleri belirlenmiştir. Deney tasarımında, sürtünme ve aşınma üzerinde etkili olan devir, yük ve yakıt türü etkili faktörler olarak seçilmiştir (Çizelge 4.).

Çizelge 4. Faktör tasarımı ve faktör seviyeleri (Factors design and factor levels)

Sembol	Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 3
A	Yakıt	Dizel	TYME	-	-
B	Devir, rpm	60	90	120	150
C	Yük, N	40	60	80	100

Tüm test adımları 10 kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınarak deneysel veriler elde edilmiştir. 360 derecede elde edilen sürtünme katsayısının ortalaması alınarak sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Aşınma testlerinde 10 kez ölçüm yapılmış ve ortalama aşınma miktarı belirlenmiştir.

Taguchi yönteminin temel prensibi, çeşitli bireysel ve birleşik tasarım etkilerinin minimum deney sayısı ile gözlemlenen parametreler üzerindeki etkisini belirlemektir. Taguchi yöntemi, mevcut varyasyonu ölçmek için genel bir Sinyal-Gürültü (S/N) oranını kullanır.

"En Küçük en iyi" (LB), " hedef değer en iyi" (NB) ve " En büyük en iyi" (HB) dâhil olmak üzere özelliklerin türüne bağlı olarak birkaç S/N oranı mevcuttur.

LB özellikleri için S/N oranı, verilen mevcut çalışma ile ilgilidir (Eş. 1 ve Eş. 2); burada n, aynı tasarım koşulları altında bir denemedeki tekrar sayısını, y_i ölçülen değeri ve alt simge i, ortogonal dizideki (OA) tasarım parametrelerinin sayısını temsil eder.

$$N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

Taguchi yönteminde, bir tasarım parametresi (faktör), (Eş. 3-7) ile verilen varyans analizi (ANOVA) istatistiksel yöntemiyle tahmin edilen deneysel hataya kıyasla etkisi büyükse, önemli olarak kabul edilebilir. Bu durumda, tasarım parametresi, tasarım problemine en uygun çözümün belirlenmesinde kritik bir faktördür.

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N (S/N)_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (3)$$

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{K_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (4)$$

$$v_{\text{toplam}} = N - 1 \quad (5)$$

$$V_{\text{faktör}} = \frac{SS_{\text{faktör}}}{v_{\text{faktör}}} \quad (6)$$

$$F_{\text{faktör}} = \frac{V_{\text{faktör}}}{V_{\text{hata}}} \quad (7)$$

Burada, SS_T , toplam varyasyona bağlı karelerin toplamıdır. N , toplam deney sayısıdır. SS_A , faktör A'ya bağlı karelerin toplamını temsil eder. K_A , faktör A için seviye sayısıdır. A_i , A faktörünün toplam i_{th} seviyesinin toplamını ifade eder. n_{A_i} , faktör A'nın i_{th} düzeyi için örnek sayısıdır. T , deneylerin toplam (S/N) oranının toplamıdır, v_{toplam} , serbestlik dereceleridir, $V_{\text{faktör}}$, faktörün varyansıdır, $SS_{\text{faktör}}$, faktörün karelerinin toplamını temsil eder ve $F_{\text{faktör}}$, faktörün F oranıdır.

Taguchi yöntemlerinde ANOVA'da verilen faktörlerin düzeyleri %90 ve %99 güven aralığına göre anlamlıdır. Deneylerin tasarımı bu güven sınırları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Taguchi yöntemlerine göre gerekli minimum deney düzeni Çizelge 5.'te verilmiştir.

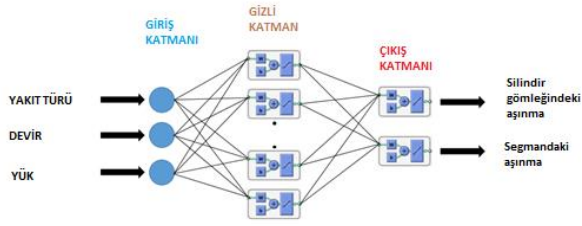
Çizelge 5. Deneysel Düzen (OA) (Experimental (OA) Layout)

Deney No	Faktörler		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	1	2
3	2	1	3
4	2	1	4
5	1	2	3
6	1	2	4
7	2	2	1
8	2	2	2
9	1	3	3
10	1	3	4
11	2	3	1
12	2	3	2
13	1	4	1
14	1	4	2
15	2	4	3
16	2	4	4

2.3. Yapay Sinir Ağı Modeli (Artificial Neural Network Model)

İnsan vücudunun sinir sistemi, yapay sinir ağlarının (YSA) ortaya çıkmasına ilham vermiştir ve bu sistemler, bir dizi karmaşık sorunu çözebilen önemli yapay zekâ sistemleridir [32]. YSA'lar, yapay zekâ tabanlı yöntemler arasında en dikkat çekici modelleme yöntemidir. YSA'lar, geleneksel matematiksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, ilgili olay için matematiksel tanım zorunluluğunun olmaması ve sınırlı sayıda deney kullanarak tahmin yapabilmesi gibi avantajlara sahiptir [33].

YSA'ları oluşturan katmanlar şu şekildedir; giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı. YSA'larda giriş katmanı bağımsız değişkenlerden oluşurken, çıkış katmanı bağımlı değişkenlerden oluşur. Bu iki katman arasında, bir yada daha fazla gizli katman bulunmakta ve her bir katmanda bir veya daha fazla işlem elemanı (nöron) içermektedir. YSA'lar karmaşık problemleri çözmek için işlem elemanları arasında bağlantılara sahiptir [34]. Çalışma kapsamında kullanılan YSA modelinin şematik yapısı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan YSA mimarisi (The ANNs' schematic structure)

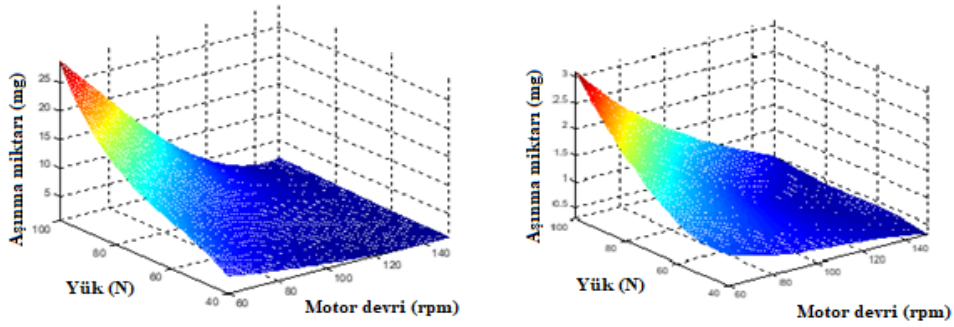
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, segman-silindir çifti arasında oluşan sürtünme ve aşınma mekanizmalarına etkileyen çalışma parametrelerinin optimum değerleri Taguchi tasarım yöntemi ile tespit edilmiştir. Tablo 5' de belirtilen ortogonal deney tasarımına göre sürtünme ve aşınma testleri gerçekleştirilmiş ve doğrulama deneyleri

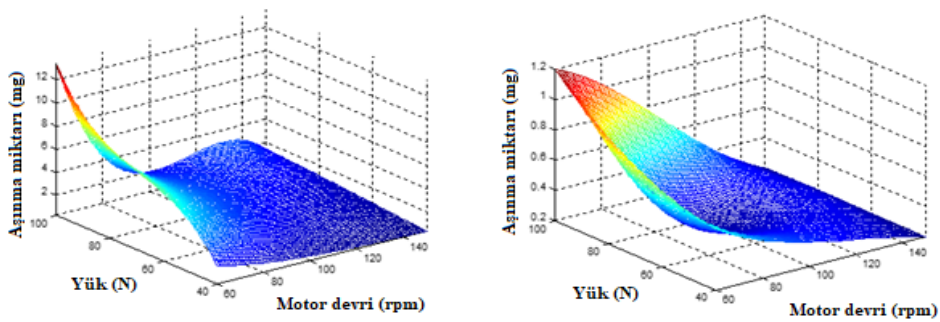
yapılmıştır. %90 ile % 99 güven aralığına göre yapılan deneyler sonucunda, sürtünme ve aşınma açısından optimum dizayn parametre seviyeleri tespit edilmiştir.

Şekil 3., yağlayıcı olarak dizel yakıt kullanılması durumunda, farklı hızlarda farklı yükler altında silindir gömleği ve segman numunesi arasındaki aşınma değerlerini göstermektedir. Motor devri arttıkça, segmana etki eden teğetsel kuvvette meydana gelen düşmenin sonucunda, aşınma miktarlarında azalmalar görülmektedir. Fakat artan yüklerle birlikte segman üzerine etki eden normal kuvvetin artmasına bağlı olarak, aşınma miktarlarında artmalar görülmektedir.

Şekil 4., yağlayıcı olarak biyodizel yakıt kullanılması durumunda silindir segman çiftlerindeki aşınma değerlerini göstermektedir. Sürtünme katsayısı ve aşınma miktarının biyodizel kullanılan testlerde daha düşük olduğu görülmüştür. Azalmanın sebebi, biyodizelin dizel yakıtına nispeten yüksek yoğunlukta olması ve yağlayıcılık özelliğinin daha iyi olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



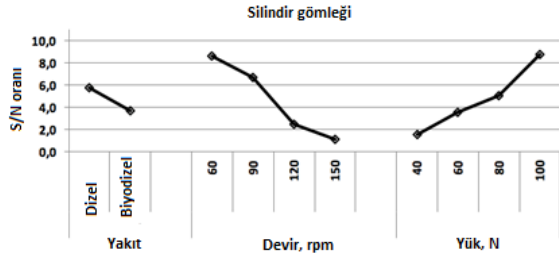
Şekil 3. Dizel yakıt için silindir gömleği ve segmanlardaki aşınma miktarı (Amount of cylinder and piston ring wear for diesel fuel)



Şekil 4. Biyodizel yakıtı için silindir gömleği ve segmanlardaki aşınma miktarı (Amount of wear on the piston rings-cylinder for biodiesel fuel)

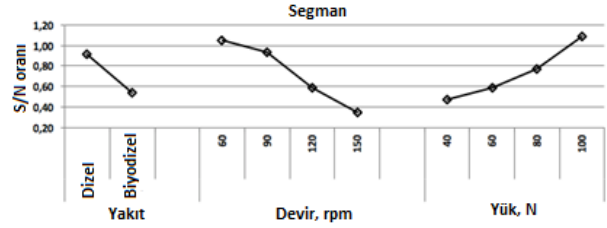
Şekil 5.'teki sinyal-gürültü oranlarında görüldüğü gibi, silindir gömleğindeki minimum aşınma değeri, biyodizel yakıtla, 150 rpm motor devrinde 40 N yük altında

(A2B4C1) belirlenmiştir. Segman numunesinde, gömlekteki aşınmaya benzer şekilde, biyodizel yakıtı ile 150 rpm motor devrinde 40 N yük (A2B4C1) altında optimum koşullar belirlenmiştir.



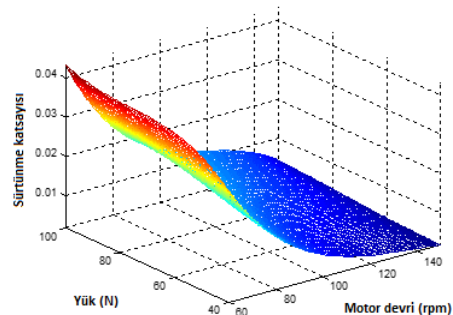
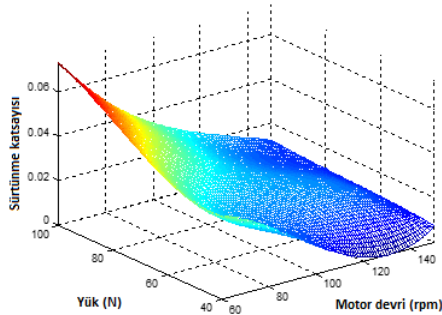
Şekil 5. Silindirdeki aşınma faktör seviyelerinin S/N değerleri (S/N values of factor levels for cylinder wear)

Şekil 6.'da yük miktarı ve motor devrine bağlı olarak segmanda meydana gelene aşınma miktarı üzerine etkilerini gösteren S/N değerleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde aşınma miktarı biyodizelin dizel yakıtına nispeten daha düşüktür. Motor devir arttıkça aşınma miktarının azalmasını nedeni, artan devir ile kayma hızı artmasından dolayı segman üzerine etkileyene teğetsel kuvvetin azalmasından kaynaklanmaktadır. Ancak yükün artmasıyla segman üzerindeki normal kuvvetin artması nedeniyle aşınma miktarı artmaktadır.



Şekil 6. Segmandaki aşınma faktör seviyelerinin S/N değerleri (S/N values of factor levels for piston rings wear)

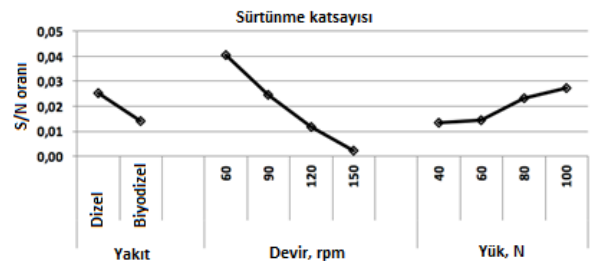
Şekil 7.'de farklı çalışma parametrelerine göre, motorlarda dizel ve biyodizel yakıtları kullanılması durumunda segman-silindir çifti arasındaki sürtünme katsayısı değişimleri görülmektedir. Şekil incelendiğinde, sürtünme katsayısı motor devrine bağlı olarak değişmektedir. Motor devri arttıkça sürtünme katsayısı azalmakta olup, motor devri azaldıkça sürtünme katsayısı artmaktadır. Maksimum sürtünme katsayısı 60 rpm, minimum sürtünme katsayısı ise 150 rpm motor devrinde elde edilmiştir. Ayrıca uygulana yük miktarı arttıkça sürtünme katsayısı artmaktadır. Yakıt olarak biyodizel kullanılması durumunda standart dizele göre daha düşük sürtünme katsayısı değerini vermektedir. Azalan sürtünme katsayısı, sürtünmeden kaynaklı düşen verim kaybının azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 7. Dizel ve biyodizel yakıtlarının segman-silindir arasındaki sürtünme katsayısının değişimi (Variation of coefficient of friction between piston rings and cylinder for diesel and biodiesel fuel)

Şekil 8.'de, segman-silindir çifti arasındaki sürtünme katsayısındaki değişimler görülmektedir. Silindir-segman çiftleri arasındaki sürtünme katsayısı açısından optimum koşullar biyodizel yakıtı, 150 rpm motor devri ve 40 N yük altında (A1B4C1) kullanıldığı durumda elde edilmiştir.

Bu çalışmada, silindir gömleği ve piston segmanlarındaki aşınmayı tahmin etmek için 4 farklı topoloji (LinR, MLPR, PNN, GFFR), en fazla iki gizli katman (0: gizli katman yok; 1 ve 2: gizli katman sayısı), bir öğrenme algoritması (L: Levenberg-Marquardt) ve öğrenme modu



Şekil 8. Sürtünme katsayısı için faktör seviyelerinin S/N değerleri (S/N values for friction coefficient factor levels)

(B: grup) ve (N: Yok) kombinasyonları kullanılarak toplam 5 YSA modeli geliştirilmiştir. YSA modelleri için deneysel veri seti, eğitim, doğrulama ve test veri setlerine

sırasıyla %65, %15 ve %20 olacak şekilde rastgele olarak ayrılmıştır. YSA modellerinde farklı yakıt türleri, motor devirleri ve yükleri girdi olarak kullanılmıştır. YSA modellerinden elde edilen tahmin sonuçları ile gerçek sonuçları karşılaştırmak için kullanılan performans istatistikleri ortalama karesel hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve determinasyon katsayısı (R^2) aşağıdaki gibidir [35]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2 \quad (8)$$

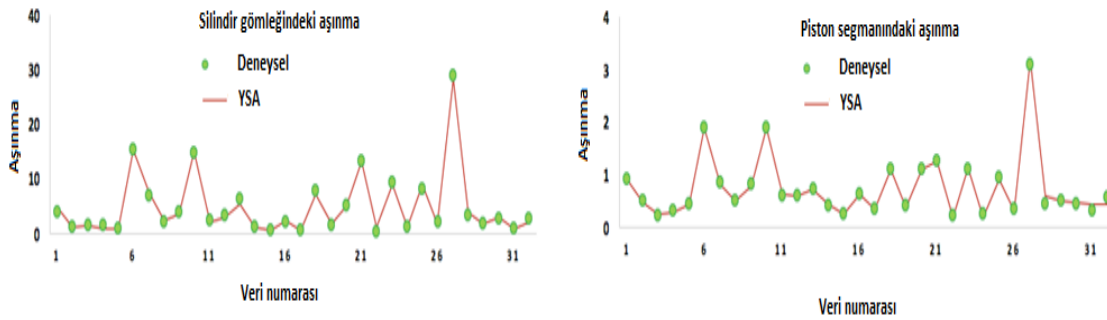
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}| \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

Eş. 8-9 ve 10'da:

\hat{Y} : y'nin tahmin edilen değeri

\bar{Y} : y'nin ortalama değeridir.



Şekil 9. Deneysel ve tahmin sonuçlarının karşılaştırılması (1-21, 22-26, 27-32 numaralı veriler sırasıyla eğitim, doğrulama ve test verilerini göstermektedir). (Comparison of experimental and prediction results (data 1-21, 22-26, and 27-32 show training, validation, and test dataset, respectively.))

Test veri setine dayalı R^2 değerleri açısından YSA modellerinin tahmin performansı, 0.82 ile 0.99 arasında değişmektedir. Tablo 6 da verilen 5 YSA modeli için eğitim, doğrulama ve test veri setlerinden elde edilen performans istatistikleri, MLPR-1-B-L modelinin diğer YSA modelleri arasında en iyi performansı gösterdiği görülmektedir. Eğitim, doğrulama ve test veri setleri için deneysel ve en iyi performans gösteren sınır ağından

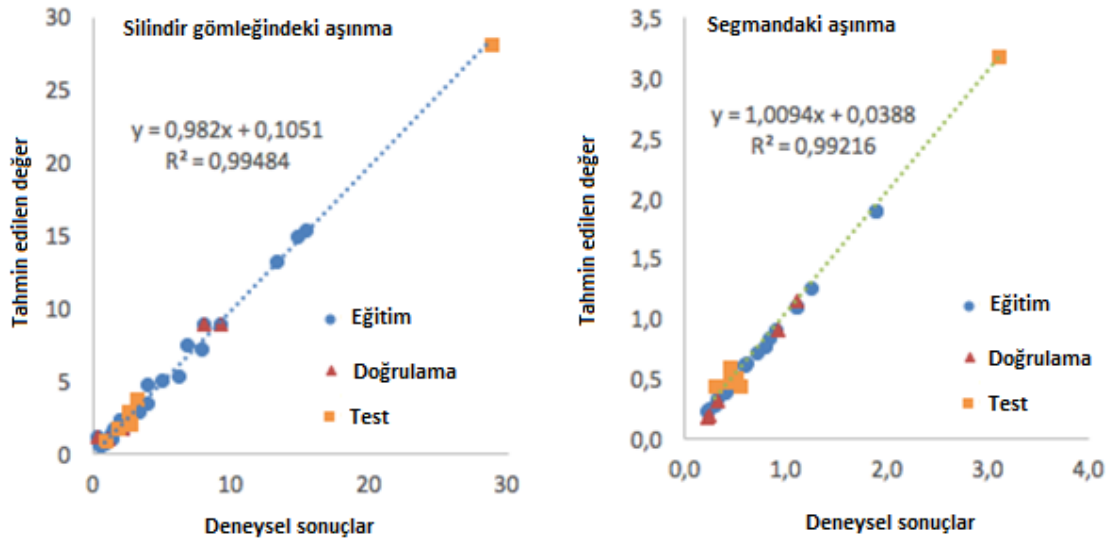
(MLPR-1-B-L) elde edilen model sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 10'da ise saçılım grafiği, geliştirilen YSA modeli (MLPR-1-BL) ile silindir gömleği ve piston segmanlarındaki aşınma çok iyi bir şekilde tahmin edilmektedir.

Çizelge 6. Geliştirilen YSA modellerinin eğitim, doğrulama ve test veri seti için performans istatistikleri. (Performance statistics for the training, validation and test dataset of the developed ANN models.)

Yapay Sinir Ağı Modelleri	Eğitim (n=21)			Doğrulama (n=5)			Test (n=6)		
	MSE	R^2	MAE	MSE	R^2	MAE	MSE	R^2	MAE
LinR-0-B-L (Doğrusal regresyon)	4.46	0.88	1.77	5.88	0.92	1.79	45.7	0.82	4.60
<i>MLPR-1-B-L (Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı)*</i>	<i>0.14</i>	<i>0.99</i>	<i>0.30</i>	<i>0.28</i>	<i>0.99</i>	<i>0.42</i>	<i>1.35</i>	<i>0.99</i>	<i>0.74</i>
PNN-0-N-N (Olasılık Tabanlı Sinir Ağı)	0.01	0.99	0.01	1.20	0.95	0.85	34.2	0.94	3.31
GFFR-1-B-L (Genelleştirilmiş İleri Beslemeli Sinir Ağı)	0.21	0.99	0.14	3.55	0.91	1.60	7.70	0.99	1.67
<i>MLPR-2-B-L (Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı)</i>	<i>0.02</i>	<i>0.99</i>	<i>0.12</i>	<i>2.12</i>	<i>0.93</i>	<i>1.03</i>	<i>6.73</i>	<i>0.99</i>	<i>1.61</i>

*En iyi performans gösteren YSA italik olarak belirtilmiştir.

YSA modellerinde kullanılan ifadelerin açıklamaları: LinR: Doğrusal Regresyon-; MLPR: Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı; PNN: Olasılık Tabanlı Sinir Ağı; GFFR: Genelleştirilmiş İleri Beslemeli Sinir Ağı; gizli katman (0: gizli katman yok; 1 ve 2: tek ve iki gizli katman), öğrenme algoritması (L: Levenberg-Marquardt) ve öğrenme modu (B: toplu) ve (N:Yok)



Şekil 10. Eğitim, doğrulama ve test verileri için YSA modeli ve deneysel sonuçların saçılım grafiği. (Scatterplot of ANN model and experimental results for training, validation and test dataset.)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışmada, farklı yakıt, devir ve yük koşullarında silindir-segman çifti arasında meydana gelen sürtünme ve aşınma miktarı deneysel ve Taguchi yöntemi ile incelenmiştir. İçten yanmalı motorlarda, maksimum aşınma ilk hareket ve ÜÖN civarında, düşük piston hızlarında meydana gelmektedir. Çalışmada, aşınmanın maksimum olduğu devir sayıları dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda, sürtünme katsayısı ve aşınma miktarını minimum yapan optimum şartlar belirlenmiştir. Ek olarak, farklı yakıt türleri, devirler ve yükler kullanılarak silindir gömleği ve piston segmanlarındaki aşınmanın modellenmesi için bir yapay sinir ağı (YSA) modeli kullanılmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

1. Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile segman-silindir çifti arasında meydana gelen sürtünme katsayısı ve aşınma miktarlarının optimum değerlerini veren çalışma parametreleri tespit edilmiştir.
2. Sürtünme ve aşınma açısından dizel yakıtına göre biyodizel yakıtının daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
3. Sürtünme ve aşınma açısından, 40 N yük altında 150 rpm devirde minimum değerler elde edilmiştir.
4. Taguchi yöntemi daha az sayıda deney yaparak birçok fazla faktörün sürtünme katsayısı ve aşınma miktarına belirlenmesinde etkili bir araç olduğu görülmüştür.
5. Deney sonuçları YSA ile modellenmiştir. YSA modellenmesine göre, farklı sinir ağı mimarisi için deneysel ve tahmin sonuçları açısından R^2 'nin 0.82-0.99 aralığında değiştiği görülmektedir.
6. Geliştirilen 5 farklı YSA modeli içerisinde eğitim, doğrulama ve test veri seti için deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırılması ile elde edilen performans istatistikleri (Tablo 6) açısından en iyi performansı MLPR-1-B-L modelinin gösterdiği görülmüştür.

7. MLPR-1-B-L modelinin çok iyi bir tahmin yeteneğine sahip olduğu ve farklı yakıt türleri, motor devirleri ve yükleri ile silindir gömleği ve piston segmanlarındaki aşınmanın tahmininde kullanılabileceği görülmüştür. Bu modelin kullanılması ile yapılan deney sayısı azaltılmış, zaman ve maliyetten tasarruf sağlanmıştır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Hüseyin KAHRAMAN: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

İdris CESUR: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Beytullah EREN: YSA modellemesini yapmıştır.

Aslan ÇOBAN: Taguchi modelini kurmuştur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İ. Cesur, V. Ayhan, A. Parlak, Ö. Savaş, Z. Aydın., The Effects of Different Fuels on Wear between Piston Ring and Cylinder, Hindawi Publishing Corporation, *Advances in Mechanical Engineering*, Article ID 503212, 8 pages, 2014/503212, (2014).
- [2] J.B.Heywood, International Combustion Engine Fundamentals, *McGraw Hill Book Company*, New York, (1988).

- [3] İpci, D. , Karabulut, H. "Dynamic and Thermodynamic Examination of a Two-Stroke Internal Combustion Engine". *Politeknik Dergisi* 19: 141-154, (2016) .
- [4] C. S. Tung, G. Hong, Tribological characteristics and surface interaction between piston ring coatings and a blend of energy-conserving oils and ethanol fuels, *Wear*, 255, 7–12, (2003).
- [5] Gülseven, H. C. , Özdemir, V. "Dört Silindirli Bir Dizel Motorun Balancer Tasarım ve Analizleri". *Politeknik Dergisi*: 1-1,(2022) .
- [6] C. Sung-Woo, C. Sang-Min, B.Choong-Sik, Frictional modes of barrel shaped piston rings under flooded lubrication, *Tribology International*, 33, 8, (2000).
- [7] Truhan, J.J., Qu. J., Blau. P., J. A ring test to measure friction and wear of heavy duty diesel engine piston rings and cylinder liners using realistic lubricants", *University of Tennessee*, Knoxville, TN 37996, USA, (1996).
- [8] Demirci, E. , Topgül, T. , Özel, U. "Buji İle Ateşlemeli Bir Motorda İkincil Hava Enjeksiyonunun Egzoz Emisyonları ve Katalitik Konvertör Verimine Etkisinin Deneysel Analizi". *Politeknik Dergisi* 25: 861-869, (2022) .
- [9] B.S. Andersson, Company perspectives in vehicle tribology – Volvo, 17th Leeds- *Lyon Symposium on Tribology - Vehicle Tribology*, 18:503–506, (1991).
- [10] P.C. Mishra, H. Rahnejat, P.D.King. Tribology of the ring-bore conjunction subject to a mixed regime of lubrication, Proc. IMechE Part C: *J. Mechanical Engineering Science*, 223:987–998, (2009).
- [11] Calam, A. , İçingür, Y. "Hava Fazlalık Katsayısı ve Oktan Sayısı Değişiminin HCCI Yanma Karakteristiklerine ve Motor Performansına Etkileri". *Politeknik Dergisi* 22: 607-618, (2019) .
- [12] M. Priest, C.M. Taylor. Automobile engine tribology-approaching the surface, School of Mechanical Engineering. The University of leeds, *Woodhouse Lane, Leeds*, LS2 JT, UK. (2000).
- [13] C.M. Taylor, Lubrication Regimes and Internal Combustion Engine, *Elsevier Science Publishers*, Leeds England (1993).
- [14] Sapaun SM, Masjuki HH, Azlan A. The use of palm oil as diesel fuel substitute. *J Power Energy – Part A*;210:47–53. (1996).
- [15] Murayama T, Oh Y-T, Miyamoto N, Chikahisa T, Takagi. N. Low carbon flower build up, low smoke and efficient diesel operation with vegetable oils by conversion to monoesters and blending with diesel oil or alcohols. *SAE Paper* 841161, (1984).
- [16] Ali Y, Hanna Milford A, Borg Joseph E... Optimization of diesel Methyl tallowate and ethanol blend for reducing emissions from diesel engine. *Bioresour Technol*; 52:237–43, (1995).
- [17] Manigandan S, Gunasekar P, Devipriya J, Nithya S, Emission and injection characteristics of corn biodiesel blends in diesel engine. *Fuel*;235:723–35, (2019).
- [18] Usta N, Can Ö, ve Özgürtürk E.,Comparison of biodiesel and ethanol as alternative diesel engine fuel, Pamukkale University Faculty of Engineering. *J Eng Sci* 3, (2005).
- [19] Ozsezen AN, Canakci M.,Determination of the performance and combustion characteristics of a diesel engine with canola and waste palm oil methyl esters. *Energy Conserv Manage*, 52:108–16, (2011).
- [20] Devan PK, Mahalakshmi NV. Performance emission and combustion characteristics of poon oil and its diesel blends in a DI diesel engine. *Fuel* 2009;88:861–7, (2009).
- [21] Karaosmanoğlu F, Kurt G, Özakaş T. (2000). Long term CI engine test of sunflower oil. *Renewable Energy*, 19:219–21, (2000).
- [22] S.H. Hamdana, W.W.F. Chongcidie, J.-H. Ngbif, C.T. Chongcid, S. Rajoocid. A study of the tribological impact of biodiesel dilution on engine lubricant properties", *Process Safety and Environmental Protection*, (2017).
- [23] T. Chaudhari, B. Sutaria. Investigation of friction characteristics insegmented piston ring liner assembly of ICengine, *Perspectives in Science* 8, 599–602, (2016).
- [24] S. Hisham , K. Kadirgama , D. Ramasamy , M.M. Noor , A.K. Amirruddin , G. Najafi , M.M. Rahman. (2017). Waste cooking oil blended with the engine oil for reduction of friction and wear on piston skirt, *Fuel* 205, 247–261, (2017).
- [25] S.W. Cho, S.M. Choi, C.S. Bae. Frictional models of barrel shaped piston rings under folded lubrication, Department of Mechanical Engineering, *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, KAIST 373-1,1, (2000).
- [26] Z.Y. Wu, H.W. Wu, C.H. Hung. Applying Taguchi method to combustion characteristics and optimal factors determination in diesel/biodiesel engines with port-injecting LPG, *Fuel* 117, 8–14, (2014).
- [27] T. Ganapathy, K. Murugesan , R.P. Gakkhar. Performance optimization of Jatropa biodiesel engine model using Taguchi approach, *Applied Energy* 86, 2476–2486, (2009).
- [28] Y.H. Tan, M.O. Abdullah, C.N. Hipolito, N.S.A. Zauzi. Application of RSM and Taguchi methods for optimizing the transesterification of waste cooking oil catalyzed by solid ostrich and chicken-eggshell derived CaO, *Renewable Energy* 114, 437-447, (2017).
- [29] Babu, D., Thangarasu, V., and Ramanathan, A. Artificial neural network approach on forecasting diesel engine characteristics fuelled with waste frying oil biodiesel, *Applied Energy*, 263,114612.2020, (2020).
- [30] Huang M-L, Hung Y-H, Yang Z-S. Validation of a method using Taguchi, response surface, neural network, and genetic algorithm. *Measurement*, 94:284–294, (2016).
- [31] Tosun, E., Aydin, K., and Bilgili, M. Comparison of linear regression and artificial neural network model of a diesel engine fueled with biodiesel-alcohol mixtures", *Alexandria Engineering Journal*, 55(4), 3081–3089, (2016).
- [32] Yaqub, M., Eren, B., and Eyupoglu, V. Soft computing techniques in prediction Cr(VI) removal efficiency of polymer inclusion membranes", *Environ. Eng. Res.*, 25(3), 418–425, (2019).
- [33] Hasani, G., Daraei, H., Shahmoradi, B., Gharibi, F., Maleki, A., Yetilmezsoy, K., and McKay, G. A novel ANN approach for modeling of alternating pulse current electrocoagulation-flotation (APC-ECF) process: Humic acid removal from aqueous media", *Process Saf. Environ. Prot.*, 117, 111–124, (2018).

- [34] Aber, S., Amani-Ghadim, A. R., and Mirzajani, V., Removal of Cr(VI) from polluted solutions by electrocoagulation: Modeling of experimental results using artificial neural network”, *J. Hazard. Mater.*, 171(1–3), 484–490, (2009).
- [35] Dogan, E., Ates, A., Yilmaz, E. C., and Eren, B., Application of artificial neural networks to estimate wastewater treatment plant inlet biochemical oxygen demand, *Environ. Prog.*, 27(4), 439–446, (2008).