



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ATIK KIZARTMA YAĞI BİYODİZELİNİN
MOTOR PERFORMANS VE EGZOZ
EMİSYONLARININ TİP-2 BULANIK MANTIK
İLE TAHMİNİ

Hatice SAMANCI

YÜKSEK LİSANS

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hatice SAMANCI

Tarih:26.04.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

ATIK KIZARTMA YAĞI BİYODİZELİNİN MOTOR PERFORMANS VE EGZOS EMİSYONLARININ TİP-2 BULANIK MANTIK İLE TAHMİNİ

Hatice SAMANCI

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali YAŞAR

2024, 94 Sayfa

Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Ali YAŞAR
Doç. Dr. İlker ÖRS
Prof. Dr. Murat MAYDA

Günümüzde, içten yanmalı motorların geliştirilmesi ve alternatif yakıt çeşitleri üzerinde yapılan araştırmalar hala devam etmektedir. Yapılan bu çalışmalar ise gerek maliyet açısından ve gerekse zaman açısından çok ciddi kayıplara sebep olmaktadır. Literatürde de benzer çalışmalar mevcut olmasına rağmen bazen kendini tekrarlayan çalışmalar yapılmaktadır. Artık son yıllarda yüksek maliyetli motor ve yakıt deneyleri yerine bilgisayar programları ve yapay zekâ teknikleri kullanımı artmaya başlamıştır. Bu kapsamda, bulanık mantık ve yapay sinir ağları gibi yapay zekâ tekniklerinin motor performans tahmininde etkili olduğuna dair örnekler çoğalmaktadır.

Bu çalışmada da atık kızartma yağlarından elde edilen biyodizel karışımları kullanılarak deneysel veriler elde edilmiş ve daha sonra bu veriler tip-2 bulanık mantık ile işlenerek deney sonuçları tahmin ettirmeye çalışılmıştır. Yine deneysel çalışması ve test ölçümleri ile elde edilmemiş olan ara değerler tahmin ettirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen tahminlerin gerçek değerlere çok yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar incelendiğinde deneysel çalışması yapılamamış olan değerlerin tahmin edilebildiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, yapay zekâ teknikleri ile desteklenen bilgisayar tabanlı sistemler ile motor performans ve egzoz emisyonlarının tahmin edilmesi çalışmalarında önemli bir rol oynadığı ve alternatif yakıtların değerlendirilmesinde etkin bir şekilde kullanılabildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: biodizel, bulanık mantık, fuzzy, motor testi, tahmin, tip-2

ABSTRACT

MS THESIS

PREDICTION OF ENGINE PERFORMANCE AND EXHAUST EMISSIONS OF WASTE COOKING OIL BIODIESEL USING TYPE-2 FUZZY LOGIC

Hatice SAMANCI

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Dr. Ali YAŞAR

2024, 94 Pages

**Jury
Dr. Ali YAŞAR
Assoc. Prof. Dr. İlker ÖRS
Prof. Dr. Murat MAYDA**

Currently, research on the development of internal combustion engines and alternative fuel types is still ongoing. These studies can lead to significant losses in terms of both cost and time. Although similar studies exist in the literature, sometimes redundant research is conducted. In recent years, the use of computer programs and artificial intelligence techniques instead of costly engine and fuel experiments has been on the rise. In this context, there are increasing examples demonstrating the effectiveness of artificial intelligence techniques such as fuzzy logic and artificial neural networks in predicting engine performance.

In this study, experimental data were obtained using biodiesel blends from waste cooking oils, and then these data were processed using type-2 fuzzy logic to predict experimental results. Additionally, intermediate values that were not obtained through experimental studies and test measurements were predicted. The results showed that the predictions were very close to the actual values. Upon examining these results, it was observed that values that could not be experimentally measured could be predicted.

In conclusion, computer-based systems supported by artificial intelligence techniques play an important role in the prediction of engine performance and exhaust emissions, and they can be effectively used in the evaluation of alternative fuels.

Keywords: biodiesel, fuzzy logic, motor testing, prediction, type-2

ÖNSÖZ

Çalışmalarımda beni yönlendiren, yardım ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali YAŞAR'a, tüm çalışmalarımda ve deneylerde yanımda olan, yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. İlker ÖRS'e ve her türlü desteğiyle yanımda olan eşim Süleyman SAMANCI'ya ve aileme teşekkür ederim.

Hatice SAMANCI
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Bulanık Mantık Kavramı	3
1.2. Dizel Motorlar.....	7
1.2.1. Dizel motorlarda yanma.....	10
1.3. Atık Kızartma Yağı Biyodizeli	12
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1. Materyal	25
3.1.1. Test motoru	25
3.1.2. Test yakıtları	25
3.1.3. Egzoz emisyon cihazı	26
3.2. Bulanık Mantık	29
3.2.1. Tip-1 bulanık mantık	29
3.2.1.1 Tip-1 bulanık kümelerde işlemler	31
3.2.2. Tip-2 bulanık mantık	32
3.2.2.1 Tip-2 bulanık kümelerde işlemler	34
3.2.2.2 Tip-2 bulanık sistemler	35
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	45
4.1. Motor Torku.....	45
4.2. Motor Gücü.....	47
4.3. Özgül Yakıt Tüketimi	49
4.4. Termik Verim	51
4.5. Volümetrik Verim.....	53
4.6. CO	55
4.7. CO ₂	57
4.8. HC	59
4.9. NO _x	61
4.10. DUMAN	63
4.11. TEG.....	66
4.12. Deneysel Çalışması Yapılmayan Değerlerin Tahmini.....	68

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	85



SİMGELER VE KISALTMALAR

ANN	:	Artificial Neural Network (Yapay Sinir Ağları)
B0	:	Dizel
B100	:	Biyodizel
BD	:	Biyodizel
EUD	:	Euro dizel
FES	:	Fuzzy Expert System (Bulanık Uzman Sistemi)
FIS	:	Fuzzy Inference System (Bulanık Sonuç Çıkarma Sistemi)
FOU	:	Footprint of Uncertainty (Belirsizlik Ayak İzi)
LMF	:	Lower Membership Function (Alt Üyelik Fonksiyonu)
UMF	:	Upper Membership Function (Üst Üyelik Fonksiyonu)
MIMO	:	Multiple Input and Multiple Output (Çok Girişli ve Çok Çıkışlı)
ÖYT	:	Özgöl yakıt tüketimi
UMF	:	Upper Membership Function (Üs Üyelik Fonksiyonu)
η_t	:	Fren termik verimi
HC	:	Hidrokarbon
CO	:	Karbon monoksit
CO ₂	:	Karbon dioksit
NO _x	:	Azot oksit
P	:	Güç
kW	:	Kilowatt
VV	:	Volümetrik verim
TV	:	Termik verim
PM	:	Partikül maddeler
ÜÖN	:	Üst Ölü Nokta
AÖN	:	Alt Ölü Nokta

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorların, özellikle dizel motorların henüz yerinin tam anlamıyla doldurulamamış olması, iyileştirme ve geliştirme çalışmalarının devam etmesine neden olmaktadır. Bu çalışmalar günümüzde özellikle yüksek performans elde ederken yakıt ve egzoz emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir. Bir diğer hedefleri ise içten yanmalı motorların yakıt ihtiyacına olan talebe alternatif yakıtlar araştırmaktır. Bunun da ana nedeni; küresel olarak otomobiller, kamyonlar, sanayiler, enerji santralleri, uçaklar ve gemi taşımacılığı gibi sektörlerin büyümesi sonucu ihtiyacın önemli ölçüde artmış olmasıdır(Delavari ve ark., 2015).

Enerji talebinin artması, petrol yakıt rezervlerinin azalması, bunlar tarafından neden olan kirliliğin artması ve yakıt fiyatlarının yükselmesi, alternatif enerji kaynaklarına yönelik dikkati çekmiştir. Yakıtların tükeniyor olması aynı zamanda enerji tükenmesine yol açmaktadır, birçok çalışma petrol rezervlerinin yakın zamanda tükeneceğini göstermektedir. Bu da alternatif yakıtları araştırmak için birçok girişimi tetiklemiştir(Sakthivel ve ark., 2016). Alternatif bir yakıt; teknik olarak uygulanabilir, ekonomik açıdan geleneksel dizel yakıtla rekabet edebilecek, çevre dostu ve kolayca temin edilebilir olmalıdır. Bu kriterler göz önüne alındığında, bitkisel ve hayvansal yağlardan transesterifikasyon yöntemiyle elde edilen biyodizel yakıtlar, geleneksel dizel yakıtı uygun bir alternatif olabilir.(Sarıdemir, 2016). Biyodizel, sebze yağları ve hayvansal yağlardan elde edildiği gibi atık yemek yağlarından da üretilebilir (Vilela ve ark., 2010). Biyodizel, sadece enerji güvenliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yenilenebilir, toksik olmayan, biyolojik olarak parçalanabilir ve dizel ile neredeyse aynı özellikte temiz bir enerji kaynağı sunar (Kumar, 2010).

Motor ve yakıt deneylerinin yapılması için çok kapsamlı teknik aletlere ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmalarda motor performansı ölçümleri için dinamometre, emisyon cihazları, diğer veriler için sensörler, kayıt cihazları, bunların kontrol ve yönetimi için kontrol sistemleri, arayüz, program gibi pek çok pahalı sistem ve cihaza ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da yüksek maliyete yol açmaktadır. Bunların yanı sıra deneylerin yapılması için gerekli ön hazırlıklar, deneylerin yapım aşamaları, sonrasında elde edilen verilerin işlenmesi ve ayıklanması son derece zahmetli, uzun zaman alan ve çok maliyetli çalışmalardır. Üreticiler ve uygulama mühendisleri de, bahsedilen çalışmaların daha karmaşık, zaman alıcı ve maliyetli olduğunu belirtmişlerdir (Shanmugam ve ark., 2011).

Bu çalışmaların yapılmasının gerekli olduğu bu dönemde, bu kadar maliyet ve zaman alan deneyler için alternatif arayışları ortaya çıkmaktadır.

Bilgisayar programlarının çok geliştiği günümüzde artık pek çok analiz ve çalışma bilgisayarlar üzerinden yapılmaktadır. Bu durum motor deneylerinin de bilgisayar ortamında yapılabilmesine olanak vermektedir. Fakat klasik bilgisayar programları matematiksel verilerle işlem yapmaktadır. Ortaya çıkacak sonuçlar da bu veriler doğrultusunda şekillenmektedir. Bu sebeple belirli kurallar ve formüller çerçevesinde net veriler girilmelidir. Fakat motor deneylerinin gerçekleştirilmesi için gerekli şartlar ve girdiler her zaman aynı değildir. Çıktı olarak da çok değişken sonuçlar elde edilmektedir. O yüzden girdilerin yorumlanarak işlenmesi buna göre de sonuçlar vermesi gerekmektedir. Burada klasik bilgisayar programları yetersiz kalmakta, bundan dolayı artık günümüzde her alanda kullanılmaya başlanmış olan yapay zeka yazılımları devreye girmektedir. Yapay zekanın bir türü olan Bulanık mantık, matematiksel veriye ihtiyaç duymaması ve insan düşünme yapısına uygunluğu ile bu tür çalışmalar için kullanılmaya başlanmıştır. Yapay sinir ağı (ANN) da bulanık modeller (FIS) gibi yapay zeka tekniklerini kullanarak motor operasyonunu modellemektir. ANN ve FIS'in motor performans tahmininde kullanımı son yıllarda giderek artmıştır (Canakci ve ark., 2006; Gokalp ve ark., 2010; Roy ve ark., 2014).

Bu çalışmalara örnek olarak Sakthivel ve ark. (2016) yaptığı diğer bir çalışmada; tek silindirli sabit hız püskürtmeli dizel motor ile balık yağı kullanılarak ÜÖN dan önce 21., 24. ve 27. derecelerde yakıt püskürterek deneyler yapmıştır. Daha sonra elde edilen performans, egzoz emisyon ve yanma özelliklerini kıyaslamak için bulanık model geliştirmiştir. Yapılan test sonuçları ile bulanık mantık tahmin sonuçlarını karşılaştırıldığında sonuç olarak ÜÖN dan önce 21., 24. ve 27. derecelerde elde edilen sonuçlar; %0.06–2, %0.02–3, %0.08–4.5 aralığında hata payları ile tahmin edilmiştir. Böylece sınırlı sayıda veri ile doğru tahmin yapıldığı ispatlanmıştır. Ilangkumaran ve ark. (2015) eter ile karıştırılmış balık yağı biodizelini kullanarak motor performansını tahmin etmek için Çoklu Girişli ve Çoklu Çıktılı (MIMO) bulanık mantık modeli geliştirilmiştir. Test verileri sınırlı olmasına rağmen, korelasyon katsayıları olan 0.96–0.99 ile daha yüksek tahmin doğruluğunda sonuçlar elde etmişlerdir. Geliştirilen modelin yararlı olduğu sonucuna varılmıştır. Örs ve Bakırcıoğlu (2016) çalışmalarında ayçiçek yağından üretilen biodizel ile dizel yakıt karışımlarının bir dizel motor üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçları, Yapay Sinir Ağları (ANNs) modeli kullanılarak farklı girişler için tahmin etmişler ve ANNs'den elde edilen veriler deneysel

verilere çok yakın olduğunu belirtmişlerdir. Yasar ve ark. (2022) farklı oranlarda atık ekmek biyoetanölünü benzinle karıştırarak oluşturulan yakıt karışımlarıyla yaptıkları çalışmada Kural Tabanlı *Mamdani* Türü Bulanık Uzman Sistem kullanmışlardır. Sonuçları karşılaştırdıklarında, geliştirilen model ile maliyetli ve yoğun emek gerektiren motor testlerinin minimum çaba ve yüksek doğrulukla tahmin edilebileceğini kanıtlamışlardır. Namitha ve Shantharama (2013) içten yanmalı motorun hız kontrolünü incelemek için bir bulanık mantık denetleyici geliştirdiler. Literatürde benzer pek çok çalışma mevcuttur.

1.1. Bulanık Mantık Kavramı

Günlük yaşantımızda karşımıza çıkan birçok durumu, kendi düşüncelerimize göre inceler ve yorumlarız. Mesela, "hava sıcak" ifadesi sıkça kullanılır, ancak "sıcak" kelimesinin anlamı kişiden kişiye değişmektedir. Birisi için 25 °C sıcaklık normal bir sıcaklıkken, başka birisi için aynı sıcaklık soğuk olabilir veya başka biri için ise sıcaklık daha yüksek algılanabilir. Bu durumda, "sıcak" kelimesi altında yatan anlamın kesin bir sayıya indirgenememesi ve değişkenlik göstermesi, belirsizlik yaratır. Bu durum rastlantısal değil, fakat belirsizdir. İşte bu tür belirsizliklere kelimelerin bulanıklığı (*fuzzy*) denir (Şen, 2004). Bu kavram, birçok insanın aynı kelimeyi farklı şekillerde algılamasından kaynaklanır ve herkesin kendine özgü algıları ve değerleri vardır. Bu nedenle günlük iletişimde sık sık bulanık kavramlarla karşılaşırız ve bu kavramlar genellikle kesin bir tanım veya değerle ifade edilemezler.

Küme teorisini kullanarak açıklamak gerekirse, her olayın içerdiği değişkenleri bir varlık olarak ele almalıyız. Klasik bir yaklaşıma göre, bir varlık ya bir kümenin elemanıdır ya da değildir. Eğer bir varlık kümenin bir elemanıysa, "1" değerini alır; değilse, "0" değerini alır. Bulanık mantık ise klasik kümeyi genişleten bir yöntem olarak kabul edilir ve klasik kümenin bir tür genişletilmiş versiyonu olarak düşünülür. Bulanık bir varlık kümesinde, her bir varlığın üyelik derecesi vardır ve bu derece 0 ile 1 arasında değişebilir. Bu esneklik, insanların belirsiz ve kesin olmayan olaylar hakkında elde ettikleri bilgilere dayanarak tutarlı ve doğru kararlar vermelerini sağlayan düşünme ve karar mekanizmalarını oluştururlar. Bulanık mantık, karmaşık veya belirsizlik içeren gerçek dünya problemlerini modellemek ve çözmek için kullanılır, çünkü gerçek hayattaki birçok durum kesin ya da net bir şekilde tanımlanamaz. Bulanık küme kuramı, tanımlamayı ve kesin sınırları gerektirmeyen problemleri çözmek için geliştirilmiş bir

yaklaşımıdır. Bu kuram, kısmi üyelik ilişkilerini göz önünde bulundurarak çalışır. Bu sayede, belirsizlik içeren durumları ele alabilir ve kesin sınırların olmadığı durumları modelleyebilir. Bulanık küme kuramı, basitleştirilmiş modeli daha faydalı hale getirmek için sürekli olarak geliştirilmektedir. Bu gelişmeler sayesinde, gerçek dünya sistemlerinin çözümü sırasında daha sağlam ve esnek modeller geliştirilebilir. Bu modeller, insan faktörlerini ve belirsizlikleri içeren karmaşık durumları daha doğru bir şekilde ele alabilir ve çözebilir (Atin, 1999).

Çizelge 1.1. Klasik mantık ve bulanık mantık arasındaki temel farklılıklar

Klasik Mantık	Bulanık Mantık
A veya A değil	A ve A değil
Tam	Kısmen
Tamamen veya hiç	Belirli ölçülerde
Kesin değer (0/1)	Sürekli değerler (0 ile 1 arası)
İkili birimler	Bulanık birimler

Örneğin, klasik mantıkla suyun durumunu değerlendirirken belirli bir eşik noktası seçeriz. Diyelim ki bu eşik noktası 30 °C olsun. Suyun sıcaklığı 30.1 °C üzerinde ise "sıcak" olarak kabul edilirken, 29.9 °C altında ise "soğuk" olarak kabul edilir. Ancak insanlar olarak, 29.9 °C ile 30.1°C arasında suyun sıcaklık algısında belirgin bir fark hissedemeyiz.

Bulanık mantıkla bakıldığında ise eşik noktası 25 °C olan suyun sıcaklığı 25.1°C olduğunda, bulanık mantığa göre suyun %51'i sıcak, %49'u soğuk gibi yorumlanabilir. 24.9 °C olduğunda ise durum tam tersi yani %49'u sıcak, %51'i soğuk olabilir.

Bu örneğe uygun olarak bir su ısıtıcısını düşünelim. Klasik mantıkla çalışıyorsa 30 °C'nin üzerine çıktığında hemen çalışmaya başlar ve 30 °C'nin altına düştüğünde dururdu. Ancak bulanık mantıkla çalışıyorsa, 30 °C'ye yaklaşırken ısıtma işlemi yavaşlar ve 30 °C'nin üzerine çıkıldığında durur. Bu şekilde daha geniş bir sıcaklık aralığında daha etkili bir şekilde çalışabilir ve enerji tasarrufu sağlanabilir.

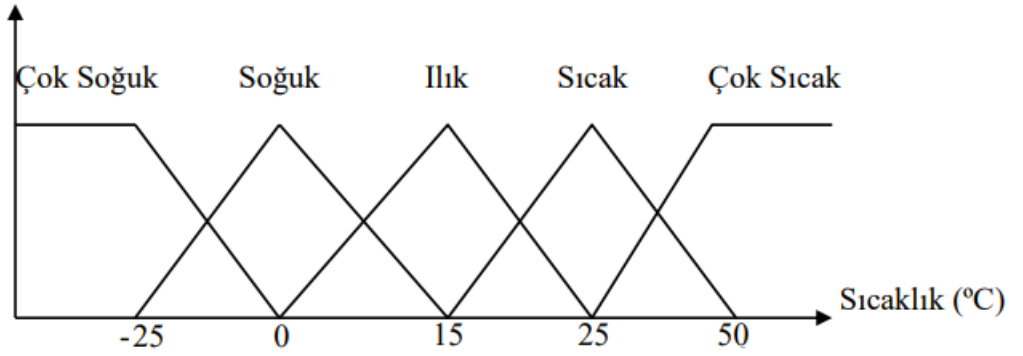
Bulanık mantık kümelerinin kullanılması, belirsizlik içeren kavramların sistematik bir temelde temsil edilmesini sağlar. Bu kavramlar genellikle dilsel değişkenlerle ifade edilir ve bulanık mantık, bu dilsel değişkenlerin modellenmesinde önemli bir rol oynar. Dilsel bir değişken beş özelliği ile karakterize edilebilir (Cheng ve ark., 1999).

Örneğin sıcaklık kavramını dilsel değişken olarak ele alalım. Sıcaklık kavramına ait $T(\text{sıcaklık})$ ifadelerinin olası kümesi şu şekilde oluşturulabilir:

$T=(\text{çok soğuk, soğuk, ılık, sıcak, çok sıcak})$

Burada, her bir ifade -25 ile 50 aralığında tanımlanmış bulanık kümelerle ifade edilir. Örneğin "çok soğuk" ifadesi sıcaklığın -25 dereceye yakın olduğu yerleri, "soğuk" ifadesi 0 dereceye yakın olduğu yerleri, "ılık" ifadesi 15 dereceye, "sıcak" ifadesi 30 dereceye ve "çok sıcak" ifadesi de 50 dereceye yakın olan yerleri değerlendirmek için kullanılabilir.

Bu ifadelerin üyelik değerleri, sıcaklık değerlerinin bulanık kümelerle temsil edilmesiyle belirlenir. Örneğin bir sıcaklık değeri 20°C ise, "sıcak" kavramına ait olan üyelik değeri 20 dereceye yakın olduğu için yüksek olacaktır.



Şekil 1.1. Üyelik değerleri

Bulanık mantık kümeleri, belirsizlik içeren kavramları daha etkili bir şekilde modellemek ve analiz etmek için kullanılır. Bu sayede, gerçek dünya koşullarında karşılaşılan belirsizliklerin daha iyi anlaşılması ve yönetilmesi mümkün olur.

Bulanık mantık sistemlerinde, uygulanan giriş verilerinin bir çıkış sonucuna ulaşabilmesi için "IF – THEN" yani "EĞER – İSE" kurallarına ihtiyaç duyulmaktadır. Kural yapısına baktığımızda, "EĞER" olarak ifade edilen kısım giriş verilerinin atandığı, "İSE" olarak ifade edilen kısım da çıkış sonucunun bölümü olarak tanımlanabilir. Bu kurallar bütünü, tip sınırlaması olmaksızın n'inci dereceden bulanık mantık sistemlerinde kullanılabilir.

Bu kuralların mantığına daha detaylı bir bakış açısıyla bulanık mantık sistemlerindeki her bir kuralın bir ifade olduğunu düşünebiliriz. Her kural, sisteme giriş verileri uygulandığında, bu verilere bağlı olarak belirli bir çıkış üretecek bir işlemi

tanımlar. Örneğin "EĞER sıcaklık YÜKSEK İSE klimayı AÇ" gibi bir kural, sıcaklık yüksek olduğunda klimanın açılması gerektiğini ifade eder.

Bu kural yapısı, sistemin belirsizlik içeren verilerle başa çıkabilmesini sağlar. Giriş verileri kesin sayısal değerler yerine belirli bir dilde ifade edilir, bu da sistemin daha esnek ve gerçek dünya problemlerine daha iyi uyum sağlamasını sağlar. Ayrıca bulanık mantık sistemlerindeki kural tabanı genellikle uzman bilgisine dayanır ve uzmanların deneyimlerine dayanarak belirlenir, bu da sistemin daha doğru ve etkili olmasını sağlar.

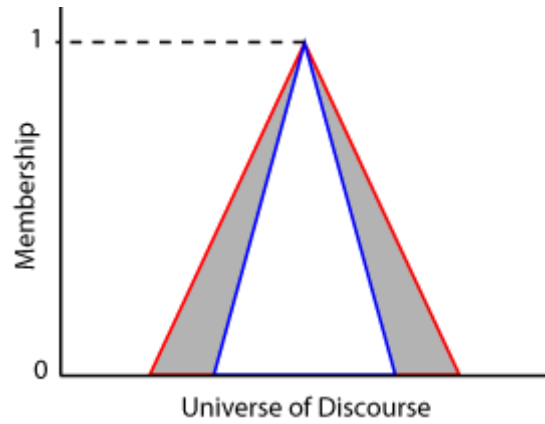
Belirsizlik kavramını belirli bir hale getirmek amacıyla kullanılan sistem modellemelerinde, tip-1 bulanık mantık sistemlerinin bazen yetersiz kaldığı gözlemlenmiş ve daha kesin sonuçlara ulaşmak için tip-2 bulanık mantık sistemleri geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel olarak kullanılan tip-1 bulanık mantık kümelerinden farklı olarak, tip-2 bulanık mantık kümeleri sınırlarında alt ve üst katmanları olan genişletilmiş bir kümeyi oluşturur. Tip-2 bulanık mantık kümelerinde, küme elemanlarının üyeliklerinin sınırları tip-1'den farklı olarak kesin değildir. Yani üyelik geçişleri belli sınırlar içinde yapılmaktadır. Üyelik fonksiyonu belirli sınırlar içerisinde geçişli yapıda olduğundan dolayı bulanık mantık sisteminin kurallarındaki belirsizliklerin önüne geçilmiş olunur.

Tip-1 bulanık mantık sistemlerinde üyelik fonksiyonlarının sınırları keskin ve belirli olduğundan dolayı bazı dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin kural oluşturulurken kullanılan kelimelerin farklı kişiler arasında farklı anlamlar uyandırması, üyelik fonksiyonları belirlenirken danışılan uzman görüşleri arasında farklılıklar olması ve üyelik fonksiyon sınırlarını oluşturmada zorluk yaşanması gibi. Ayrıca giriş verileri ile bulanık sistemi kurmak için kullanılan verilerdeki gürültü oranları da bu gibi dezavantajlara örnek olarak gösterilebilir.

Tip-1 bulanık mantık sistemlerinin sınırlarındaki keskinlik, üyelik geçişleri net olmadığı durumlarda küme tam olarak modellemeyi sağlayamaz ve hatalı sonuçlar üretebilir. Ancak tip-2 bulanık mantık sistemlerindeki üyelik fonksiyonlarının sınırları geçişli olduğundan dolayı, belirsizlik ve aksaklık durumlarında bile tip-1 bulanık kümeye göre daha doğru sonuçlar elde edilebilir.

Bir aralık tip-2 üyelik fonksiyonu, bir üst ve alt üyelik fonksiyonu tarafından tanımlanır. Üst üyelik fonksiyonu "*Upper Membership Function*" (UMF), geleneksel tip-1 üyelik fonksiyonuna eşdeğerdir. Alt üyelik fonksiyonu "*Lower Membership Function*" (LMF), tüm olası giriş değerleri için üst üyelik fonksiyonundan küçük veya eşittir. UMF ve LMF arasındaki bölge, belirsizlik alanıdır "*Footprint of Uncertainty*" (FOU).

Aşağıdaki diyagram, bir tip-2 üçgensel üyelik fonksiyonu için UMF'yi (kırmızı), LMF'yi (mavi) ve FOU'yu (gölge) göstermektedir (mathworks, 2024).



Şekil 1.2. Tip-2 üçgensel üyelik fonksiyonu

Bu çalışmada bulanık mantık tip-2 kullanılarak, motor testi sonucu verileri ile tahminleme yapılmıştır. Bir dizel motorda biyodizel ve karışımları kullanılarak yapılan deney sonuçları, bulanık mantık tip-2 ile işlenip, elde edilen veriler deney sonuçları ile karşılaştırılarak sonuçlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile ayrıca ölçümü yapılmayan ara değerlerin tahmini yapılmış olup doğruluğu elde edilen sonuçlar üzerinden kıyaslama yapılmıştır.

1.2. Dizel Motorlar

Dizel motor, içten yanmalı bir motordur ve yakıt olarak genellikle dizel yakıtı kullanır. İsmi, Alman mucit Rudolf Diesel'den gelmektedir, çünkü bu motor türü onun tarafından geliştirilmiştir. Dizel motorlar, içlerindeki hava-yakıt karışımını sıkıştırarak ve ısıtarak ateşlerler, bu da içindeki pistonları döndürür ve mekanik enerjiyi üretir. Dizel motorlar, genellikle yüksek tork ve yakıt verimliliği ile bilinirler ve bu özellikleri nedeniyle ticari araçlar, kamyonlar, gemiler ve jeneratörler gibi birçok farklı uygulamada kullanılırlar (Örs ve ark., 2022).

Motor torku, bir motordan elde edilen dönme kuvvetinin bir ölçüsüdür ve mekanik gücün bir göstergesidir. Temelde, motorun içindeki yanma sürecinde oluşan enerjinin dönen bir hareketle aktarılmasıdır. Motor torku, motor milinin çıkışında ölçülür ve genellikle Newton metre (Nm) cinsinden ifade edilir. Dizel motorların yüksek sıkıştırma

oranları daha yüksek tork seviyeleri üretmelerine olanak tanır. Dizel motorlar, özellikle düşük devirlerde ve düşük hızlarda yüksek tork seviyeleri üretir. Bu, ağır yük taşıma, römork çekme veya yokuş yukarı çıkma gibi görevlerde avantaj sağlar. Dizel motorlar genellikle dayanıklıdır ve yüksek tork seviyelerini sürekli olarak sağlayabilir. Turbo şarj veya süper şarj gibi sistemler sayesinde de motorun daha verimli ve güçlü bir şekilde çalışmasına olanak tanır. Sonuç olarak dizel motor torku, araçların güçlü bir şekilde çekiş ve hızlanma sağlayabilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu özellik, ağır hizmet taşıtları ve ticari araçlar için özellikle avantajlıdır.

Güç ise motorun birim zamanda üretebildiği iş veya mekanik gücün bir ölçüsüdür ve motorun volanından ölçülen tork değeri ile hesaplanır. Dizel motorlar düşük devirlerde bile yüksek tork ve güç üretebilirler.

Özgül yakıt tüketimi, birim zamanda birim güç elde edebilmek için harcanılan yakıt tüketimi miktarıdır. Düşük devirlerde yüksek tork üretebildiği için daha az yakıt tüketimiyle daha fazla güç sağlayabilirler.

Dizel motorlar, benzinli motorlara göre pek çok avantaja sahiptir. Bazı temel avantajlar:

Yakıt Verimliliği: Dizel motorlar, her bir yakıt biriminden daha fazla enerji çıkararak uzun mesafe sürüşü veya ağır hizmet uygulamaları için daha ekonomiktir.

Güç ve Çekiş Yeteneği: Dizel motorlar daha yüksek tork üretir, bu da daha iyi çekme gücü ve ivme sağlar. Bu özellikleri sayesinde ağır yükler taşımak veya römork çekmek için uygundur.

Dayanıklılık ve Uzun Ömür: Dizel motorlar genellikle daha dayanıklıdır ve uzun ömürlüdür. Yüksek sıkıştırma oranlarına ve ağır iş yüklerine dayanacak şekilde tasarlanmışlardır.

Daha İyi Yakıt Ekonomisi ve Menzil: Dizel motorlar, daha iyi yakıt verimliliği sayesinde daha uzun menzil sunarlar. Bu özellikleri, uzun mesafe seyahatleri veya ticari uygulamaları tercih edenler için önemlidir.

Yüksek Satış Değeri: Dizel araçlar genellikle benzinli araçlara göre daha yüksek satış değerine sahiptir. Dayanıklılıkları ve ekonomik performansları, bu araçların değerlerini zamanla korumalarını sağlar.

Ancak yüksek başlangıç maliyetleri, bazı kirletici emisyonlar ve daha fazla gürültü gibi bazı dezavantajları da vardır. Neyse ki teknolojiye ilerlemeler ve emisyon kontrol sistemlerindeki gelişmeler, bu dezavantajları giderebilmektedir (Firoz, 2017).

Dizel motorun başlıca dezavantajlarından biri olan emisyonlar, çevre ve insan sağlığı üzerinde önemli etkileri olan kirleticiler içerir. Bu emisyonlar genellikle motorun yanma süreci sonucunda ortaya çıkar. Dizel motorlarının yaydığı başlıca emisyonlar şunlardır:

Azot oksitler (NO_x) emisyonlarının oluşumuna oksijen miktarı, yüksek sıcaklıkta yanma ve yüksek yanma sıcaklığında geçen süre sebep olmaktadır (Akçay ve ark., 2019). NO_x , hava kirliliğine ve asit yağmurlarına katkıda bulunur. Ayrıca solunum problemleri ve diğer sağlık sorunlarına neden olabilir.

Partikül maddeler (PM), dizel motorlardan çıkan duman, ince partiküller içerir. Bu partiküller solunum yollarına zarar verebilir ve kardiyovasküler sorunlara yol açabilir. Ayrıca atmosferdeki asılı partiküller, hava kirliliğini artırır.

Karbon monoksit (CO) emisyonu, renksiz, kokusuz ve zehirli bir gazdır ve yakıtın eksik yanması sonucu meydana gelir. CO emisyonunun oluşum nedenleri arasında yakıt/hava oranı, yeterli süre olmaması, oksijen seviyeleri, karışımın heterojenliğine bağlı olarak yanma odası içinde oluşan zengin karışımlar yer almaktadır (Sanli, 2018).

Karbon dioksit (CO_2), fosil yakıtların yanması sırasında oluşan bir sera gazıdır. Tam yanmanın bir göstergesi olan (CO_2) emisyonu, hidrokarbon içerikli yakıtların yanması sonucu oluşur. Atmosferde sera etkisi yaratarak küresel ısınmaya katkıda bulunan bir gazdır (Örs, 2014).

Hidrokarbonlar (HC), yakıtın tam olarak yanmaması nedeniyle oluşur. Özellikle yüksek devirlerde yanma süreci çok hızlı gerçekleştiği için tam yanma için yeterli zaman olmayabilir. Bu nedenle iş zamanı sırasında yanma odasında kalan yanmamış yakıt molekülleri HC emisyonlarını oluşturur (Hajlari ve ark., 2019).

Dizel motorlar için emisyon kontrolü önemli bir konudur ve çevre ve insan sağlığını korumak için belirli standartlar ve düzenlemeler uygulanmaktadır. Modern dizel motorları, bu emisyonları azaltmak için katalitik konvertörler, dizel partikül filtreleri ve SCR (Selektif Katalitik İndirgeme) gibi emisyon kontrol sistemleri kullanır. Bu sistemler, motorun çevreye verdiği zararı azaltmaya yardımcı olur.

Dizel motor, içten yanmalı motor prensibini kullanarak çalışır. Dizel motorlarda yanma, sıkıştırılmış hava ile yakıtın püskürtülmesiyle oluşan bir süreçtir.

1. Emme: Dizel motorun çalışması emme zamanı ile başlar. Piston üst ölü noktadan alt ölü noktaya doğru hareket ederken silindir içine hava emilir.

2. Sıkıştırma: Emilen hava pistonun üst ölü noktaya doğru hareketiyle sıkıştırılır. Sıkıştırma, havanın sıcaklığını artırır ve yanma odası içindeki basıncı yükseltir.

3. Yakıt Püskürtme Aşaması: Silindir içindeki havanın sıkıştırılması en yüksek noktaya ulaştığında, yakıt enjektörlerinden yüksek basınç altındaki yakıt silindir içerisine püskürtülür. Yakıt püskürtüldüğü anda, yüksek sıkıştırma nedeniyle sıcaklık ve basınç aniden artar.

4. Yanma: Yakıt püskürtülürken yüksek basınç ve sıcaklık altında, yakıt parçacıkları hızla buharlaşır ve ardından buhar, hava ile karışır. Karışım, yakıtın özelliklerine ve sıkıştırma oranına bağlı olarak kendiliğinden yanar. Yanma, sıcaklığın ani artışı ve yakıt-hava karışımının tamamen yanması sonucunda gerçekleşir. Bu aşamada piston, itme strokunu başlatmak için alt ölü noktaya doğru hareket eder.

5. İtme Aşaması: Yanmayla oluşan yüksek basınç, pistonu alt ölü noktaya doğru iterek, pistonun krank miline bağlı olarak dönme hareketi oluşturur ve motorun mekanik enerjiye dönüşümü gerçekleşir.

6. Egzoz: Pistonun üst ölü noktaya doğru hareket etmesiyle yanma işleminden kaynaklanan egzoz gazları, bir sonraki döngüye hazırlık amacıyla egzoz valfi aracılığıyla dışarı atılır.

Bu süreç, dört zamanlı bir dizel motorun bir döngüsünü temsil eder ve silindirlerdeki bu döngüler sırayla gerçekleşir. Bu süreç, motorun güç üretmesini ve tahrik sistemlerini hareket ettirmesini sağlar.

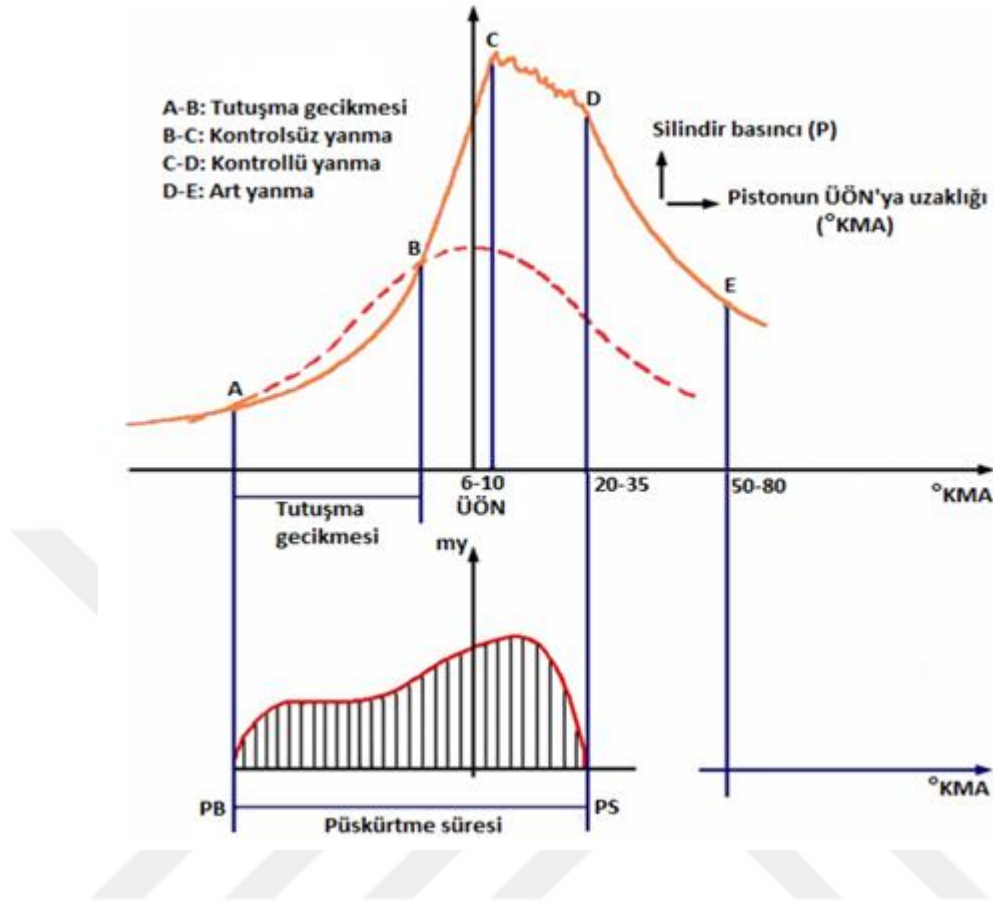
1.2.1. Dizel motorlarda yanma

Yanma, yakıtın oksijenle reaksiyona girerek su ve karbondioksit gibi ürünlerin oluştuğu bir kimyasal tepkimedir. Bu tepkime sırasında ısı ve enerji açığa çıkar. İçten yanmalı motorlar, bu kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürmek için kullanılır. Dizel motorlarında ise yanma süreci genellikle sıkıştırma zamanı sonuna doğru gerçekleşir. Bu esnada silindire alınan hava, enjektör tarafından basınçlı olarak püskürtülen yakıtla karıştırılarak yaklaşık olarak 600-900 °C'ye kadar ısıtılır ve basınç altında tutulur. Bu yüksek sıcaklık ve basınç altında, yakıt hava karışımı kendiliğinden yanar ve motorda güç oluşturur (Çat, 2012).

Yanma olayı;

- Tutuşma gecikmesi
- Kontrolsüz yanma (ani ya da hızlı yanma)
- Kontrollü yanma
- Art yanma (gecikmiş yanma) olarak dört aşamada gerçekleşmektedir.

Şekil 1.3 dizel motordaki yanma diyagramını göstermektedir.



Şekil 1.3. Dizel motorlarında yanma diyagramı (Çelebi, 2017)

Tutuşma gecikmesi, silindire sıkıştırma sonrasında püskürtülen yakıt hemen tutuşmaz. Yakıtın tutuşabilmesi için önce oksijenle karışması ve sıcaklığının yükselmesi gerekmektedir. Bu nedenle enjektörün yakıtı silindire püskürtmesinden, ilk alev çekirdeğinin meydana geldiği zamana kadar geçen süreye tutuşma gecikmesi denir.

Kontrolsüz yanma (ani ya da hızlı yanma), tutuşma gecikmesi süresi boyunca silindire püskürtülen yakıt ısınarak oksijenle karışır ve buharlaşır. İlk alev çekirdeği meydana geldiğinde, yakıtın tamamı aniden yanmaya başlar ve hızlı bir yanma meydana gelir. Bu hızlı yanma, basıncın ani bir şekilde yükselmesine ve motor parçaları arasındaki boşlukların aniden kapanmasına neden olarak motorun düzensiz ve vuruntulu bir şekilde çalışmasına sebep olur.

Kontrollü yanma, kontrolsüz yanmanın ardından silindir içindeki basınç ve sıcaklık, enjektörden püskürtülen yakıt doğrudan yakabilecek bir seviyeye ulaşır, bu nedenle püskürtülmekte olan yakıt hiçbir gecikme olmadan yanar. Basınç en yüksek noktaya ulaşana kadar artar. Geri kalan püskürtme ve yanma sırasında basınç sabit kalır.

Art yanma (gecikmiş yanma), yakıtın silindire püskürtülmesi sona ermiş ve piston aşağı doğru inmekte olan bir aşamada, daha önce püskürtülen ancak yanma fırsatı bulamamış olan yakıt, genişleme sırasında mevcut oksijen miktarına bağlı olarak yanmaya başlar. Bu tür yanmaya gecikmiş yanma denir.

1.3. Atık Kızartma Yağı Biyodizeli

Atık kızartma yağı, kullanılmış kızartma yağıdır. Restoranlar, oteller, gıda işletmeleri, fast food zincirleri ve evlerde kullanılan kızartma yağının, kullanılamaz hale gelmiş halidir. Kızartma işlemi sırasında, gıda maddesi ile kızartma yağı arasında ısı ve kütle alışverişi gerçekleşir. Bu süreçte, hem gıda ürünü hem de kızartma yağında fiziksel ve kimyasal değişimler oluşur. Kızartma yağının sıcaklığı artar ve bu durum, yağın hidroliz, polimerizasyon ve oksidasyon gibi reaksiyonlara girmesine neden olur (Koçer ve Durmuş, 2019). Hidroliz, yağ moleküllerinin sudaki varlığında parçalanması ve serbest yağ asitlerinin oluşması anlamına gelir. Polimerizasyon ise yağ moleküllerinin birbirleriyle bağlanarak daha büyük moleküller oluşturmaları sürecidir. Oksidasyon ise yüksek sıcaklıklarda ve havanın etkisiyle yağın okside olması ve kötüleşmesi sürecidir. Bu reaksiyonlar neticesinde yağın yapısında değişiklikler olur ve tekrar kullanılamaz hale gelir.

Bu yağları bertaraf etmek de başlı başına bir sorundur. Atık yağların lavaboya dökülmesi diğer atıklarında yapışmasına, boruların ve kanalizasyon sisteminin daralmasına ve ileri durumda tıkanmasına yol açabilmektedir. Daralan borular koku, atık su baskını gibi sorunlar açar ve tıkanma olması durumunda kanalizasyon sistemini temizlemek ya da yenilemek maliyetli ve çok zahmetli bir iştir (Alptekin, 2013). Atık yağların yakılması, çöpe atılması, toprağa dökülmesi çok ciddi çevre sorunlarına sebep olmaktadır. Atık yağların bertaraf edilmesinde, bu atık yağları biyodizel üretiminde kullanmak, çevresel etkilerini azaltmak için alternatif olabilmektedir.

Biyodizel, bitkisel, hayvansal ve alg (yosun) yağlarından elde edilen bir yakıt türüdür. Yağ asitlerinin alkil mono esterleri şeklinde tanımlanır ve "biyo" ile "dizel" kelimelerinin birleştirilmesiyle adını almıştır (Şanlı, 2014).

Dizel yakıtla biyodizel arasındaki belirgin fark, petrol rezervlerinin giderek azalmasına karşın, biyodizelin tarımsal faaliyetlerle birlikte yağlı tohumlu bitkilerin, hayvansal yağların ve bitkisel atık yağların sürekli olarak geri kazanılmasıyla sağlanan devamlı yenilenebilir kaynak olmasıdır. Biyodizel, bu yağları metanol veya etanol ile bir

katalizör yardımıyla reaksiyona sokarak üretilen bir yakıt türüdür. Biyodizel kesinlikle petrol ürünü değildir ve dizel yakıtla karıştırılarak veya saf olarak kullanılabilir. Araç motorlarında herhangi bir değişiklik yapılmasına gerek kalmadan kullanılabilirler. Biyodizel, dizel yakıtı katılan orana göre adlandırılır; örneğin, %5 oranında biyodizel katıldığında B5 olarak adlandırılırken, saf olarak kullanıldığında B100 olarak anılır (Yildiz, 2008).

Atık kızartma yağları genellikle yüksek viskoziteye sahiptir. Bu nedenle yakıt olarak kullanılmadan önce viskozitelerinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla genellikle iki tür işlem kullanılır: ısı ve kimyasal yöntemler. Kimyasal yöntemler arasında seyreltme, inceltme, mikroemülsiyon oluşturma, piroliz ve transesterifikasyon gibi işlemler bulunmaktadır (İnal, 2017). Çizelge 1.2’de bu kimyasal yöntemler verilmiştir.



Çizelge 1.2. Kimyasal yöntemler

Yöntemler	Ana Süreç	Avantajlar	Dezavantajlar
Karıştırma (seyreltme)	Önceden ısıtılmış bitkisel veya hayvansal yağlar, petrol-dizel ile %10 ila %40 (ağırlıkça) oranında karıştırılır. Daha sonra elde edilen yağ-dizel karışımı dizel motora uygulanır.	Kimyasal bir işlem gerektirmez (kirlilik oluşturmaz), teknik değişikliklerin olmaması kolay uygulanabilir olması.	Yüksek viskozite, kararsızlık, düşük buharlaşma özelliği ve bitkisel/hayvansal yağ oranının artması, uygun püskürtme deseni oluşmamasına, zayıf yanma ve geleneksel motorlarda kullanım zorluğu.
Mikroemülsiyon	Bitkisel/hayvansal yağlar, gerekli viskozite elde edilene kadar bir çözücü (alkol) ve yüzey aktif madde içinde çözündürülür.	Basit bir süreç ve çevre kirliliği açısından temizdir.	Yüksek viskozite, düşük stabilite, yapışma, tamamlanmamış yanma ve karbon birikimi.
Piroliz (termal çatlama)	Bitkisel veya hayvansal yağlar, katalizör mevcut olup olmadığına bakılmaksızın yüksek sıcaklıkta (350°C'den fazla) önceden ısıtılır ve parçalanır. Farklı ürünler (gaz ve sıvı), kaynama sıcaklığı aralığına göre analiz edilerek tam ürün belirlenir.	Bu süreç etkili, basit (yıkama, kurutma veya filtreleme gerektirmez), atıksız ve kirlilikten arındırılmıştır.	Yüksek sıcaklık ve pahalı ekipman gerektirir ve düşük saflıkta biyodizel üretir (kül ve karbon kalıntıları da dahil olmak üzere heterojen molekülleri içerir).
Transesterifikasyon	Bitkisel veya hayvansal yağlar ve yağlar alkol (etanol veya metanol) ve katalizör (alkali veya asit) ile tepkimeye sokulur. Ardından, metil/etil esterlerin (biyodizel) ve gliserolün (yan ürün) karışımı, daha fazla kullanıma geçmeden önce ayrılma ve arıtma adımlarından geçirilecektir.	Yüksek dönüşüm oranıyla görece düşük maliyet, hafif reaksiyon koşulları, ürün özelliklerinin petrol-dizeline daha yakın olması ve endüstriyel ölçekte üretime uygundur.	Ham madde içinde düşük serbest yağ asidi (FFA) ve su içeriği gereklidir, kapsamlı ayrılma ve arıtma adımları, yan reaksiyonların oluşma olasılığı ve büyük miktarda atık su oluşumu bulunmaktadır.

Biyodizelin modern motorlarda sorunsuz bir şekilde kullanılması için yakıt özellikleri açısından motorin ile benzerlik göstermesi gerekir. Bunun için uluslararası kalite standartları oluşturulmuştur. Almanya, Avusturya, Fransa, ABD ve İtalya gibi ülkeler, dünya genelinde üretilen biyodizel için belirli standartlar geliştirmiştir. Bu standartlar, biyodizel kalitesini ve uyumluluğunu belirlemek için kullanılmaktadır. Dünya çapında dizel motoru üreten Volkswagen, MAN, Audi, Mercedes-Benz, Skoda, John Deere, Ford, Kubota, Seat gibi tanınmış pek çok marka, bu standartları benimsemekte ve uygulamaktadır. ABD'de ASTM tarafından belirlenen standartlar kullanılırken Avrupa ülkelerinde DIN V 51 606 standartlarına uyulmaktadır. Bu standartlar, biyodizel üretiminden başlayarak dağıtım ve kullanıma kadar olan süreçte kalite kontrolünü sağlamak için önemli bir rol oynamaktadır (Kıvrak, 2023). Biyodizel ve dizel için uluslararası standartlarda yoğunluk, kinematik viskozite ve parlama noktası sınır değerleri Çizelge 1.3'te gösterilmiştir(Çelebi, 2017) .

Çizelge 1.3. Dizel ve biyodizel için bazı uluslararası sınır değerleri

	Birim	ASTM		DIN		EN	
Standart Adı		D6751		E51606		14214	
Yakıt		Dizel	Biyodizel	Dizel	Biyodizel	Dizel	Biyodizel
Yoğunluk	kg/m ³	820–845	860-900	860–900	875-900	820–845	860-900
Kinematik Viskozite	mm ² /s	1.9–6.0	1.9–6.0	3.5–5.0	3.5–5.0	3.5–5.0	3.5–5.0
Parlama Noktası	°C	130°C		100°C		120°C	

Biyodizel ve dizel-biyodizel karışım yakıtlarının kullanımı, emisyonlar açısından bakıldığında, CO, PM, SO_x ve CH₄ gibi kirletici maddeler ile toksik PAH (poliaromatik hidrokarbonlar) ve nPAH (nitratlı PAH) emisyonlarında azalmaya neden olurken NO_x, HCl ve HC emisyonlarında artış gözlemlenmektedir. Biyodizel, biyolojik karbon döngüsü içinde fotosentez yoluyla karbondioksiti dönüştürerek karbon döngüsünü hızlandırır ve sera etkisini arttırıcı yönde bir etkiye sahip değildir. HCl emisyonu, dizel ve biyodizel için oldukça düşüktür ve kömür emisyonlarından çok daha düşüktür, bu da çevre için asit tehlikesi oluşturmadığını göstermektedir (Özgün, 2014).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu çalışmada, atık yağdan üretilen biyodizel, metanol kullanılarak üretilmiş ve farklı oranlarda petrol bazlı dizel (PBD) yakıtla karıştırılmıştır. Ayrıca magnezyum oksit (MgO) nanopartiküllerin 20 ppm'den 50 ppm'ye kadar eklenmiştir. Test yakıtları ASTM standartlarına uygun bulunmuştur. 30 ppm MgO nanopartikül konsantrasyonunun, yakıtların soğuk performansını iyileştirdiği görülmüştür. Sonuçlar, B100W30A, B20W30A ve B10W30A yakıtlarının B100, B20 ve B10'a göre sırasıyla %28.2, %9.48 ve %2.45 daha yüksek fren spesifik yakıt tüketimine sahip olduğunu göstermiştir. PBD, düşük BSFC gösterirken, diğer test yakıtlarına kıyasla daha yüksek fren gücü ve fren termal verimliliği sergilemiştir. B100W30A, B20W30A ve B10W30A yakıtlarının BTE ve BP'si, ortalama olarak B100, B20 ve B10'uninkinden sırasıyla %4.57 ve %1.17 daha yüksektir. Genel olarak MgO nanopartikül içeren yakıtlar, B100, B20, B10 ve PBD'ye kıyasla daha düşük emisyonlar göstermiştir. Nanopartikül içeren yakıtların yanma analizi, diğer test yakıtlarından daha iyi ve PBD ile kıyaslanabilir niteliktedir (Ranjan ve ark., 2018).

Bu araştırma, atık yağdan (WCOSD) MgO katalizörü kullanarak katalitik çatlama yöntemiyle biyodizel üretmeye odaklanmaktadır. Test motorunda WCOSD ve geleneksel dizel (CD) kullanıldığında motor işletme özelliklerini karşılaştırmaktadır. Sonuçlar, WCOSD ile çalışan test motorunun fren gücünün ve geleneksel dizel ile benzer olduğunu göstermektedir. Ancak WCOSD kullanıldığında motorun yakıt tüketiminin bazı koşullarda hafif bir artış gösterdiği görülmüştür. Azot oksit emisyonları WCOSD ile çalışan test motorunda tüm koşullarda geleneksel dizelden daha yüksektir. Hidrokarbon emisyonları ise WCOSD ile çalışan motorun HC emisyonunun ortalama olarak %26.3 azaldığını göstermektedir. WCOSD kullanıldığında duman emisyonu CD'ye göre ortalama %17 daha düşüktür. Ancak karbon monoksit emisyonları düşük ve orta yüklerde daha düşükken, tam yüklerde daha yüksektir. Bu sonuçlar, yeni biyodizelin ticari biyodizel özelliklerine sahip olduğunu ve dizel motorlarda yakıt olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Nguyen ve ark., 2020).

Euro IV dizel motoru üzerinde yapılan deneysel bir çalışmada, saf biyodizel ve biyodizel karışım yakıtlarının performans, yanma ve emisyon özellikleri değerlendirildi. Test edilen her yakıt için performans ve emisyonlar, üç farklı yük altında (25%, 50% ve 100% yük) dört farklı motor hızında (800 dev/dak, 1200 dev/dak, 2400 dev/dak ve 3600 dev/dak) ölçüldü. Sonuçlar, biyodizel/karışım yakıtlarının özellikle düşük motor hızı ve

kısmi yük koşullarında daha yüksek bir fren spesifik yakıt tüketimine neden olduğunu gösterdi. Biyodizel, %50 ve %100 yükte dizel ile karşılaştırıldığında hafifçe daha yüksek fren termal verimliliğe sahipti, ancak %25 yükte ters bir eğilim gözlemlendi. Yanma özellikleri açısından, biyodizel için biraz kısa ateşleme gecikmesi ve daha düşük zirve ısı salınım hızı tespit edildi. Emisyonlar açısından, biyodizel kullanımıyla HC ve NO_x gibi bazı emisyonlarda hafif bir azalma gözlemlendi, ancak düşük motor hızında ters bir eğilim ortaya çıktı (An ve ark., 2013).

Bu çalışmada, geleneksel fosil dizel, atık yağdan üretilen biyodizel ile farklı oranlarda karıştırılan biyodizel, alkol katkılı biyodizel dizel ve nano partiküllü biyodizel yakıtları kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, atık yağ biyodizel karışımlarının dizel ile benzer özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Nano partikülleri kullanıldığında, fren termal veriminin fosil dizel ile karşılaştırıldığında arttığı görülmüştür. B10A1%, en yüksek fren termal verime, en düşük fren spesifik yakıt tüketimine ve diğer test edilen yakıtlardan daha düşük enerji tüketimine sahip olarak öne çıkmaktadır. Tüm test edilen yakıtlar arasında en iyi performansı sergilemektedir. Fren termal verim, fren spesifik yakıt tüketimi ve birim enerji tüketimi değerleri sırasıyla 0.405 kg/kWh ve 17914.71 kJ/kg olarak bulunmuştur. Nano yakıt için ise bu değerler sırasıyla 0.491 kg/kWh ve 21293.3 kJ/kg olarak bulunmuştur ve bunlar dizel değerlerinden daha iyidir (Pradhan ve Singh, 2020).

Bu çalışma, atık yağın biyodizel üretimi için popüler bir kaynak olduğunu ve dizel yakıtının bir alternatifi olarak geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Atık yağ biyodizeli ile dizel, kerosen ve etanol karışımlarının yakıt özelliklerini değerlendirmek ve motor performansına etkilerini incelemek amacıyla yapılmıştır. Araştırma sonuçları, atık yağ biyodizeli ile etanol ve kerosen karışımının soğuk akış özelliklerinin, atık yağ biyodizeli ve dizel karışımlarından daha iyi olduğunu göstermektedir. Karışımların bir dizel motorda test edilmesi, atık yağ biyodizeli ile etanol ve kerosen karışımının Fren Spesifik Yakıt Tüketimi'nin, atık yağ biyodizeli ve dizel karışımlarına kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, etanol ve kerosenin daha düşük ısıl değerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca atık yağ biyodizeli ile dizel karışımının fren termal verimliliğinin, atık yağ biyodizeli ile etanol ve kerosen karışımlarına kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, atık yağ biyodizeli ile etanol ve kerosen karışımının soğuk iklim koşulları için önerilebileceğini, WCB20'nin ise dizel alternatifi olarak geliştirilebileceğini göstermektedir. (Dwivedi ve ark., 2018)

Bu araştırmada, atık yağ biyodizeline 300 ve 400 ppm dozlarında *tert-butilhidrokinon* (TBHQ) ve *difenilamin* (DPA) antioksidanlarının performans ve emisyon parametrelerini değerlendirmek için kullanıldı. Deneme sonuçları kullanılarak fren termal verim (BTE), fren spesifik enerji tüketimi (BSEC), azot oksit emisyonu (NO_x), karbon monoksit emisyonu (CO), hidrojen emisyonu (HC) ve duman yoğunluğunu tahmin etmek için yapay sinir ağı modeli geliştirildi. Tam yükte, antioksidan içeren karışımların fren termal verimini artırdığı ve fren spesifik enerji tüketimini azalttığı görüldü. NO_x emisyonu, 300-doz DPA karışımı, 300-doz TBHQ karışımı, 400 doz TBHQ karışımı ve 400 doz DPA antioksidan karışımında antioksidan içermeyen karışıma kıyasla sırasıyla %2.32, %5.24, %7.35 ve %12.44 azaldı. Yapay sinir ağı modelinin kullanılması, performans ve emisyon tahminini hızlandırabilir ve çalışma maliyetini düşürebilir (Kumar ve ark., 2023).

Bu araştırma, atık kıztırma yağından üretilen biyodizelin, tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir motorda kullanılmasını ve bu yakıtın performans, yanma ve emisyon özelliklerini petrol kökenli dizel yakıtı, pamuk yağı biyodizeli ve aspir yağı biyodizeli ile karışılaştırmayı amaçlamıştır. Deney sonuçları, atık kıztırma yağı biyodizelinin motor performansını düşürse de diğer biyodizel türlerine kıyasla daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Pamuk ve aspir yağı biyodizeli ile benzer özelliklere sahip olması nedeniyle atık kıztırma yağı biyodizelinin emisyon değerlerinde de önemli iyileşmeler sağladığı belirlenmiştir. Yanma zellikleri incelendiğinde, atık kıztırma yağı biyodizelinin maksimum silindir basıncını elde ettiği tespit edilmiştir, bu da diğer biyodizellere göre daha iyi performans göstermesine neden olmuştur. Bu alışma, biyodizel hammaddesi olarak atık kıztırma yağının tercih edilmesi durumunda, diğer biyodizel türleriyle benzer sonuçlar elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. (İlker ve ark., 2021)

Bu çalışmada atık yağdan biyodizel, transesterifikasyon süreci kullanılarak üretilmiştir. Atık yağ biyodizel ve dizel yakıtın karışımları farklı oranlarda hazırlanarak deneysel olarak bir dizel motorda kullanılarak yanma performans ve egzoz emisyonları üzerinde çalışılmıştır. Atık yağ biyodizel karışımları, dizel yakıtı yakın ASTM standartlarına sahip fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Termal verimlerde dizel yakıtı göre düşük değerler elde edilmiştir. Biyodizel karışımlarının zgl yakıt tüketimi dizel yakıttan yüksektir. Egzoz gazı sıcaklıkları biyodizel karışımlarında daha yüksektir. CO₂ emisyonları biyodizel karışımlarında daha yüksektir. Ancak CO, duman yoğunluğu

ve HC emisyonları biyodizel karışımlarında dizel yakıta göre daha düşüktür. NO_x emisyonları ise biyodizel karışımlarında daha yüksektir. (Abed ve ark., 2018)

Bu çalışma, düşük maliyetli ve etkili bir alternatif yakıt geliştirmeyi amaçlamaktadır. Atık yağdan biyodizel, alüminyum oksit nanoparçacıkları (AONP) ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüpleri (MWCNT) ile zenginleştirilmiş bir nano-yakıt üretimini içermektedir. Biyodizel, NaOH katalizörü ile piroliz süreci kullanılarak elde edilmiştir. Ultrasonik cihaz kullanılarak biyodizel ve nano-yakıt hazırlanmıştır. Kontrol grupları saf dizel (100%) ve Atık Yağdan üretilen B20 biyodizel içermektedir. Deney grupları ise nano-yakıtları içerir. Bunlar; BWCO/100 MWCNT, BWCO/100 AONP ve BWCO/50 AONP/50 MWCNT'dır. Biyodizel ve nano-yakıtların kimyasal ve fiziksel özellikleri belirlenmiş ve sonrasında motor performansı, yanma karakteristikleri ve emisyonlar üzerinde deneysel testler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, BWCO/50 AONP + 50 MWCNT nano-yakıtının, saf dizelden daha yüksek fren termal verimlilik, silindir içi basınç, ısı salım hızı ve düşük emisyonlarla belirgin bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu çalışma, düşük maliyetli ve etkili bir alternatif yakıt olarak önerilen nano-yakıtın dizel motorlar için kullanılabilirliğini vurgulamaktadır (Sathish ve ark., 2023).

Bu araştırma kapsamında, atık yağlardan elde edilen biyodizelin, dört zamanlı, tek silindirli ve direkt enjeksiyonlu bir motorda alternatif yakıt olarak kullanılmasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Test motoru, sabit bir hızda ve farklı yükler altında hem dizel hem de saf biyodizel yakıtlarıyla test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, biyodizel kullanımıyla frenleme özgül yakıt tüketiminde %3'lük bir artış ve frenleme özgül enerji tüketiminde %5'lik bir azalma elde edilmiştir. Ayrıca NO_x, CO ve is emisyonlarında dizel yakıtına kıyasla sırasıyla %17, %33 ve %31 oranlarında bir azalma görülmüş, ancak HC emisyonunda %24'lük bir artış tespit edilmiştir (Aydın ve ark., 2017).

Bu çalışmada, %50 atık kızartma yağı biyodizeli ile %50 dizel yakıt karışımı (B50) ve saf atık kızartma yağı biyodizeli (B100) kullanılarak çalışan bir direkt enjeksiyonlu dizel motorun yanma süreci, motor performansı ve egzoz emisyonları deneysel olarak incelenmiştir. Deney motoru, 1750 – 3000 d/d aralığında çalıştırılmıştır ve maksimum tork devri olan 2200 d/d'de 3.75, 7.5, 11.25 ve 15 Nm motor yüklerinde test edilmiştir. Yanma ve motor performans parametrelerinin değişimleri arasında silindir içi basınç, ısı dağılımı, yanma süresi, motor momenti ve özgül yakıt tüketimi gibi faktörler incelenmiştir. Ayrıca egzoz emisyonları karşılaştırmalı olarak

değerlendirilmiştir. Her iki yakıt karışımı ve saf biyodizel kullanımıyla tüm motor yüklerinde silindir içi basınç artışı gözlemlenmiştir. Maksimum motor momentinin elde edildiği devirde, B50 ve B100 yakıtlarının kullanımıyla motor momentinde sırasıyla %1.63 ve % 3.25 azalma meydana gelmiştir. Aynı deney koşullarında özgül yakıt tüketimi ise sırasıyla % 7.63 ve %15.39 artmıştır. Biyodizel yakıtların kullanımıyla oksijen içeriği arttığından yanma süresi kısılırken, tam yük altında B50 ve B100 yakıtları kullanıldığında CO emisyonlarında sırasıyla % 24.4 ve % 39.37 oranında azalma olduğu görülmüştür. Aynı koşullarda NO_x emisyonları ise sırasıyla % 29.4 ve % 50.45 artmıştır. B50 ve B100 yakıtlarının oksijen içeriği, is emisyonlarını sırasıyla % 58.8 ve % 69.25 oranında azaltmıştır. Sonuç olarak B50 yakıtının, dizel motorda herhangi bir değişiklik yapmadan kolayca kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Calam, 2020).

Bu çalışma, atık yağ biyodizelini benzin ve kerosenle karıştırmanın dizel motor performansı, yanma karakteristikleri ve emisyonları üzerindeki etkilerini incelemektedir. Atık yağ biyodizeli transesterifikasyon süreci ile elde edilmiş ve kerosen ile benzin karışımları, biyodizelin içine %5 ve %10 oranlarında eklenmiştir. Testler, çeşitli yüklerde çalışan bir dizel motorunda gerçekleştirilmiştir. Kerosen karışımları için tepe silindir basınçlarında %2 ve %1.5'lik bir azalma, benzin karışımları için ise %3.5 ve %3'lük bir azalma gözlemlenmiştir. Tam yükte dizel yakıt için termal verimlilik %18.5 iken, benzin ve kerosen karışımlarında sırasıyla %9.0'dan %2.0'ye kadar azalma gözlemlenmiştir. CO, HC ve duman emisyonları, benzin ve kerosen karışımlarında düşerken NO_x emisyonları artmıştır. Sonuç olarak atık yağ biyodizeli, benzin veya kerosenle karıştırıldığında performans parametrelerinde iyileştirmeler ve emisyonlarda azalmalar sağlamaktadır (Gad ve Ismail, 2021).

Bu çalışma, bir dizel motorunda biodizel, atık yağ ve dizel yakıt kombinasyonlarının deşarj karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. DF80-WCOB20, DF70-WCOB30, DF60-WCOB40 ve DF50-WCOB50 adlı kombinasyonlarla parametrik bir araştırma yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, atık yağ biyodizeli eklemenin motor verimini azalttığını, özgül enerji tüketimini, karbon monoksit ve hidrokarbon emisyonlarını artırdığını göstermiştir. DF80-WCOB20'nin diğer kombinasyonlara göre daha yüksek bremse termal verimlilik sağladığı belirlenmiştir. Ancak atık yağ biyodizeli eklemenin azot oksit emisyonlarını artırdığı görülmüştür (Rajak ve ark., 2022).

Bu çalışma, hidrodinamik kavitasyon yöntemi ile üretilen atık yağdan elde edilen biyodizel karışımlarının (%10, %30 ve %50) performans ve emisyon karakteristiklerini incelemektedir. Bu karışımlar dizel yakıtı ile karşılaştırılmış ve EN 14214 ve ASTM D

6751 standartlarında olduğu belirlenmiştir. Testler farklı motor hızlarında, 1000 ila 2000 dev/dak arasında tam gaz yükü altında bir in-line dikey altı silindirli dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Motor performans testleri sırasında biyodizel karışımları, dizel yakıtı göre daha yüksek bremse özgül yakıt tüketimi (2.1-9.0%) ve egzoz gazı sıcaklığı (1.0-6.8%) gösterirken daha düşük bremse gücü (1.6-6.7%), tork (0.6-5.2%) ve bremse termal verimlilik (1.9-8.4%) sergilemiştir. Motor emisyonları, karbon dioksit (8.7-38.5%) ve azot oksit (4.7-19.0%) emisyonlarında artış göstermiş, ancak şaşırtıcı bir şekilde karbon monoksit miktarını dizel yakıtı göre düşürmüştür (%3.3-26.3%). Daha yüksek karbon dioksit emisyonlarına rağmen, biyodizel kullanımı karbon dioksitin yaşam döngüsündeki dolaşımını önemli ölçüde azaltmıştır. Hidrodinamik kavitasyon ile üretilen atık yağ bazlı biyodizel, yüksek üretim değerlerine ölçeklenebilir, enerji verimli, zaman tasarruflu ve çevre dostu görünmektedir, bu da endüstriyel üretim için uygun bir yakıt yapmaktadır. Ayrıca atık yağ bazlı biyodizel, motor modifikasyonları olmadan kullanılabilir (Chuah ve ark., 2015).

Bu çalışma, atık yağdan elde edilen nötrale edilmiş atık yağın ve atık yağın metil esteri (WCOME) ile bu esterin %20 ve %2 oranlarında Euro dizel ile karışımından elde edilen biyodizel karışımlarının performansını incelemektedir. Yapılan deneylerde, elde edilen yakıtların fiziksel özellikleri belirlenmiş ve bir dizel motorunda çeşitli performans parametreleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, WCOME ve karışım yakıtlarının standart dizel yakıt ile benzer fiziksel özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Ancak karışım yakıtlarının bazı performans parametrelerinde dizel yakıtı göre değişikliklere neden olduğu görülmüştür. Özellikle, karışım yakıtlarının belirli devir aralıklarında daha yüksek özgül yakıt tüketimi, egzoz gazı sıcaklığı ve daha düşük fren gücü, tork ve fren termal verimliliği değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma, atık yağ kullanılarak elde edilen biyodizel ve karışım yakıtlarının bir dizel motor performansına etkilerini değerlendirmekte olup bu biyoyakıtların dizel yakıtlara alternatif olarak kullanılabilirliğini incelemektedir (Özgün, 2014).

Bu çalışmada, atık yağların transesterifikasyon işlemiyle biyodizel yakıt üretilmiştir. Üretilen biyodizelin fiziksel ve kimyasal özellikleri, %5 etanol (BE5), %10 etanol (BE10) ve %15 etanol (BE15) ilavesiyle belirlenmiştir. Bu biyodizel-etanol karışımları, bir dizel motorlu araçta farklı motor hızlarında test edilerek performans ve emisyon sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlar, dizel yakıtına göre karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir (Gündüz, 2017).

Bu araştırmada, atık bitkisel yağlardan elde edilen biyodizel ile standart dizel yakıtın karışımlarının tek silindirli bir motorun egzoz ve gürültü emisyonları üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Yakıt karışımları içerisinde bulunan biyodizelin, CO₂, CO, HC ve gürültü emisyonlarını azaltıcı etkisinin olduğu gözlemlenirken, aynı zamanda NO_x emisyonlarını artırıcı bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir (Sarıdemir, 2016).

Bu araştırmada, standart dizel yakıt ile biyodizel karışımlarının tek silindirli bir dizel motorun performansı, egzoz emisyonları, motor gürültüsü ve titreşimi üzerindeki etkileri farklı hızlarda ve tam yükte deneysel olarak değerlendirilmiştir. Atık bitkisel yağ metil esteri (B100) oranının artmasıyla birlikte, motor gücünde ve torkunda azalma, özgül yakıt tüketiminde artış, CO, CO₂ ve HC emisyonlarında azalma, NO_x emisyonlarında ise artış gözlemlenmiştir. B50 yakıt karışımı ile elde edilen minimum motor titreşim genliği belirlenmiştir. Genellikle, B100 ve tüm yakıt karışımları ile silindir içi basınç artış oranına bağlı olarak daha fazla motor yanma sonu gürültüsü elde edilmiştir. Bu bulgular, atık bitkisel yağ metil esterinin standart dizel yakıtla benzer özelliklere sahip olduğunu ve alternatif bir dizel yakıt olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Alçelik, 2017).

Bu araştırmada, dizel motorlarda biyoetanol ve dizel yakıtı karışımlarının kullanılabilirliği deneysel olarak incelenmiştir. Testler, sabit devir ve değişen yük koşullarında üç silindirli, direkt püskürtmeli dizel motorlarında gerçekleştirilmiştir. Motorun yüklenmesi için bir jeneratör kullanılmıştır. Ayrıca atık kızartma yağlarından elde edilen biyodizel ve bu biyodizelin dizel yakıt karışımları ile dizel-biyodizel-biyoetanol karışımları da test edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, kullanılan alternatif yakıt karışımlarının yakıt tüketimini artırdığını, ancak NO_x, CO ve duman emisyonlarının azaldığını göstermiştir. Özellikle yüksek biyoetanol oranları içeren yakıtlarda duman emisyonlarında belirgin bir azalma tespit edilmiştir (Ayaz, 2014).

Bu araştırmada, atık biyodizelin tek silindirli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli dizel motorda performans ve egzoz emisyonlarına olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Testler iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, motor farklı yüklerde ve sabit bir hızda (2800 dev/dak) dizel yakıtı, B50 (%50 dizel + %50 biyodizel) ve B100 biyodizel yakıtları ile test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, biyodizel kullanımının CO, HC ve is emisyonlarını önemli ölçüde azaltırken performansta belirgin bir kayıp yaşatmadığını göstermiştir. İkinci aşamada, motor farklı püskürtme basınçlarında (180, 200, 220, 240 bar) dizel yakıtı, B50 ve B100 biyodizel yakıtlarıyla tam yükte karşılaştırılmal olarak test edilmiştir. Optimal performans ve emisyon değerlerine ulaşmak için, B0 yakıtı için en uygun püskürtme basıncının 200 bar, B50 ve

B100 yakıtları için ise 220 bar olduğu belirlenmiştir. B100 yakıtının 220 bar püskürtme basıncında, dizel yakıta göre özgül yakıt tüketiminde yaklaşık %8 oranında bir artış gözlemlenmiştir. HC, CO ve is emisyonlarında belirgin bir azalma ve NO_x emisyonunda ise artış kaydedilmiştir. Ayrıca dizel yakıtına kıyasla HC, CO ve is emisyonlarında sırasıyla %28, %18 ve %18 oranlarında azalma, NO_x emisyonunda ise %22 artış gözlemlenmiştir. (Çat, 2012).

Bu araştırmada, atık yağ biyodizelinden elde edilen farklı karışımların içine *tert-butilhidrokinon* (TBHQ) ve *difenilamin* (DPA) antioksidanlarının eklenmesi incelenmiştir. Bu karışımların performans, yanma, ses ve emisyon özellikleri değerlendirilmiştir. Yapay sinir ağı (YSA) modeli kullanılarak deneysel sonuçlardan türetilen en iyi karışım belirlenmiş ve bu karışım için ANSYS Fluent kullanılarak yanma modellemesi yapılmıştır. Hem deneysel hem de simülasyon sonuçlarına göre, B20 karışımının test motoru için en uygun olduğu belirlenmiştir. Bu karışımın kullanımıyla karbonmonoksit (CO) ve hidrojen emisyonlarında %30'a kadar azalma, duman emisyonunda %14.08 azalma ve azot oksit (NO_x) emisyonlarında %16.46 artış elde edilmiştir. Ayrıca seçilen B20 karışımında NO_x emisyonlarını azaltmak amacıyla egzoz gazı geri dönüş oranlarının (EGR) etkisi incelenmiş ve %10 EGR oranının NO_x emisyonlarında %16.34'lük bir azalmaya yol açtığı tespit edilmiştir (Balasubramanian ve ark., 2021).

Bu makale, *Mamdani* tipi *Fuzzy Expert System* kullanarak atık ekmek biyoetanölü ile benzinin farklı oranlarında karıştırılmasıyla oluşturulan yakıt karışımlarının yanma parametreleri, motor performansı ve egzoz emisyon parametrelerinin tahmin edilmesine odaklanmaktadır. 55 farklı test koşulu altında gerçekleştirilen deneme sonuçlarına dayanarak atık ekmek biyoetanölü-benzin karışımları için yanma parametreleri %0.948-0.973 aralığında, motor performansı ve egzoz emisyon parametreleri %0.968-0.977 ve %0.955-0.991 aralığında korelasyon katsayıları ile tahmin edilebildi. Ayrıca şeker pancarı biyoetanölü-benzin karışımları için de benzer başarılar elde edildi. Bu sonuçlar, geliştirilen modelin maliyetli ve işgücü yoğun motor testlerini yüksek doğrulukla tahmin edebilecek bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Yasar ve ark., 2022).

Bu çalışma, balık yağı biodizeli kullanılarak içten yanmalı motor performansı, emisyonlar ve yanma özelliklerini tahmin etmek için bulanık mantık prensibinin bir uygulamasını açıklamaktadır. Deneyler, tek silindirli, sabit hızlı, doğrudan enjeksiyonlu bir dizel motor üzerinde değişen yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Fren termal verim, hidrokarbon, egzoz gazı sıcaklığı, azot oksitleri (NO_x), karbon monoksit, duman, karbon

dioksit, ateşleme gecikmesi, yanma gecikmesi ve maksimum basınç artışı gibi performans, emisyon ve yanma özellikleri değerlendirilmiştir. Motor performansı, farklı yakıt karışımları ve motor yük koşulları için egzoz gazı analiz cihazı, duman ölçer, piezoelektrik basınç transdüseri ve manivela açısı kodlayıcısı kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler kullanılarak çok girişli ve çok çıkışlı bir bulanık mantık modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, korelasyon katsayıları açısından yüksek (0.988-0.999) ve düşük ortalama karesel hata ile güvenilir tahminler üretmiştir, bu da sınırlı sayıda veri ile motor performans özelliklerini tahmin etmek için kullanışlı olduğunu göstermektedir (Ilangkumaran ve ark., 2015).

Bu makale, bir silindirli dizel motorunun performans, emisyon ve yanma özelliklerini tahmin etmek için kurallı *Mamdani* tipi Bulanık Uzman Sistemini kullanma üzerine odaklanmaktadır. Bu sistem, atık ekmek bioetanolünün benzinle karıştırılmasıyla oluşturulan yakıt karışımlarının P_{max} , HRR_{max} , ID, CD gibi yanma parametreleri; BTE, BSFC gibi motor performans parametreleri ve CO, CO₂, HC, NO_x gibi egzoz emisyon parametrelerini tahmin etmek amacıyla kullanılmıştır. Test motoru 11 farklı test yakıtıyla 5 farklı motor yükünde çalıştırılarak oluşturulan 55 test koşulu üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, ekmek atığı bioetanol-benzin karışımları için yanma parametreleri için %0.948-%0.973 aralığında korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Motor performansı ve egzoz emisyon parametreleri için ise korelasyon katsayıları sırasıyla %0.968-%0.977 ve %0.955-%0.991 aralığında bulunmuştur. Aynı şekilde, şeker pancarı bioetanol-benzin karışımları için elde edilen FES ile korelasyon katsayıları şu aralıklardadır: motor performans parametreleri için %0.967-%0.971, egzoz emisyon parametreleri için %0.955-%0.978 ve yanma parametreleri için %0.951-%0.964. Bu sonuçlar, geliştirilen modelin minimum çaba ve yüksek doğrulukla maliyetli ve işgücü yoğun motor testlerini tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermektedir (Dey ve ark., 2020).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Burada, tez aşamasında kullanılan ve verilerin elde edildiği deney yakıtları, deneylerin yapıldığı test motoru, egzoz emisyon cihazı ve bulanık mantık ile ilgili bilgi sunulmuştur.

3.1.1. Test motoru

Bu çalışmada kullanılan motor Antor marka ve tek silindirli bir dizel motordur. Motora ait olan teknik özellikler ise Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Test motorunun teknik özellikleri

Model	3LD510
Tipi	Dört zamanlı ve direkt enjeksiyonlu
Soğutma şekli	Su soğutmalı
Silindir sayısı	1
Silindir hacmi (cm ³)	510
Çap ve Strok (mm x mm)	85 X 90
Sıkıştırma oranı	17.5:1
Maks. motor devri (rpm)	3300
Maks. motor torku (Nm)	32.8
Maks. motor gücü (kW)	9

3.1.2. Test yakıtları

Test yakıtları olarak atık kızartma yağlarından elde edilen biyodizel ve bu biyodizelin dizel yakıt ile farklı oranlardaki karışımları kullanılmıştır. Biyodizel için kullanılan atık kızartma yağı, Türkiye'de Aksaray ve Erciyes Üniversiteleri'ndeki öğrenci yemekhanelerinden temin edilmiştir. Bu kafeteryalarda kızartma yağı sadece bitkisel ürünlerin pişirilmesinde kullanılmaktadır. Testlerde kullanılan yakıtlara ait karışım oranları Çizelge 3.2' de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Yakıt karışım oranları

YAKITLAR	EUD, % v/v	BİYODİZEL, % v/v
EUD	100	-
B3	97	3
B10	90	10
B15	85	15
B20	80	20
B50	50	50
B80	20	80
B100	-	100

Atık kızartma yağından biyodizel üretimi transesterifikasyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Üretim esnasında; alkol olarak %99 saflıkta metanol, katalizör olarak ise sodyum hidroksit kullanılmıştır. Biyodizel üretimi, Erciyes Üniversitesi Alternatif Yakıtlar Laboratuvarında yapılmıştır. Üretilen biyodizel ve petrol kökenli dizel yakıtına ait bazı yakıt özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Yakıt özellikleri EN ISO 121 (yoğunluk), EN ISO 310 (viskozite), ASTM D 24 (LHV) ve EN ISO 516 (setan sayısı) analiz yöntemleri ile belirlenmiştir. Karışım yakıtları 6 hafta boyunca gözlemlenmiş, bu süre içerisinde herhangi bir ayrışmaya rastlanmamıştır.

Çizelge 3.3. Kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri

ÖZELLİK	BİRİM	EUD	BİYODİZEL
Yoğunluk, 15°C'de	kg/m ³	834.5	885.6
Kinematik Viskozite, 40 °C'ta	mm ² /s	2.794	4.353
Alt Isıl Değer	Mj/kg	43.14	38.59
Setan Sayısı		55.2	55.7
Su içeriği	mg/kg	70	400
Asit sayısı	mgKOH/g	<0.1	0.15
Parlama noktası	°C	68.5	156.5
Oksijen İçeriği	%, m/m	-	10.32
Saflık	%	-	-

3.1.3. Egzoz emisyon cihazı

Test sürecinde egzoz emisyonlarının ölçümü için Bosch BEA 350 model emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. Duman emisyonu ölçümü için ise Bosch RTM 430 model

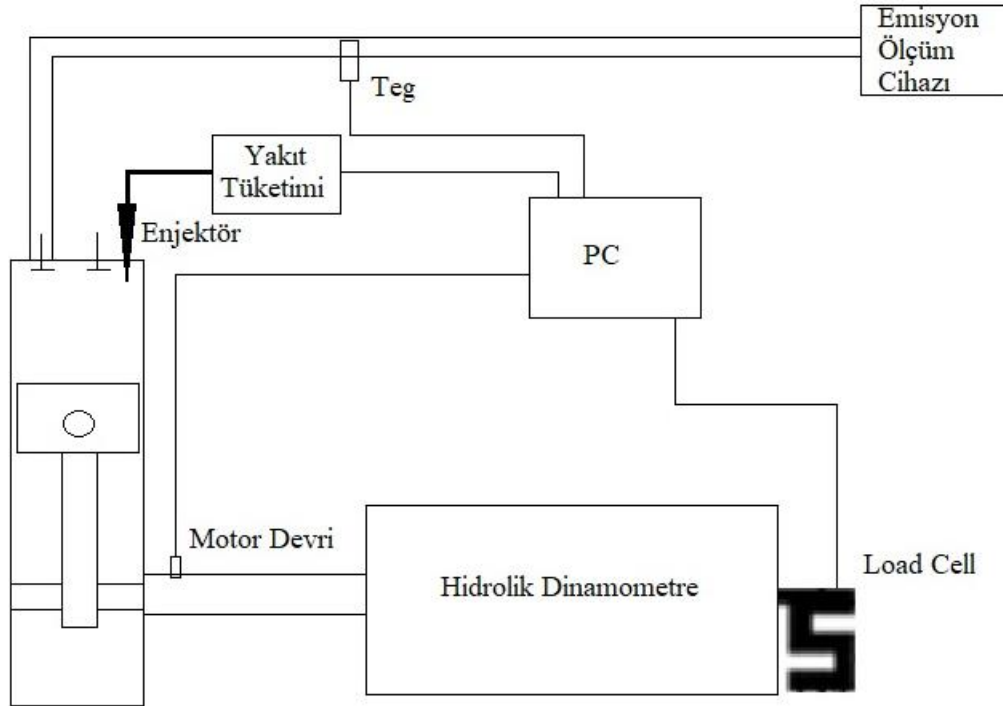
duman ölçüm kiti kullanılmıştır. HC, CO, CO₂, NO emisyonları ile duman koyuluğunu, egzoz gazının hacimsel debisine oranını (%) olacak şekilde ölçebilmektedir. Cihazın teknik özellikleri Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bosch BEA 350 cihazının teknik özellikleri

ÖLÇÜM	ÖLÇME ARALIĞI	HASSASIYET
CO, % v/v	0 – 10	0.001
CO ₂ , % v/v	0 – 18	0.01
HC, ppm	0 – 9999	1 ppm
NO, ppm	0 – 5000	1 ppm
Duman, %	0 – 100	0.1

3.1.3. Motor test ünite

Motor deneyleri, NF-150 model hidrolik bir test dinamometresinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler tam gaz kelebeği açıklığında, değişik motor yüklerinde her 200 d/d' da 1000-3000 d/d motor hızı aralığında yapılmıştır. Hem motor torku hem de yakıt tüketimi load cell yardımı ile hassas olarak ölçülmüştür. Şekil 3.1, motor test sistemini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 3.1. Motor test düzeneği şematik görünümü

3.1.3. Hesaplanan motor parametreleri

Hesaplamalarda kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

Motor gücü (P), bir motordan alınan gücün ölçüsüdür ve genellikle devir sayısı (n) ve motor torku (τ) yardımıyla hesaplanır.

$$P = \frac{2\pi n \tau}{60 \cdot 10^3} \quad (3.1)$$

Fren özgül yakıt tüketimi, bir motorun belirli bir güç elde etmek için ne kadar yakıt tükettiğini ifade eder ve aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir. Denklemde $\dot{m}_y$ (gr/s), yakıt debisini göstermektedir

$$f_{öyt} = \frac{\dot{m}_y \cdot 3600}{P} \quad (3.2)$$

Termik verim, elde edilen faydalı iş ile harcanan enerji arasındaki oran olarak tanımlanabilir, yani yakıttan elde edilen enerjinin ne kadarının faydalı işe dönüştüğünü gösterir. Aşağıdaki denklemle hesaplanır. H_u (kJ/kg), kullanılan yakıtın alt ısı değerini belirtmektedir.

$$\eta_t = \frac{P}{\dot{m}_y \cdot H_u} \quad (3.3)$$

Volümetrik verim, motorun silindirlerine giren hava ile teorik olarak silindire alınması gereken hava miktarı oranıdır. Aşağıda verilen denklemle hesaplanır.

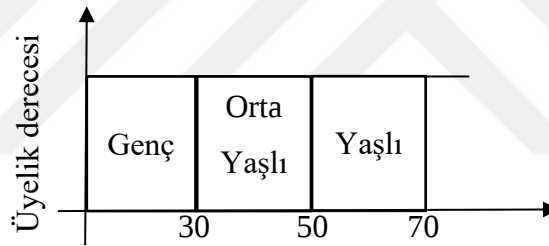
$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_h}{\rho_h V_h n} \quad (3.4)$$

Denklemdeki ρ_h (kg/m^3) silindire giren havanın yoğunluğunu, $\dot{m}_h$ (m^3/dk) silindire giren havanın debisini, V_h (m^3) kurs hacmini ve n (d/d)'de motor devrini belirtmektedir.

3.2. Bulanık Mantık

Bulanık Mantık ve bulanık küme teorisi, ilk olarak 1965 yılında Profesör Lotfi A. Zadeh tarafından öne sürüldüğünden beri birçok bilim insanının ilgisini çekmiş ve birçok uygulamada kullanılmıştır. Bulanık mantık, süreç denetimi, iletişim, işletme ve tıp gibi çeşitli alanlarda uygulanmıştır. Ancak bulanık mantık alanındaki çalışmalar genellikle denetim alanına odaklanmıştır (Hakan Akpolat, 2005; Koca ve ark., 2010).

Boolean mantığında, bir eleman ya bir kümenin bir üyesidir ya da değildir. Bu tür kümeler keskin kümeler olarak adlandırılır. Şekil 3.2'de bir keskin küme örneği gösterilmiştir. Verilen örnekte, sıfır ile otuz yaş arasındaki kişiler genç olarak tanımlanırken otuz ile elli yaş arasındaki kişiler orta yaşlı olarak ve elli yaşından büyük olan kişiler ise yaşlı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.2. Keskin küme örneği

Bulanık mantıkta ise "az sıcak", "sıcak", "çok sıcak" olacak şekilde kümeler tanımlanır. Ancak bir bulanık küme, bir elemanın bir kümeye ait olduğu dereceyi ifade eder. Bu nedenle bulanık kümenin karakteristik fonksiyonu $[0, 1]$ arasında bir değer alır. Bu değer, belirli bir elemanın o kümeye ne kadar uyduğunu gösterir. Bulanık kümeler, üyelik fonksiyonları ile temsil edilir. Bunlar tip-1 ve tip-2 olarak adlandırılır.

3.2.1. Tip-1 bulanık mantık

Tip-1 bulanık sistemler, genellikle belirsizlik içeren problemler için uygun kararlar alabilmek için kullanılır. Aşağıdaki gibi bazı durumlar için tip-1 bulanık sistemler kullanılabilir.

Karmaşık Sistemlerin Yönetimi: Büyük ve karmaşık sistemlerin modellenmesi ve yönetilmesi tip-1 bulanık sistemlerin gücünü ortaya koyar. Bu sistemler, karmaşık sistemlerin içindeki desenleri ve ilişkileri tanımlamak için kullanılabilir.

Esnek Karar Alma: Katı ve kesin kurallar yerine esnek karar alma yeteneği sunabilir.

Gerçek Zamanlı Uygulamalar: Hızlı ve gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilir. Gerçek zamanlı kontrol ve izleme gibi sistemlerde etkili bir şekilde kullanılabilirler.

Yapay Zeka ve Duygusal Zeka: İnsan benzeri düşünme ve karar verme yeteneklerini modellemek, duygusal zeka ve yapay zeka alanlarında karar süreçlerini simüle etmek için kullanılabilirler.

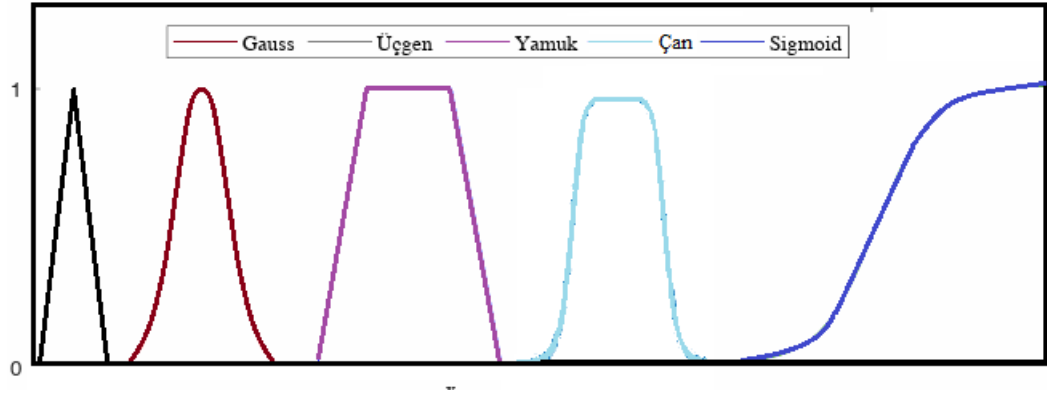
Belirsizlik Çözme: Belirsizlik içeren verilerle çalışırken geleneksel mantık sistemlerinden daha etkili bir şekilde başa çıkabilir. Gerçek dünya verilerinin genellikle kesin olmaması, bu sistemlerin avantajlı olmasını sağlar.

Tip-1 bulanık küme, A şu şekilde tanımlanır:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (3.5)$$

"x" terimi, giriş kümesi olan "X" in elemanlarını temsil eder. " $\mu_A(x)$ " ifadesi, her bir "x" elemanının bu kümedeki üyelik derecesini gösteren bir üyelik fonksiyonudur. Bu üyelik derecesi, 0 ile 1 arasında bir değer alır ve "x" elemanının kümedeki bulanıklık derecesini belirtir. Yani, her bir "x" elemanı, 0 ile 1 arasında bir üyelik derecesine sahip olur (Melin ve Castillo, 2013).

Tip-1 Bulanık Sistemlerde, üçgen (*Triangular*), yamuk (*Trapezoidal*), Gauss (*Gaussian*), çan (*Generalized bell*), kıvrımlı (*Sigmoidal*) üyelik fonksiyonları kullanılır. Şekilde belirtilen üyelik fonksiyonları gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Tip-1 bulanık sistemlerde yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları

3.2.1.1 Tip-1 bulanık kümelerde işlemler

Klasik kümelerde olduğu gibi bulanık kümelerde de kesişim, birleşim ve tamamlayan (değili) gibi işlemler yapılabilmektedir. Bu bulanık küme işlemlerini tanımlamadan önce, öncelikle hem sıradan hem de bulanık kümelerde önemli bir rol oynayan kapsama kavramını tanımlayacağız.

Kapsama: A bulanık kümesi, B bulanık kümesinin alt kümesi ise, B kümesi A kümesini kapsar ve tüm x değerleri için $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ ise matematiksel olarak denklem 3.6'daki gibi ifade edilir:

$$A \subseteq B = \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (3.6)$$

Birleşme: C kümesi, A ve B bulanık kümelerinin birleşimidir. $C = A \cup B$ şeklinde veya $C = A$ veya B olarak yazılan bulanık kümedir. Matematiksel olarak denklem 3.7'deki gibi ifade edilir:

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (3.7)$$

Kesişim: C kümesi, A ve B bulanık kümelerinin kesişimidir. $C = A \cap B$ şeklinde veya $C = A$ ve B olarak yazılan bulanık kümedir. Matematiksel olarak denklem 3.8'deki gibi ifade edilir:

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (3.8)$$

Tamlayan (değili): Bir A kümesinin tamlayanı A değil şeklinde tanımlanır. A kümesinin tamlayanı, yani değili matematiksel olarak denklem 3.9'da olduğu gibi ifade edilir:

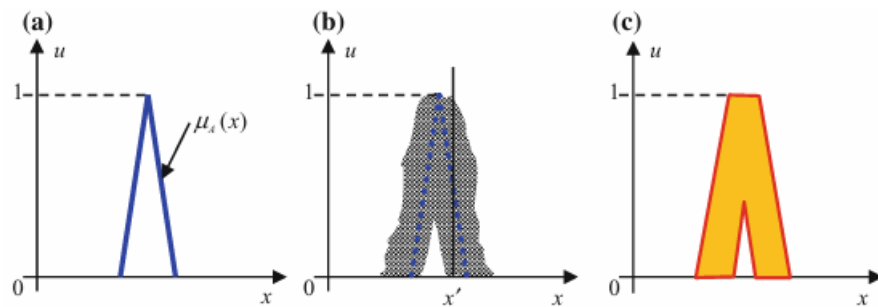
$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.9)$$

3.2.2. Tip-2 bulanık mantık

Tip-2 bulanık kümesi, üyelik fonksiyonları hakkında belirsizlik içeren bir kümedir. Tip-2 bulanık sistemlerde de kurallar "eğer-ise" şeklindedir. Bu sistemlerde kullanılan bilgi genellikle belirsizdir. Tip-1 bulanık kümelerinin üyelik fonksiyonları, bu tür belirsizlikleri doğrudan ele alamayabilir, bu nedenle tip-2 bulanık sistemler, üyelik fonksiyonunun belirsiz olduğu durumlarda faydalı olabilir. Tip-2 bulanık mantık, belirsizlikleri modelleyerek ve minimize ederek üstesinden gelir (Melin ve Castillo, 2013).

Tip-2 bulanık mantık sistemi, tip-1 bulanık küme sistemine ek olarak Zadeh tarafından geliştirilmiştir. Üyelik derecesi $[0, 1]$ aralığında belirlemede yaşanan problemleri çözmek için tip-2 bulanık küme kullanılması uygundur (Özek, 2010).

Tip-2 bulanık kümeler, üçüncü boyutta temsil edilen Belirsizlik Ayakizi (*Footprint of Uncertainty* - FOU) ile karakterize edilir. Bu nedenle tip-2 bulanık mantık daha başarılı bir belirsizlik yönetimi sağlar (Gonzalez ve ark., 2017).



Şekil 3.4. (a)Tip-1 ÜF (b) Bulanıklaştırılmış Tip-1 ÜF (c) Tip-2 ÜF (FOU-Belirsizliğin ayak izi)

Şekilde (a) tip-1 üyelik fonksiyonu üçgeninde noktaları kaydırarak bulanıklaştırılma yapıldığında, (b)'de x ekseninde ki x' çizgisinin bulanıklaştırılmış kısım ile kesiştiği bölgede üyelik fonksiyonu pek çok değer almaktadır. Bu değerlerin aynı ağırlığa sahip olmak zorunluluğu yoktur. Bu noktalara genlik dağılımı uygulanabilir. Bunu bütün $x \in X$ için uyguladığımızda, tip-2 üyelik fonksiyonu elde edilir (Öztürk ve ark., 2017). Tip-2 bulanık kümesi $\tilde{A}$ ile gösterilmektedir ve aşağıdaki eşitlikteki gibi tanımlanır.

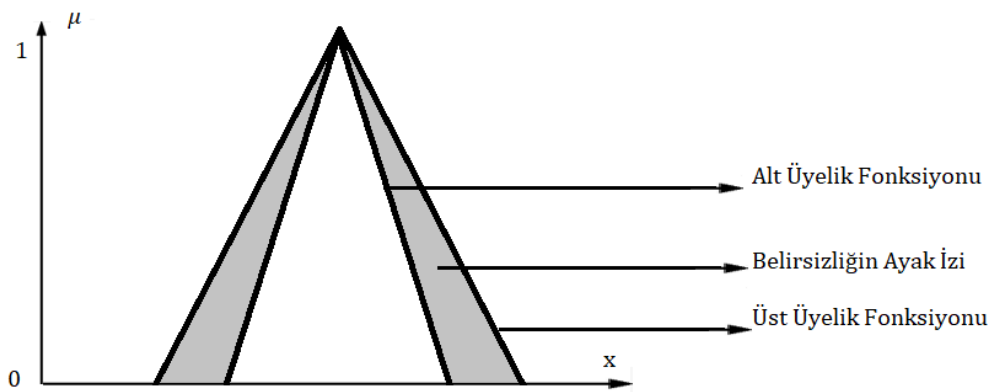
$$\tilde{A} = \{(x,u), \mu_{\tilde{A}}(x,u) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\} \quad (3.10)$$

Veya

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \frac{\mu_{\tilde{A}}(x,u)}{(x,u)} \quad (3.11)$$

Şeklinde de gösterilebilmektedir (Castillo ve ark., 2008). Denklemden $\int \int x$ ve u değerlerinin birleşimini belirtmektedir.

Şekilde üst üyelik fonksiyonu, alt üyelik fonksiyonu ve belirsizliğin ayak izi gösterilmektedir. Üst üyelik fonksiyonu ve alt üyelik fonksiyonu tip-1 bulanık fonksiyonlardır ve aralarında kalan kısım belirsizliğin ayak izidir. Belirsizlik ayak izi tip-2 bulanık kümenin üç boyutlu görüntüsünün iki boyutta ki izdüşümüdür (Devrim, 2019).



Şekil 3.5. Üçgen aralık tip-2 bulanık küme örneği

Tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanının üst ve alt sınırlarını belirten tip-1 üyelik fonksiyonlarına $\mu_{\tilde{A}}^U(x)$ ve $\mu_{\tilde{A}}^L(x)$ adı verilebilir ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Mendel, 2017).

$$\tilde{A} = \{ \mu_{\tilde{A}}^U(x), \mu_{\tilde{A}}^L(x) \mid x \in X \} \quad (3.12)$$

3.2.2.1 Tip-2 bulanık kümelerde işlemler

Genel tip-2 bulanık mantık birleşim, kesişim ve tümleyen işlemleri için $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ tip-2 bulanık kümeleri denklem 3.13 ve denklem 3.14’te verilmiştir.

$$\tilde{A} = \int_x \mu_{\tilde{A}}(x) / x = \int_x [\int_{J_x^u} f_x(u) / u] / x \quad J_x^u \subseteq [0,1] \quad (3.13)$$

$$\tilde{B} = \int_x \mu_{\tilde{B}}(x) / x = \int_x [\int_{J_x^w} g_x(w) / w] / x \quad J_x^w \subseteq [0,1] \quad (3.14)$$

Birleşim; $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ tip-2 kümelerinin birleşimi, bunlardan farklı bir tip-2 kümesi oluşturur.

$$\mu_{(\tilde{A} \cup \tilde{B})} = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} f_x(u) \star g_x(w) / v \equiv \mu_{\tilde{A}}(x) \sqcup \mu_{\tilde{B}}(x) \quad x \in X \quad (3.15)$$

Denklemden $v \equiv u \vee w$ ‘dir, burada “ $\vee$ ” maksimumu gösterir, “ $\sqcup$ ” birleşme işlemini, “ $\star$ ” minimum veya çarpmayı, $\int \int J_x^u \times J_x^w$ ’nin birleşimini gösterir.

Kesişim; $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ tip-2 kümelerinin birleşimi, yine bunlardan farklı bir tip-2 kümesi oluşturur.

$$\mu_{(\tilde{A} \cap \tilde{B})} = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} f_x(u) \star g_x(w) / v \equiv \mu_{\tilde{A}}(x) \sqcap \mu_{\tilde{B}}(x) \quad x \in X \quad (3.16)$$

Denklemden $v \equiv u \wedge w$ ‘dir ve “ $\sqcap$ ” buluşma işlemini göstermektedir.

Tümleyeni; $\tilde{A}$ tip-2 bulanık kümesinin tümleyeni, farklı bir tip-2 bulanık kümedir.

$$\mu_{\tilde{A}}^-(x) = \int_{u \in J_x^u} f_x(u) / 1 - u \equiv \neg \mu_{\tilde{A}}^+(x) \quad x \in X \quad (3.17)$$

Denklemden “ $\neg$ ” olumsuzluk işlemini göstermektedir.

3.2.2.2 Tip-2 bulanık sistemler

Tip-2 bulanık mantık sistemlerinde, tip-1 bulanık mantık sistemlerinde olduğu gibi,

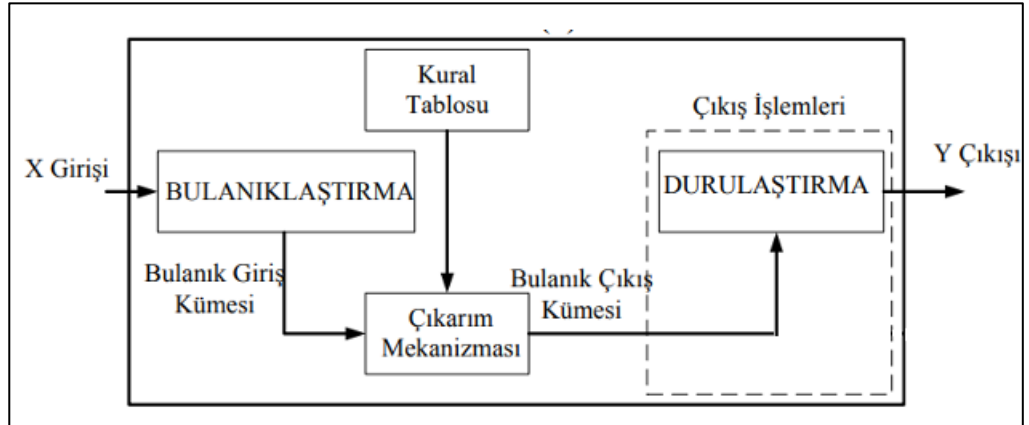
Bulanıklaştırma,

Kural tablosu,

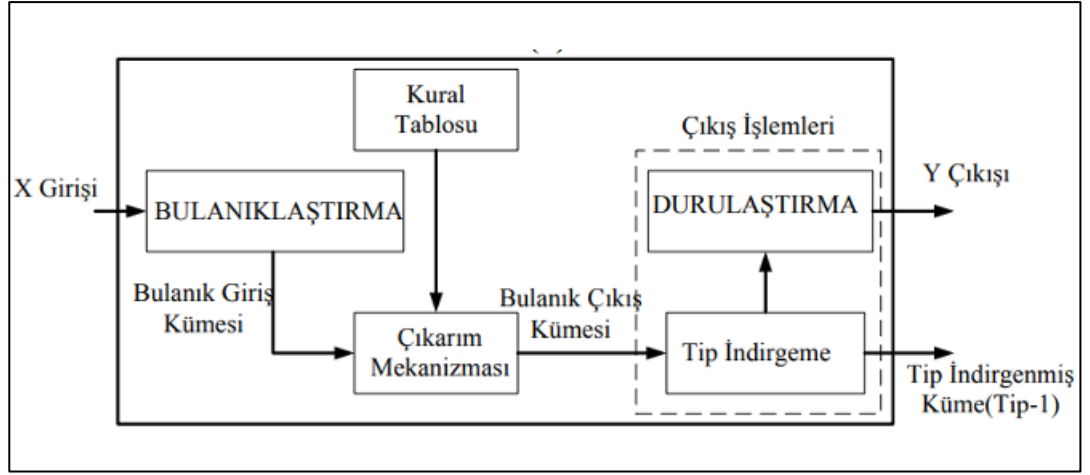
Çıkarım mekanizması,

Durulaştırma,

kısımları içermektedir. Tip-1’den farklı olarak tip-2 bulanık mantık sistemlerinde tip indirgeme işlemi vardır. Burada tip-2 bulanık kümeler tip-1 bulanık kümeye dönüştürülür. Şekil 3.6’da tip-1 bulanık mantık sistemi çalışma prensibi ve şekil 3.7’de tip-2 bulanık mantık sistemi çalışma prensibi verilmiştir. Şekil 3.6’da tip-1 bulanık çıkış kümesinden sonra durulaştırma işlemi yapıldığı görülmektedir. Şekil 3.7’de ise tip-2 bulanık çıkış kümesinden sonra tip indirgeme işlemi yapılmakta, tip-1 bulanık küme haline geldikten sonra durulaştırma işlemi yapıldığı görülmektedir (Makinist, 2013).



Şekil 3.6. Tip-1 bulanık mantık sistemi çalışma prensibi



Şekil 3.7. Tip-2 bulanık mantık sistemi çalışma prensibi

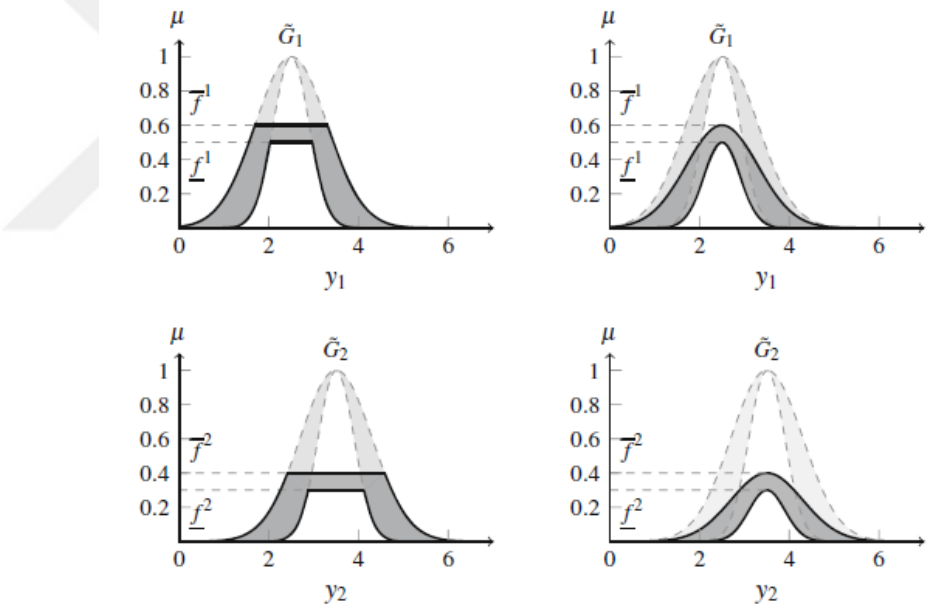
Bulanıklaştırma; Tip-1 ile tip 2 bulandırıcı arasında işlem olarak fark yoktur diyebiliriz. Tip-1 bulanık mantık sistemlerinde olduğu gibi tip-2 bulanık mantık sistemlerinde bulanıklaştırmanın en basit yolu, bir net giriş değerini bir bulanık kümeye uyarlamaktır. Bu işlem doğrudan sistemin sonuçlarını etkileyebileceği için alt ve üst sınır aralıklarının ve değer aralıklarının sisteme uygun şekilde tasarlanmış olması gereklidir. Bulanıklaştırma işlemi sözel ifade edilen verilerin belirli bir üyelik derecesi ile üyelik fonksiyonlarına uyarlanması işlemlerini kapsar.

Kural tabanı ve çıkarım işlemi; bulanık mantık, insan davranışlarını mekanizmalara uyarlayarak karar verici denetleyici sistemler oluşturmayı amaçlar. İnsanların aksine makineler bu deneyimleri yaşayarak değil, öğretildiği takdirde kazanır. Bu öğretim işlemi, "Kural Kümesi" aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu kurallar sayesinde, canlıların çıkarım veya karar verme şekli sistemlere uygulanır. Kurallar, sistemden elde edilen veriler doğrultusunda veya bir uzmanın bilgi ve deneyimine dayanarak belirlendiği için sistemden sisteme farklılık gösterebilir. Bu nedenle belirli bir kural yazma yöntemi yoktur. Tip-1 ve tip-2 bulanık mantık denetleyicilerinde kural oluşturma işlemi "EĞER-İSE" yapısı kullanılarak yapılır. Sistemdeki üyelik fonksiyonlarının sayısına bağlı olarak kural sayısı belirlenir. "EĞER-İSE" yapısında "Ve", "Veya" ya da "Değil" bağlaçları seçimi, sistemden sisteme değişiklik gösterebilir ve bu seçim kuralları oluşturanlar tarafından yapılır. Tip-2 bulanık mantık sistem kuralı aşağıdaki gibi temsil edilir.

$$R^i = \text{If } x_1 \text{ is } \tilde{F}_1^i \text{ and } \dots \dots \text{and } x_j \text{ is } \tilde{F}_j^i, \text{ Then } y^i \text{ is } \tilde{G}^i \quad (3.18)$$

Denklemden R^i , i'ninci bulanık kuralını temsil eder. $\tilde{F}_j^i$ $\tilde{G}^i$ ise aralıklı tip-2 bulanık kümelerle karakterize edilen dilsel terimlerdir. $i=\{1,\dots,M\}$ M, kural sayısını, $j=\{1,\dots,N\}$ N, girişlerin sayısını ifade eder. x_j , bulanık mantık sisteminin girdileri ve y^i , kuralın çıktısıdır (Antão, 2017).

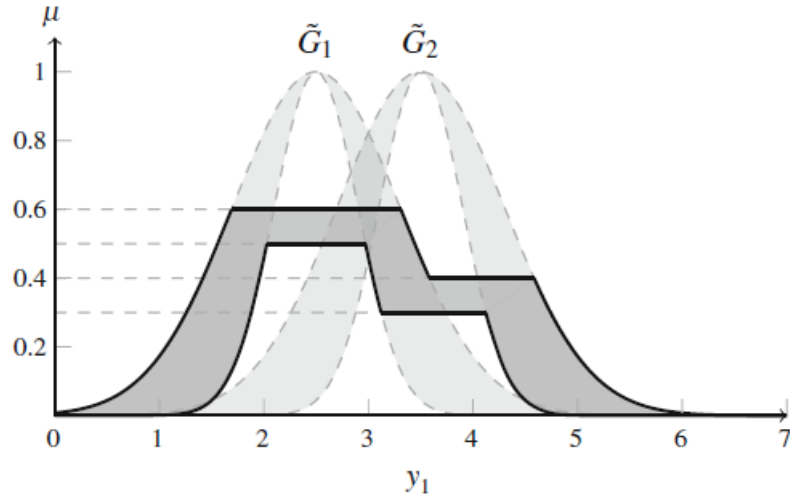
En popüler iki çıkarım yöntemi olan *Mamdani* ve *Takagi-Sugeno* çıkarım mekanizmalarından *Mamdani* çıkarım yöntemleri, t norm operatörü ile tip-2 bulanık kümelerde doğrudan kullanılabilir. Şekil 3.8' de görüldüğü üzere üst ve alt sınırları ayrı ayrı dikkate alınarak gerçekleştirilir. Çıkarım süreci, tüm tetiklenen bulanık kümelerin çıktılarının birleştirilmesiyle belirlenen bir bulanık küme oluşturur. Tip-1 bulanık mantık sisteminde olduğu gibi her kuralın katkısı, örtüşen bulanık kümelerin maksimum değerini kullanarak birleştirilebilir; bu durum Şekil 3.9 'da gösterilmiştir. Bu işlemin ardından net bir çıktı elde etmek için öncelikle bir indirgeme algoritması uygulanması gerekmektedir (Antão, 2017).



a) Minimum t-norm kullanılarak tetiklenen çıkış kümeleri

b) Çarpım t-normu kullanılarak tetiklenen çıkış kümeleri

Şekil 3.8. Tip-2 kullanarak mamdani çıkarım işlemleri



Şekil 3.9. Mamdani minimum çıkarım yöntemini kullandıktan sonra tip-2 bulanık kümelerin sonuçlarının birleştirme işlemi

Tip indirgeyici; tip-1 bulanık mantık sistemlerinde bulunmayan ve tip-2 bulanık mantıkla birlikte ortaya çıkan önemli bir bileşen tip indirgeyicidir. Tip indirgeyici, tüm çıkış kümelerini bir araya getirip ağırlık merkezi işlemi gerçekleştirir. Bu işlemin sonunda bir tip-1 bulanık kümesi elde edilir ve bu kümeye "tipi indirgenmiş küme" denir. Bu şekilde, sistemdeki belirsizlik düzeyleri azaltılarak daha net ve kesin sonuçlar elde edilir. Tip indirgeyicinin kullanımı, tip-2 bulanık mantık sistemlerinde belirsizliği en aza indirerek daha sağlam ve güvenilir bir sistem oluşturmayı sağlar. Bu, özellikle karmaşık ve belirsiz verilerin işlendiği uygulamalarda önemli bir avantaj sunar.

Durulaştırma; tip indirgeyici yöntemlerinden birini uyguladıktan sonra, elde edilen aralıklı bulanık kümenin net bir sayıya dönüştürülmesi gerekir. Bu, bulanık mantık sistemi uygulama senaryolarının çoğuna uyum sağlaması için gereklidir. Bu işlem oldukça basittir ve netleştirilmiş değer, aralığın sol ve sağ uç noktalarının ortalaması hesaplanarak elde edilir:

$$y_{out} = \frac{y_r + y_1}{2} \quad (3.19)$$

Bu çalışma MATLAB programlama dilinde *Mamdani* Kural Tabanlı Bulanık Uzman Sistemi (FES) kullanılarak tasarlanmıştır. Geliştirilen sistemde, yakıt türü ve motor devri giriş olarak kullanılmış, tork, güç, özgül yakıt tüketimi, termik verim, volümetrik verim, CO, CO₂, HC, NO, Duman ve egzoz sıcaklığı (TEG) parametreleri

çıkış olarak kullanılmıştır. Yakıttaki biyodizel içeriği %0-100 arasında değişirken, motor devri değerleri 1000-3000 d/d arasında değişmektedir. Bulanık Uzman Sistemi'nde, üyelik fonksiyonlarının dağılımı üçgen olarak tasarlanmıştır. Üyelik fonksiyonları, yakıt türü için 1-8 arası numara atanmıştır. Dizel için (1), B3 (2), B10 (3), B15 (4), B20 (5), B50 (6), B80 (7), B100 (8). Motor devri için üyelik fonksiyonları ise 1-7 arası olarak ayarlanmıştır. 1000-1250 (1), 1000-1800 (2), 1500-2000 (3), 1750-2250 (4), 2000-2650 (5), 2390-3000 (6), 2700-3000 (7). Toplamda 120 kural kullanılmıştır. Çıkışlarda Duman ve TEG haricinde her bir parametre için 5'er tane üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Duman ve TEG için 11'er üyeli fonksiyonu tanımlanmıştır. Aşağıda verilmiş olan Şekil 3.10.'da tip-1 bulanık çıkarım sistemi şeması, Şekil 3.11.'de ise tip-2 bulanık çıkarım sistemi şeması, Şekil 3.12'de oluşturulan kural tablosundan bir bölüm gösterilmektedir.

Elde edilen sonuçlar için gerekli regresyon analizi hesaplamaları Microsoft Excel ile yapılmıştır. Bu analizlerde R , R^2 , ayarlı R^2 , standart hata, MAD, MSE, RMSE değerlerine bakılmıştır. Açıklamaları aşağıda verilmiştir.

- Çoklu R : Verilen veri seti için bağımsız değişkenlerle bağımlı değişken arasındaki korelasyon katsayısını ifade eder. 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir; 1'e ne kadar yakınsa, modelin bağımlı değişkenle bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi o kadar iyi açıkladığı anlamına gelir.

- R Kare: Modelin bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenin değişimindeki payını ölçen bir istatistiktir. Yani, bağımlı değişkenin toplam değişiminin ne kadarını bağımsız değişkenlerin açıkladığını gösterir. 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir ve 1'e ne kadar yakınsa, modelin uyumu o kadar iyi demektir.

- Ayarlı R Kare: R Kare'ye benzer, ancak bağımsız değişkenlerin sayısını dikkate alarak modellenmiştir. Bu nedenle bağımsız değişken sayısı arttıkça modeli cezalandırır ve daha doğru bir model değerlendirmesi sağlar.

- Standart Hata: Modelin tahminlerinde yaptığı hataların standart sapmasıdır. Bu, modelin tahminlerinin ne kadar yayıldığını gösterir; düşük bir standart hata daha iyi bir model performansı anlamına gelir.

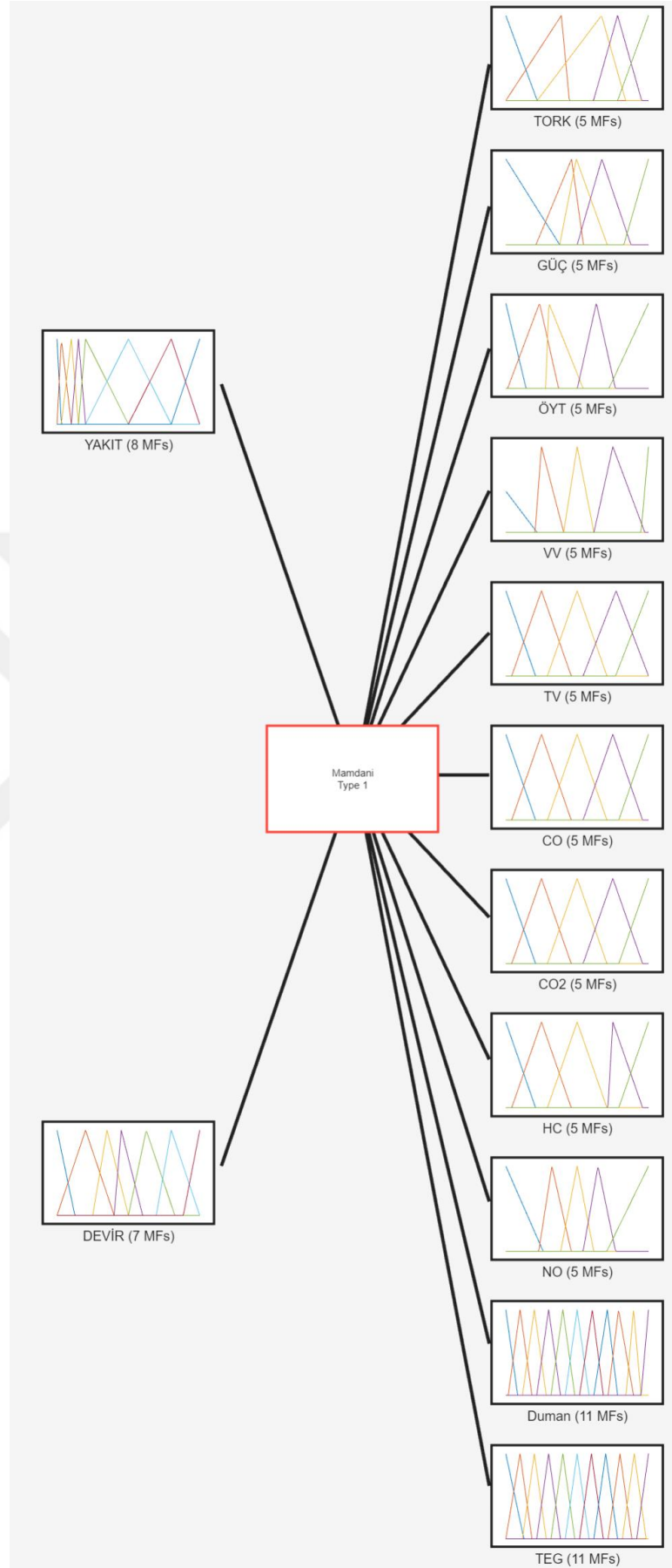
- MAD (*Mean Absolute Deviation*): Tahmin hatalarının ortalama mutlak sapmasıdır. Yani modelin tahminlerinin gerçek değerlerden ortalama olarak ne kadar sapma gösterdiğini ifade eder.

- MSE (*Mean Squared Error*): Ortalama karesel hata, modelin tahminlerinde yaptığı hataların karelerinin ortalamasıdır. Düşük bir MSE değeri, modelin tahminlerinin daha doğru olduğunu gösterir.

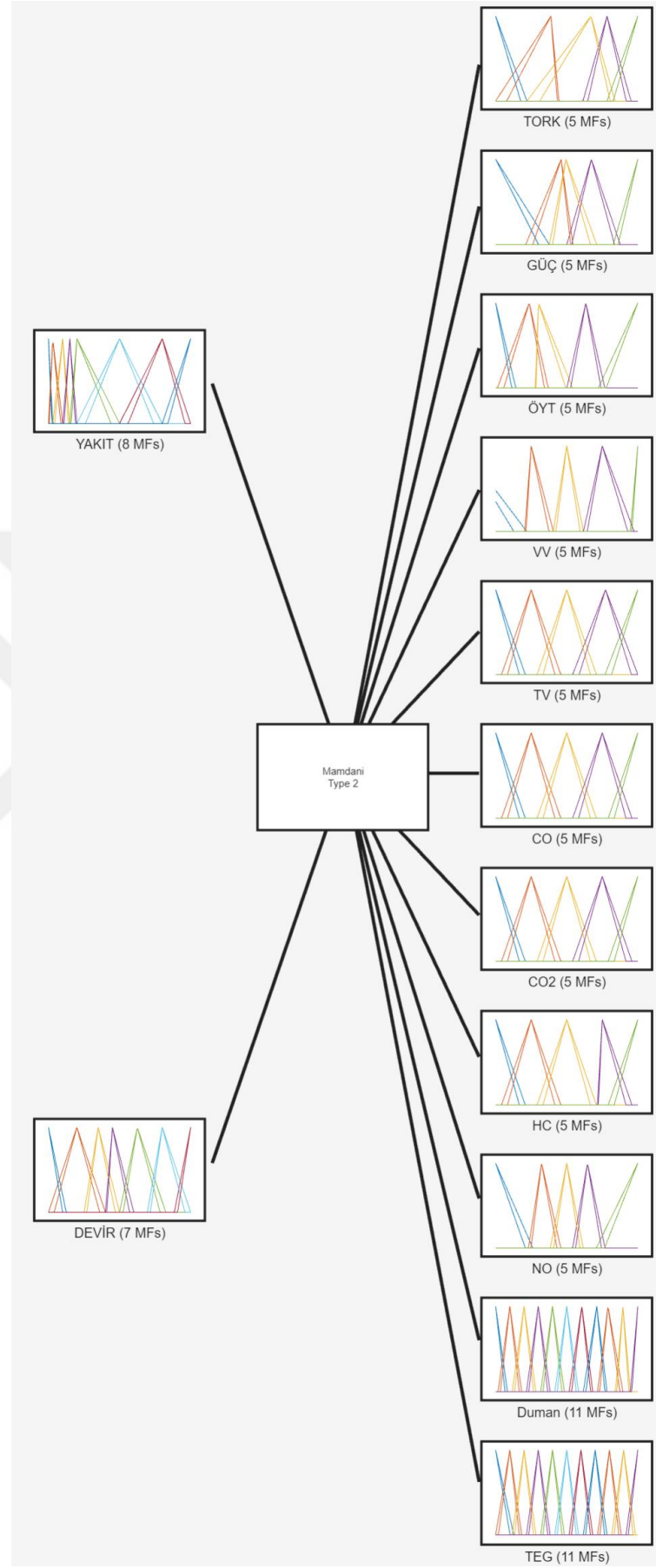
-RMSE (*Root Mean Squared Error*): MSE'nin kareköküdür ve modelin tahmin hatalarının ölçüsüdür. Düşük bir RMSE değeri, modelin daha doğru tahminler yaptığını gösterir.

-Gözlem: Veri setinde gözlemlenen veri noktalarının sayısını ifade eder. Bu, modelin test edildiği veya eğitildiği veri setinin büyüklüğünü gösterir.

Bu istatistikler, modelin performansını değerlendirmek ve bağımsız değişkenlerle bağımlı değişken arasındaki ilişkinin ne kadar iyi açıklandığını belirlemek için kullanılır. Genel olarak Çoklu R, R Kare, Ayarlı R Kare, Standart Hata, MAD, MSE ve RMSE değerleri incelendiğinde, modelin yüksek bir açıklama gücüne ve doğruluğa sahip olduğunu söylenebilir. Özellikle R ve R Kare değerleri modelin başarılı olduğunu gösterir.



Şekil 3.10. Tip-1 bulanık çıkarım sistemi şeması



Şekil 3.11. Tip-2 bulanık çıkarım sistemi şeması

Fuzzy Inference System (FIS) Plot Membership Function (MF) Editor Rule Editor :

System: HEPSİ BİR ARADA

Add All Possible Rules Clear All Rules

Rule	Rule
1	If YAKIT is 1 and DEVİR is 1 then TORK is Y, GÜÇ is ÇD, ÖYT is N, VV is N, TV i...
2	If YAKIT is 1 and DEVİR is 1 then TORK is ÇY, GÜÇ is ÇD, ÖYT is N, VV is Y
3	If YAKIT is 1 and DEVİR is 2 then TORK is ÇY, GÜÇ is D, ÖYT is ÇD, VV is ÇY, T...
4	If YAKIT is 1 and DEVİR is 3 then TORK is ÇY, GÜÇ is N, ÖYT is D, VV is Y, TV i...
5	If YAKIT is 1 and DEVİR is 3 then TORK is Y, GÜÇ is N, ÖYT is D, VV is ÇY, TV i...
6	If YAKIT is 1 and DEVİR is 4 then TORK is ÇY, GÜÇ is ÇY, ÖYT is D, VV is Y, TV ...
7	If YAKIT is 1 and DEVİR is 4 then TORK is Y, GÜÇ is Y, ÖYT is D, VV is Y, TV is ÇY
8	If YAKIT is 1 and DEVİR is 5 then TORK is Y, GÜÇ is ÇY, ÖYT is D, VV is D, TV i...
9	If YAKIT is 1 and DEVİR is 5 then TORK is Y, GÜÇ is ÇY, ÖYT is ÇD
10	If YAKIT is 1 and DEVİR is 6 then TORK is N, GÜÇ is ÇY, ÖYT is D, VV is D, TV is N / i...
11	If YAKIT is 1 and DEVİR is 6 then TORK is Y, GÜÇ is ÇY, ÖYT is N
12	If YAKIT is 1 and DEVİR is 7 then TORK is N, GÜÇ is ÇY, ÖYT is N, VV is N, TV i...
13	If YAKIT is 1 and DEVİR is 7 then TORK is D, GÜÇ is ÇY, ÖYT is D
14	If YAKIT is 1 and DEVİR is 2 then TORK is ÇY, GÜÇ is D
15	If YAKIT is 2 and DEVİR is 1 then TORK is Y, GÜÇ is ÇD
16	If YAKIT is 2 and DEVİR is 1 then TORK is ÇY, GÜÇ is ÇD, ÖYT is N, VV is Y, TV...
17	If YAKIT is 2 and DEVİR is 2 then TORK is ÇY, GÜÇ is D, ÖYT is ÇD, VV is ÇY, T...
18	If YAKIT is 2 and DEVİR is 3 then TORK is ÇY, GÜÇ is N, ÖYT is ÇD, VV is Y, TV...
19	If YAKIT is 2 and DEVİR is 3 then TORK is Y
20	If YAKIT is 2 and DEVİR is 4 then TORK is ÇY, GÜÇ is N, ÖYT is ÇD, VV is Y, TV...

PROPERTY EDITOR: RULE

Name: rule1

Weight: 1

Connection: ☒ And ☐ Or

If

YAKIT is 1 and

DEVİR is 1

Then

TORK is Y

GÜÇ is ÇD

ÖYT is N

VV is N

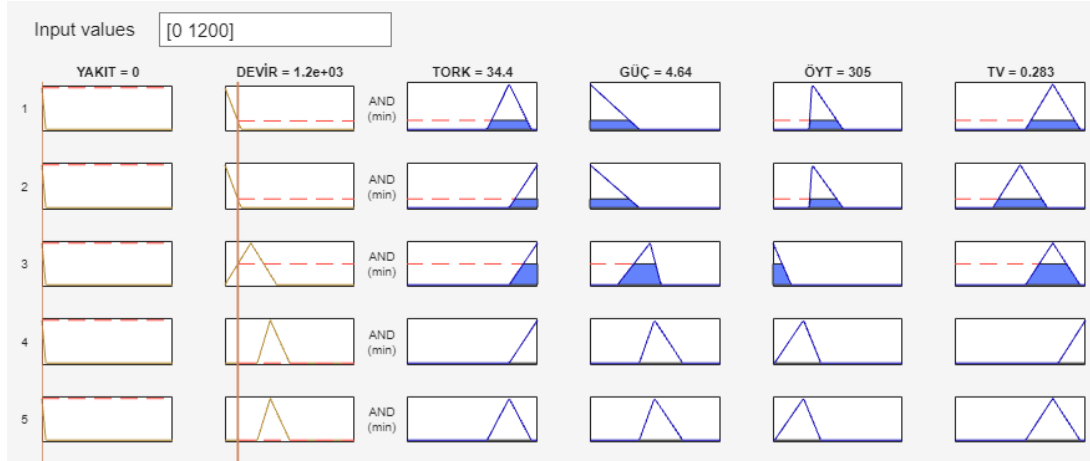
TV is N

CO is ÇY

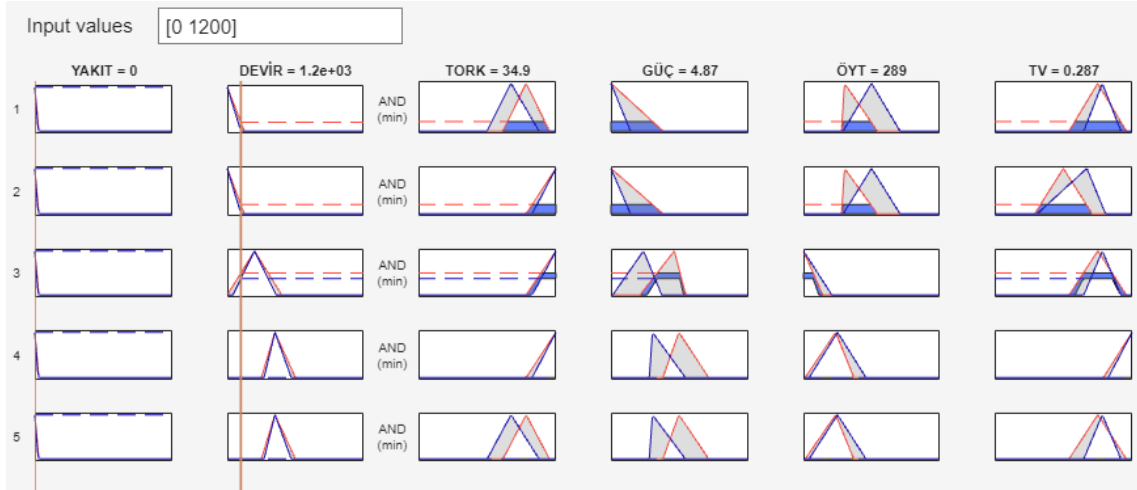
CO2 is CD

Şekil 3.12. Kural tablosundan bir bölüm

Kurallar oluşturulduktan sonra kural çıkarımı arayüzü ile sonuçlar gözlemlenmiştir. Değer girişi bölmesinden başta tanımlanan giriş parametrelerine göre değerler girilmektedir. Şekil 3.13'te tip-1 kural çıkarımı arayüzünün bir kesiti görülmektedir. Burada "0" dizel yakıt yani 0 oranda biyodizel karışımını temsil ederken "1200" motor devrini temsil etmektedir. B15 yakıt karışımı için 15, B45 karışımı için 45 yazılması yeterlidir. Yazılım hesaplamaları yaptıktan sonra sonuçları şekilde görüldüğü üzere üst kısımda vermektedir. Bütün karışımlar ve devirler tek tek girilerek olası bütün sonuçlar elde edilebilmektedir. Şekil 3.14'te ise aynı şekilde tip-2 kural çıkarımı arayüzünün bir kesiti görülmektedir.



Şekil 3.13. Tip-1 kural çıkarımı arayüzü



Şekil 3.14. Tip-2 kural çıkarımı arayüzü

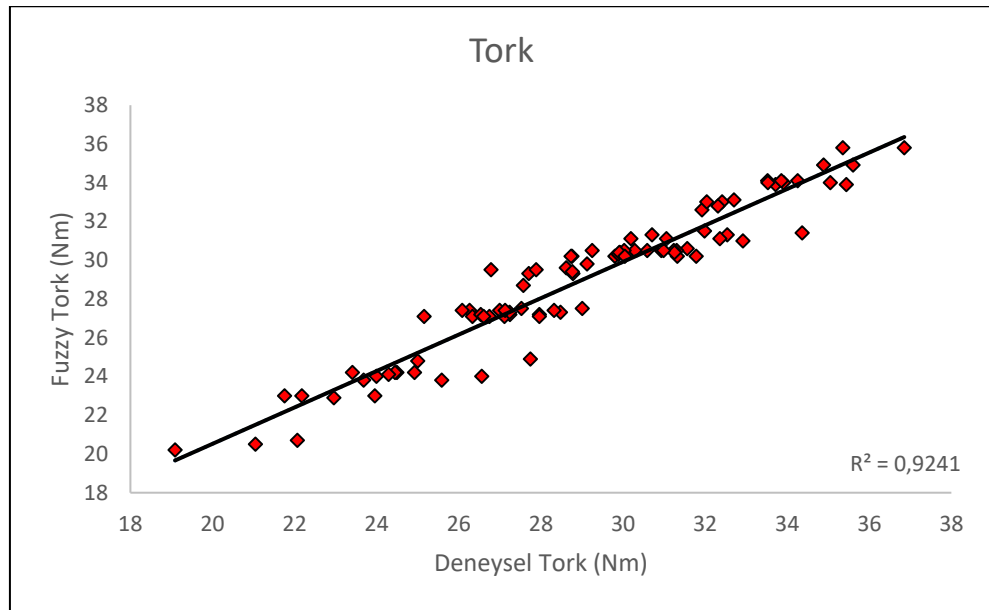
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Motor Torku

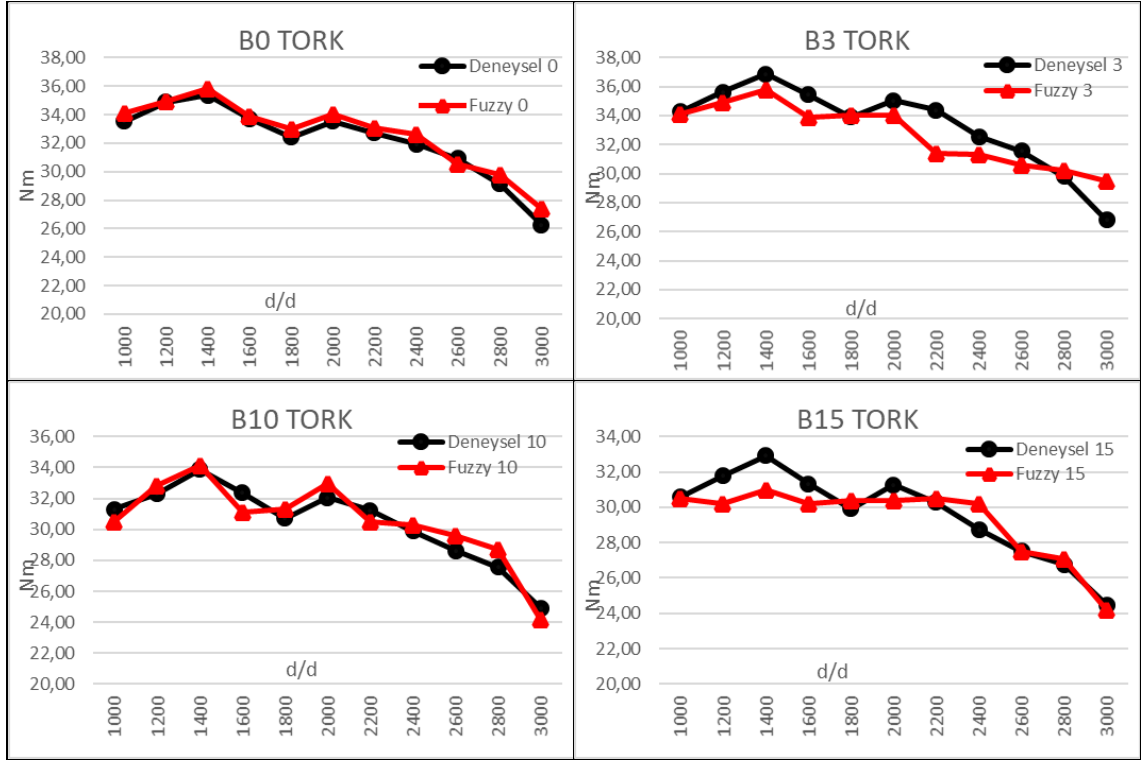
Motor torku, bir motordan çıkan dönme kuvvetinin veya dönme momentinin bir ölçüsüdür. Temelde, bir motordan alınan mekanik gücün dönüşümüdür. Bir motorda oluşan tork, genellikle motor milinin çıkışında ölçülür ve genellikle birim olarak Newton metre (Nm) kullanılır. Motor torku için ÇOK YÜKSEK (ÇY), YÜKSEK (Y), NORMAL (N), DÜŞÜK (D), ÇOK DÜŞÜK (ÇD) şeklinde üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan kurallar sonucunda elde edilen sonuçlar, ölçülen sonuçlarla birlikte Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'te gösterilmiştir. Motor torku için Excel ile hesaplanan regresyon analizleri Çizelge 4.1.'de ve Şekil 4.1.'de ise karşılaştırma grafiği verilmiştir.

Çizelge 4.1. Motor torku regresyon analizleri

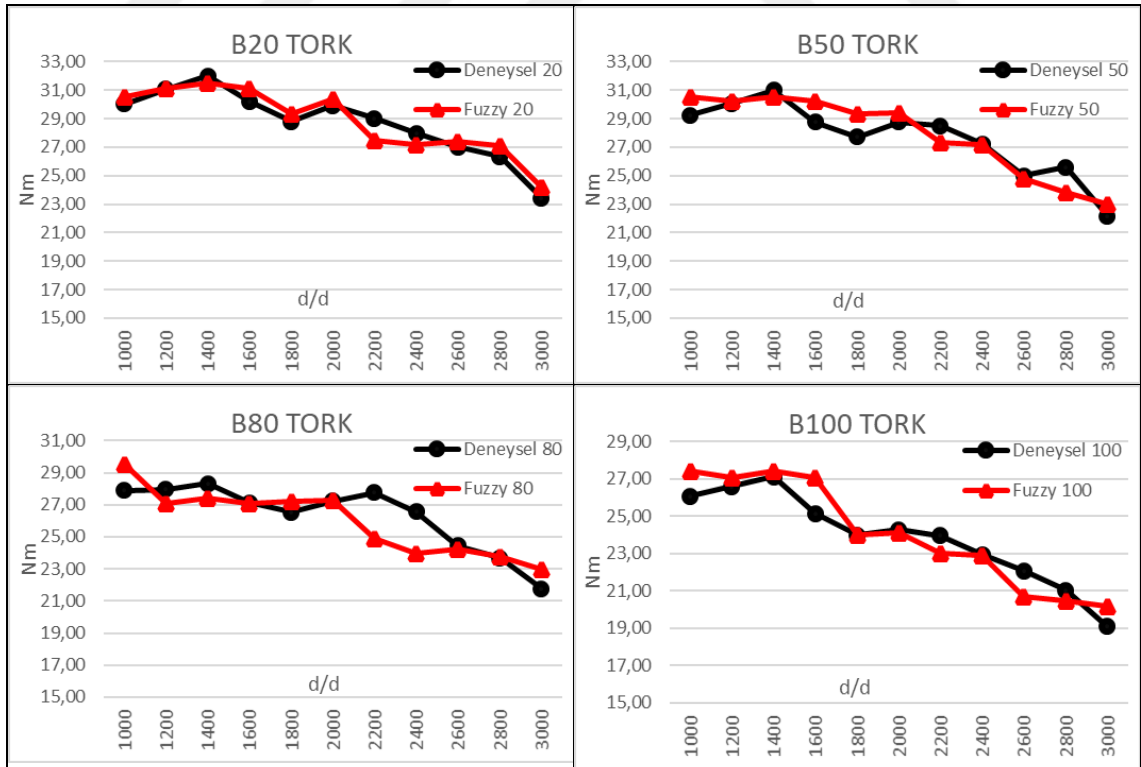
<i>İstatistik</i>	<i>Değer</i>
Çoklu R	0.96131002
R Kare	0.924116955
Ayarlı R Kare	0.923234594
Standart Hata	1.048869154
MAD	0.81051547
MSE	1.079220564
RMSE	1.038855411
Gözlem	88



Şekil 4.1. Motor torku için karşılaştırma grafiği



Şekil 4.2. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan tork değerleri (B0-B15)



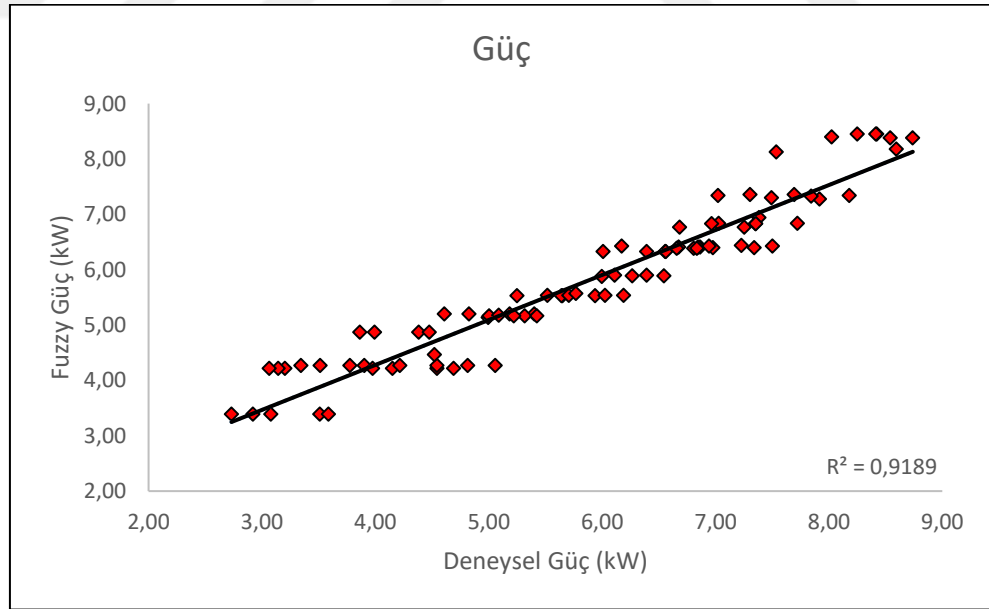
Şekil 4.3. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan tork değerleri (B20-B100)

4.2. Motor Gücü

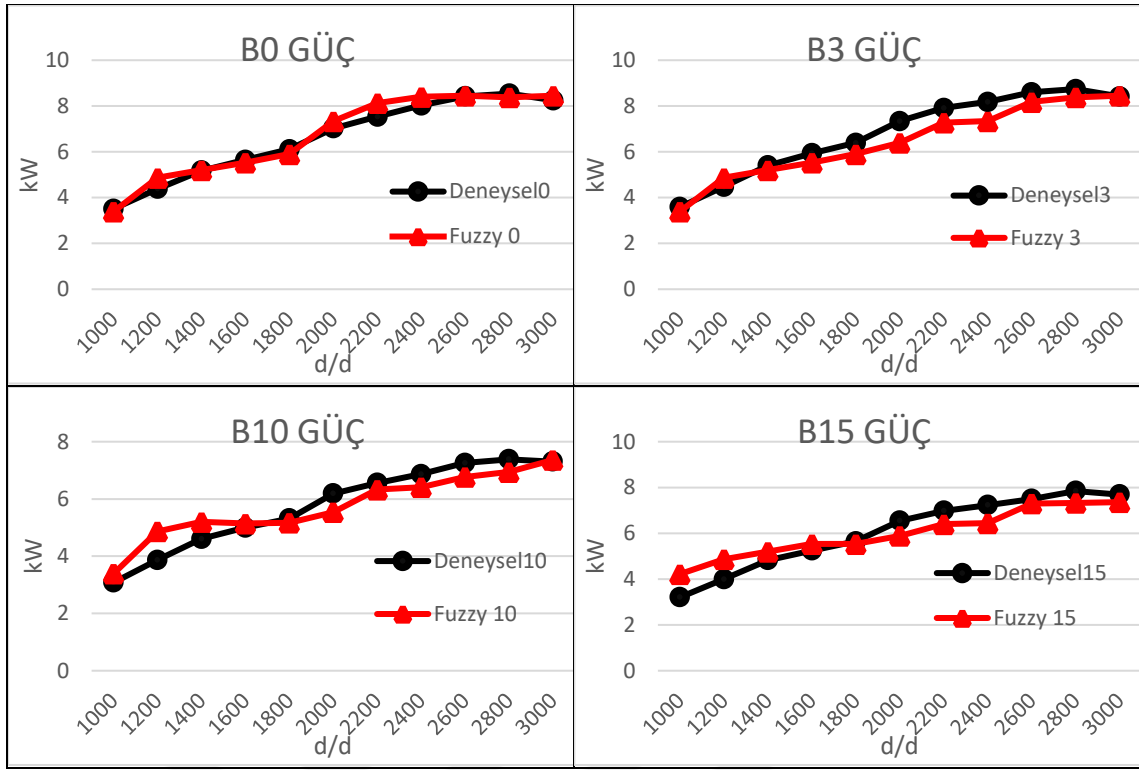
Motor gücü, bir motorun birim zamanda üretebildiği iş gücü veya mekanik gücün bir ölçüsüdür, volandan ölçülen tork ile hesaplanan değerdir. Motor gücü için ÇOK YÜKSEK (ÇY), YÜKSEK (Y), NORMAL (N), DÜŞÜK (D) ve ÇOK DÜŞÜK (ÇD) şeklinde üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan kurallar sonucunda elde edilen sonuçlar, ölçülen sonuçlarla birlikte Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Çizelge 4.2’de regresyon analizleri verilmiştir. Şekil 4.4’te karşılaştırma grafiği verilmiştir.

Çizelge 4.2. Motor gücü regresyon analizleri

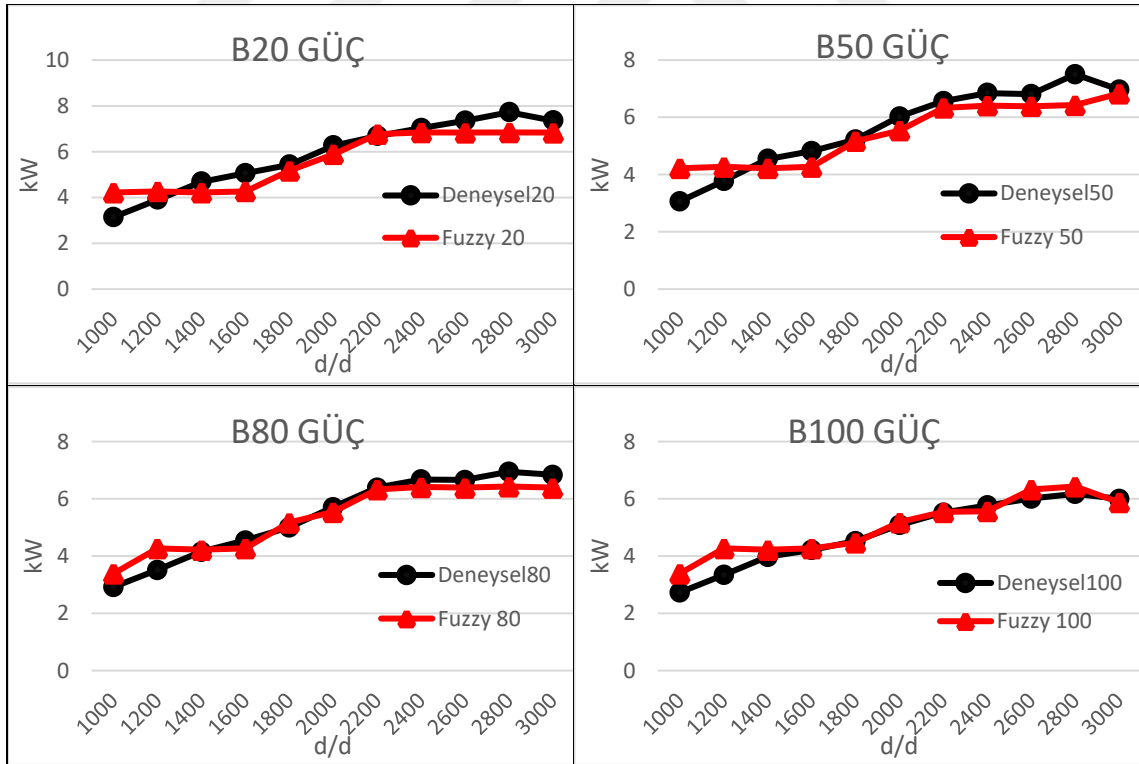
Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.958585467
R Kare	0.918886098
Ayarlı R Kare	0.917942913
Standart Hata	0.455144445
MAD	0.398492039
MSE	0.238641815
RMSE	0.488509791
Gözlem	88



Şekil 4.4. Motor gücü için karşılaştırma grafiği



Şekil 4.5. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan güç değerleri (B0-B15)



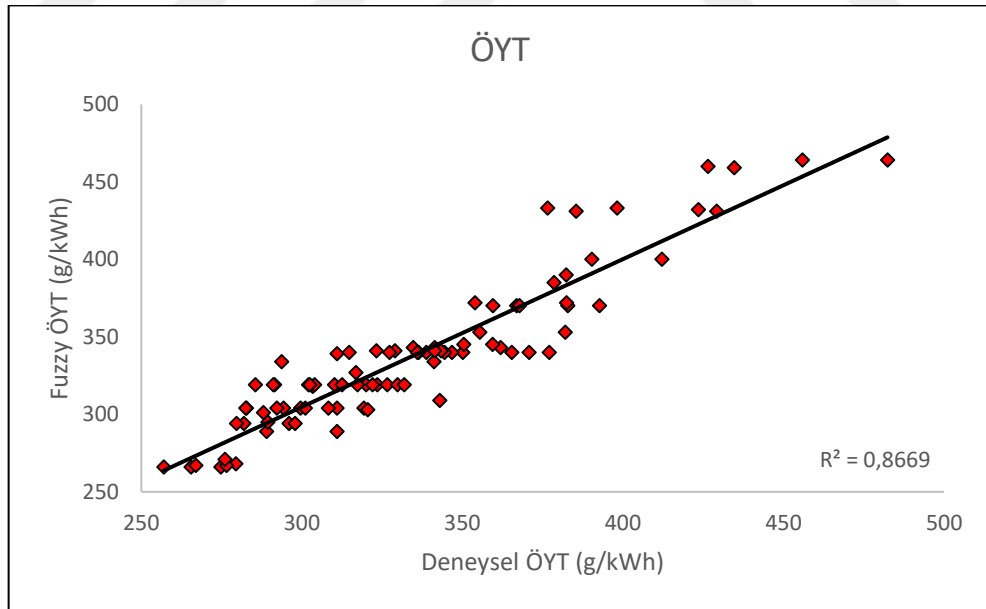
Şekil 4.6. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan güç değerleri (B20-B100)

4.3. Özgöl Yakıt Tüketimi

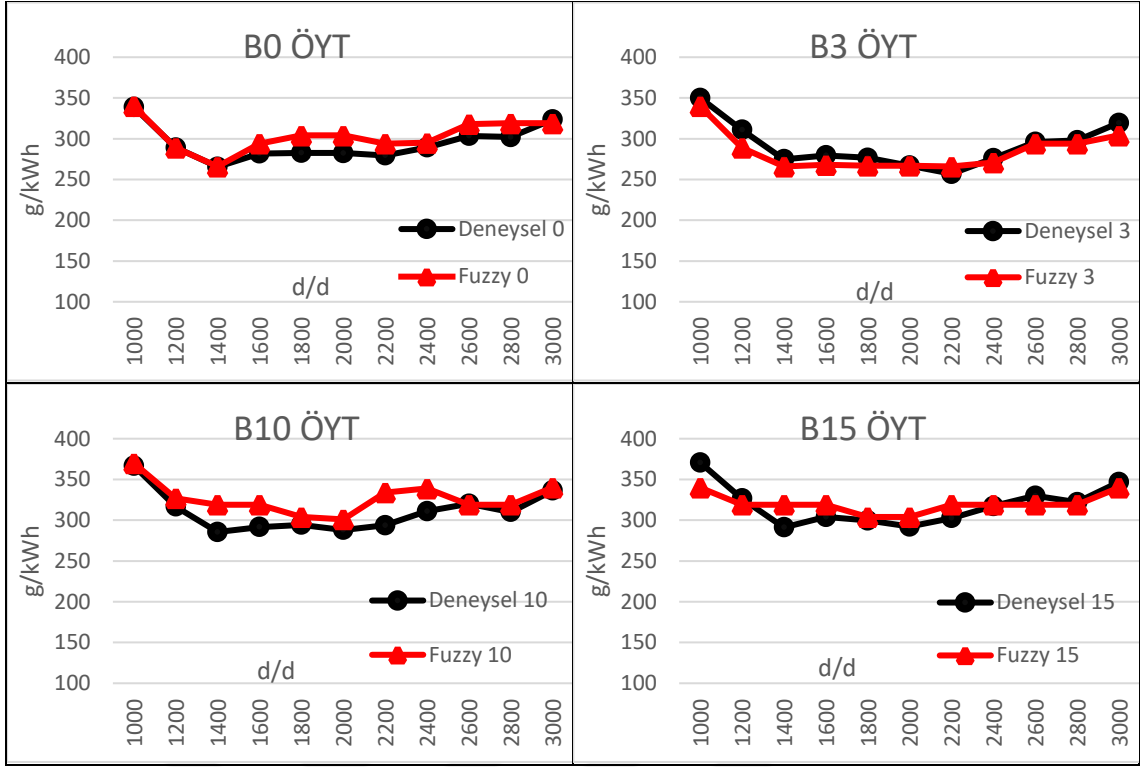
Özgöl yakıt tüketimi, birim zamanda birim güç elde edebilmek için harcanılan yakıt tüketimi miktarıdır. Testlerde özgöl yakıt tüketimi için ÇOK YÜKSEK (ÇY), YÜKSEK (Y), NORMAL (N), DÜŞÜK (D), ÇOK DÜŞÜK (ÇD) şeklinde üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan kurallar sonucunda elde edilen sonuçlar, ölçülen sonuçlarla birlikte Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Regresyon analizleri ve karşılaştırma grafiği Çizelge 4.3’te ve Şekil 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. ÖYT regresyon analizleri

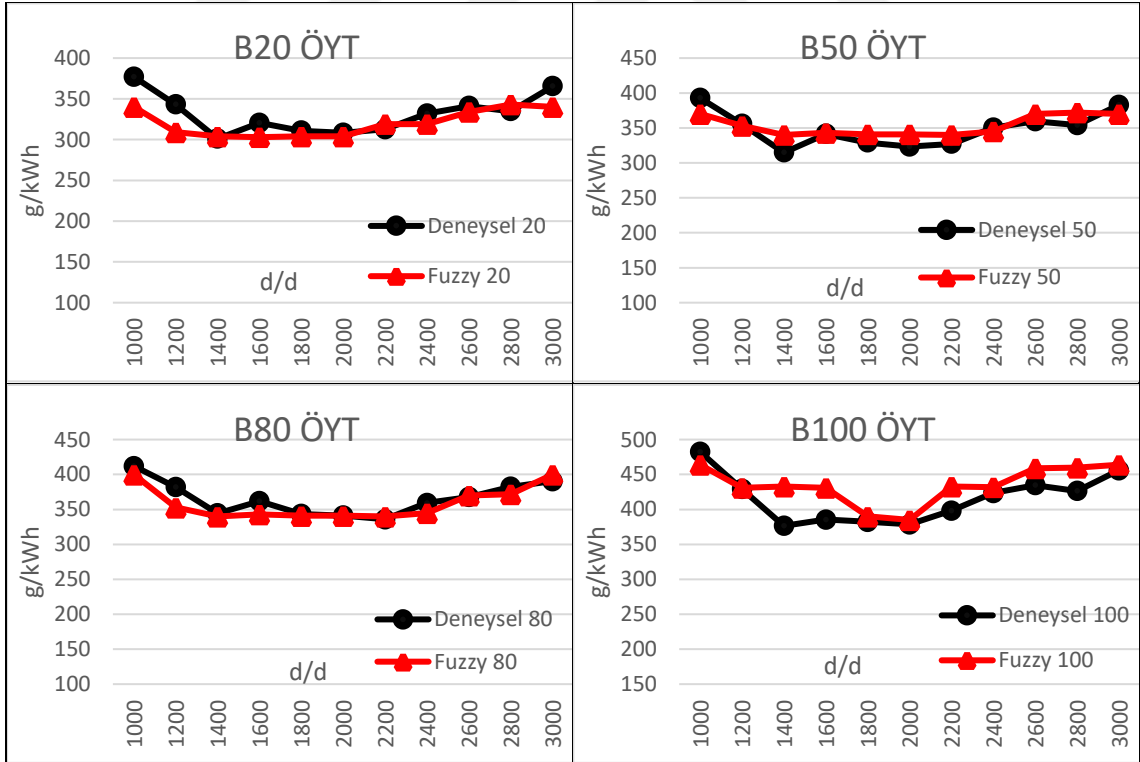
Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.931075
R Kare	0.866902
Ayarlı R Kare	0.865354
Standart Hata	16.97861
MAD	13.43519
MSE	310.0868
RMSE	17.60928
Gözlem	88



Şekil 4.7. ÖYT için karşılaştırma grafiği



Şekil 4.8. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan ÖYT değerleri (B0-B15)



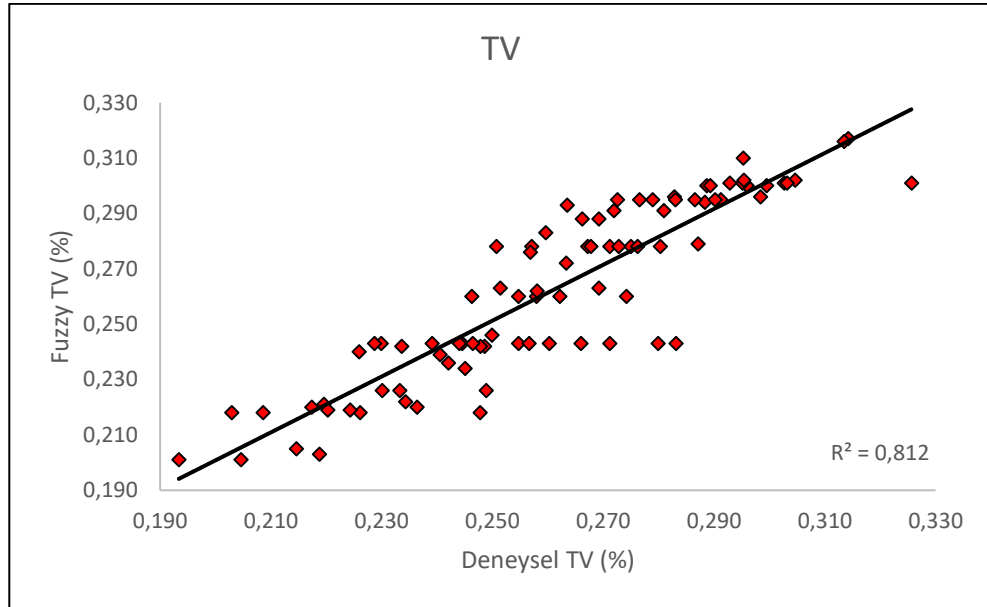
Şekil 4.9. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan ÖYT değerleri (B20-B100)

4.4. Termik Verim

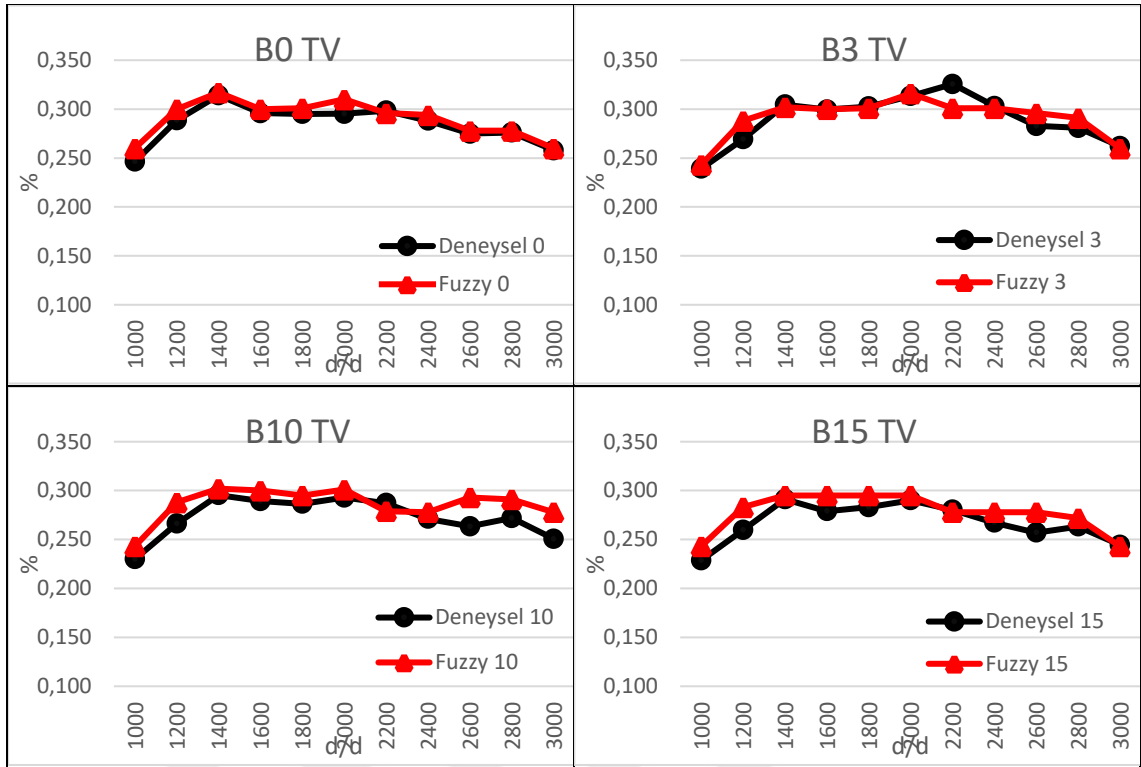
Termik verim yakıt enerjisinden mekanik işe dönüştürülen enerji miktarının, yakıttaki kimyasal enerji miktarına oranıdır. Yani yakıt enerjisinin ne kadarının güce dönüştürülebildiğinin göstergesi olarak ifade edilebilir. Termik verim içinde 5 üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Yine bunlar ÇOK YÜKSEK (ÇY), YÜKSEK (Y), NORMAL (N), DÜŞÜK (D), ÇOK DÜŞÜK (ÇD) şeklinde ifade edilmiştir. Yapılan çalışma sonucu elde bulanık mantık değerleri ile deneysel olarak elde edilen termik verim sonuçları Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 'de verilmiştir. Termik verim için regresyon analizleri ve karşılaştırma grafiği Çizelge 4.4 ve Şekil 4.10 'da verilmiştir.

Çizelge 4.4. TV regresyon analizleri

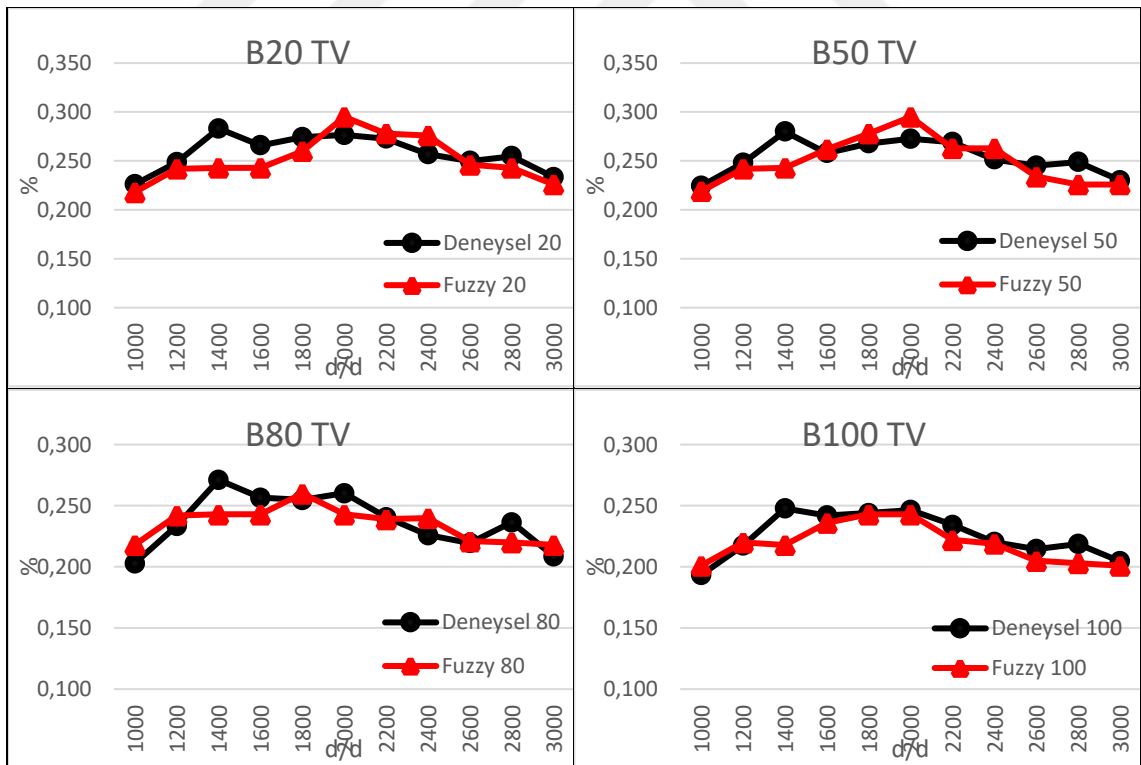
<i>Regresyon İstatistikleri</i>	
Çoklu R	0.901124
R Kare	0.812025
Ayarlı R Kare	0.809839
Standart Hata	0.012384
MAD	0.01079
MSE	0.00019
RMSE	0.013785
Gözlem	88



Şekil 4.10. TV için karşılaştırma grafiği



Şekil 4.11. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan TV değerleri (B0-B15)



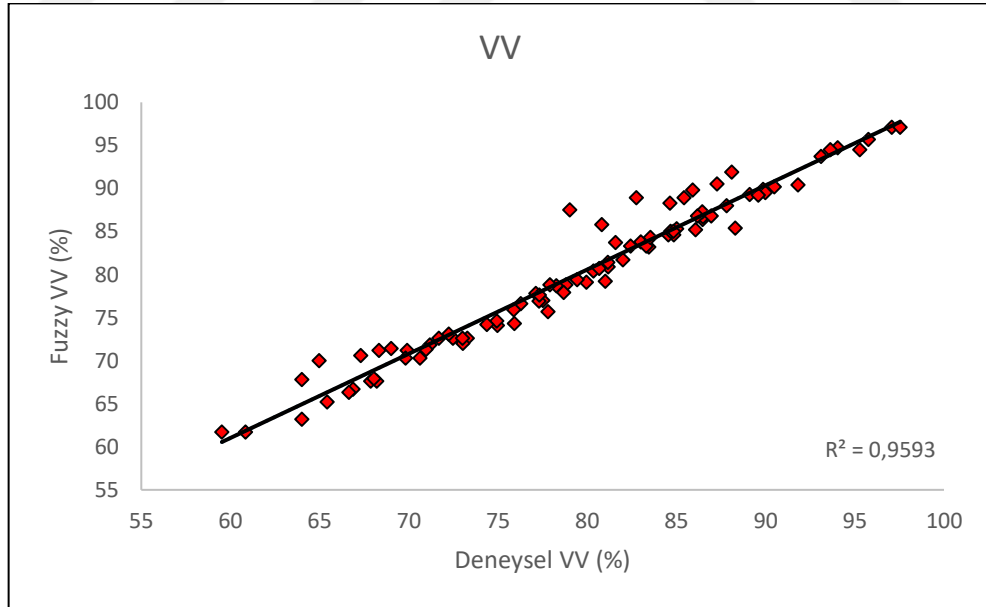
Şekil 4.12. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan TV değerleri (B20-B100)

4.5. Volümetrik Verim

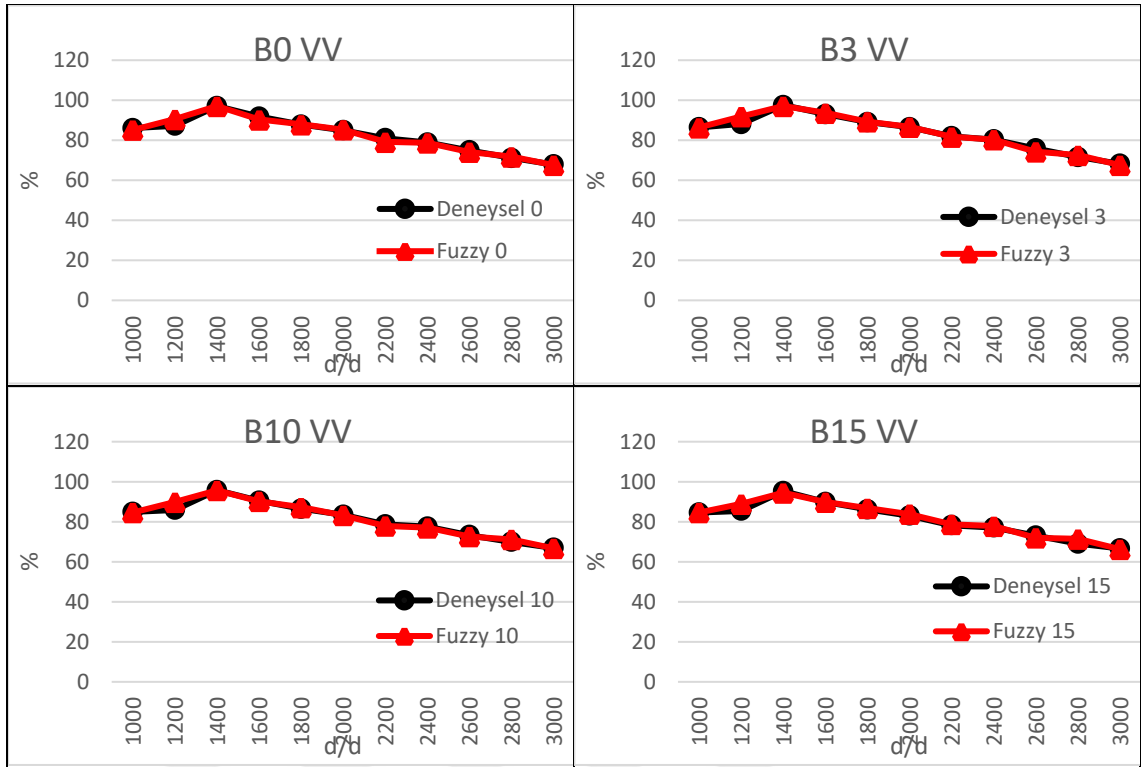
Volümetrik verim, silindir hacmine oranla motorun tükettiği hava miktarını ifade eder ve motorun emisyonları ile performansının değerlendirilmesinde kritik bir rol oynar. Volümetrik verim için de ÇOK YÜKSEK (ÇY), YÜKSEK (Y), NORMAL (N), DÜŞÜK (D), ÇOK DÜŞÜK (ÇD) ve olmak üzere beş üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Bulanık mantığın verdiği sonuçlar ile deneysel sonuçların karşılaştırması şekil 4.14 ve şekil 4.15'te verilmiştir. Regresyon analizleri Çizelge 4.5'te, karşılaştırma grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. VV regresyon analizleri

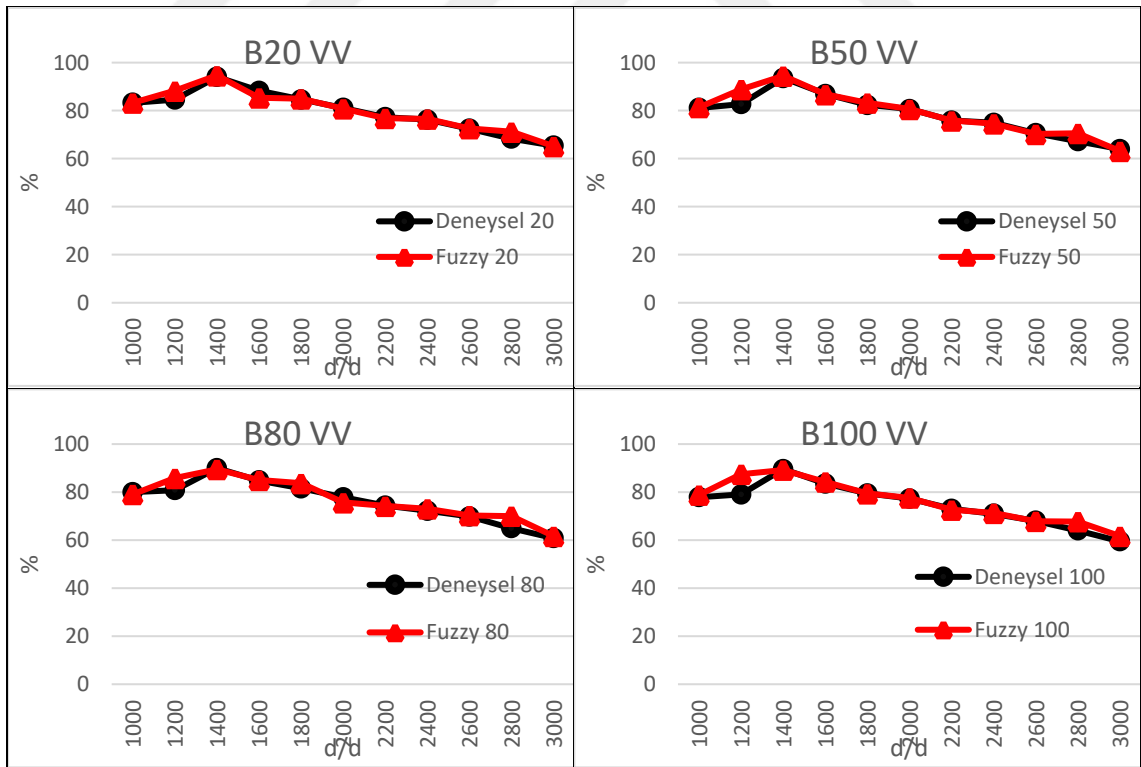
<i>Regresyon İstatistikleri</i>	
Çoklu R	0.979435
R Kare	0.959293
Ayarlı R Kare	0.958819
Standart Hata	1.807662
MAD	1.122396
MSE	3.571857
RMSE	1.889936
Gözlem	88



Şekil 4.13. VV için karşılaştırma grafiği



Şekil 4.14. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan VV değerleri (B0-B15)



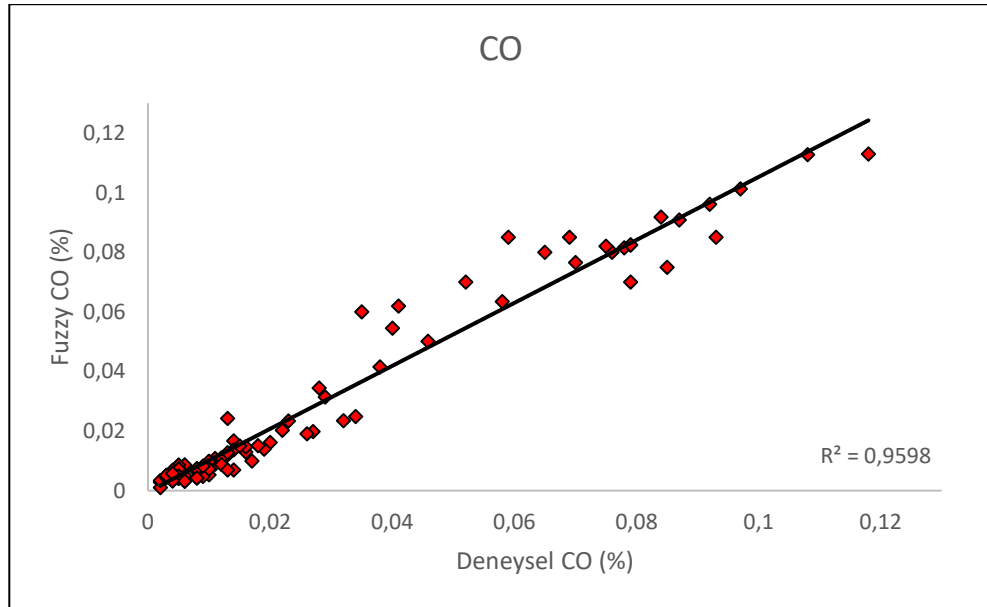
Şekil 4.15. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan VV değerleri (B20-B100)

4.6. CO

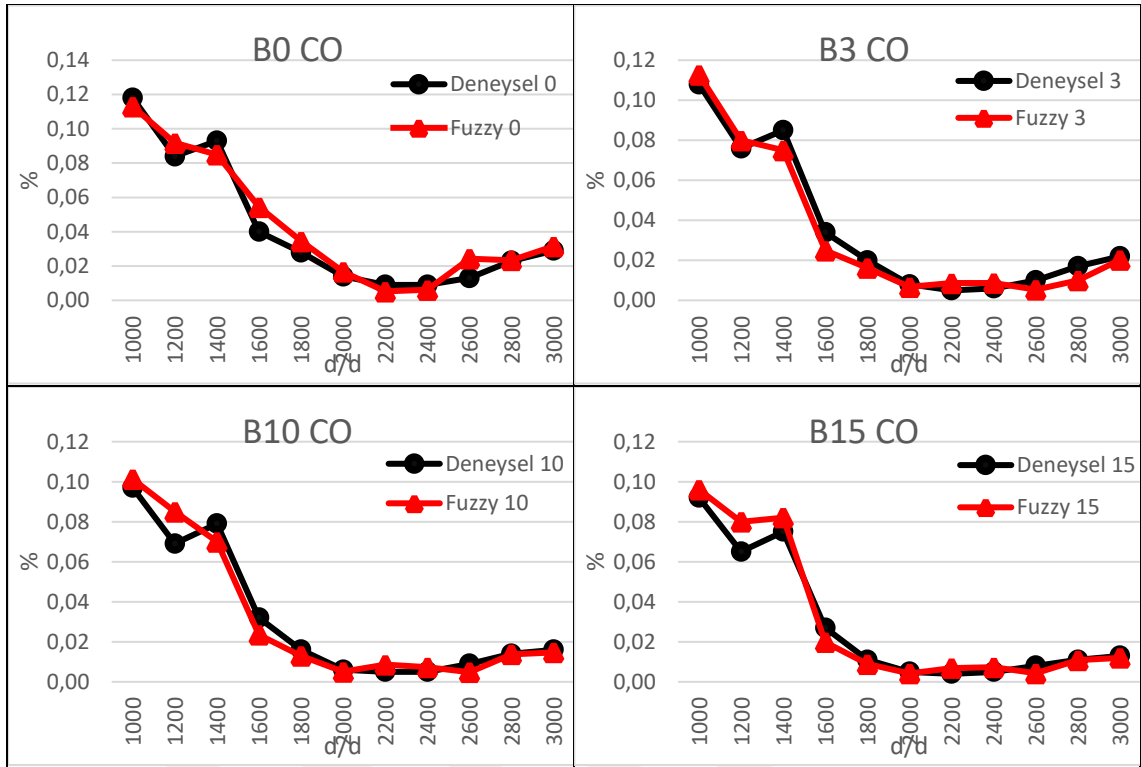
Silindir içerisinde gerçekleşen yanmanın tam verimli olmaması veya yeterli oksijen olmamasından kaynaklı tam yanma gerçekleşmemesi gibi durumlarda ortaya çıkan zararlı bir gazdır. CO için ÇOK YÜKSEK (ÇY), YÜKSEK (Y), NORMAL (N), DÜŞÜK (D) ve ÇOK DÜŞÜK (ÇD) şeklinde beş adet üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Elde edilen veriler ile deneysel ölçüm sonuçları Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilen grafiklerde gösterilmiştir. CO için regresyon analizleri Çizelge 4.6’da ve karşılaştırma grafiği ise Şekil 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. CO regresyon analizleri

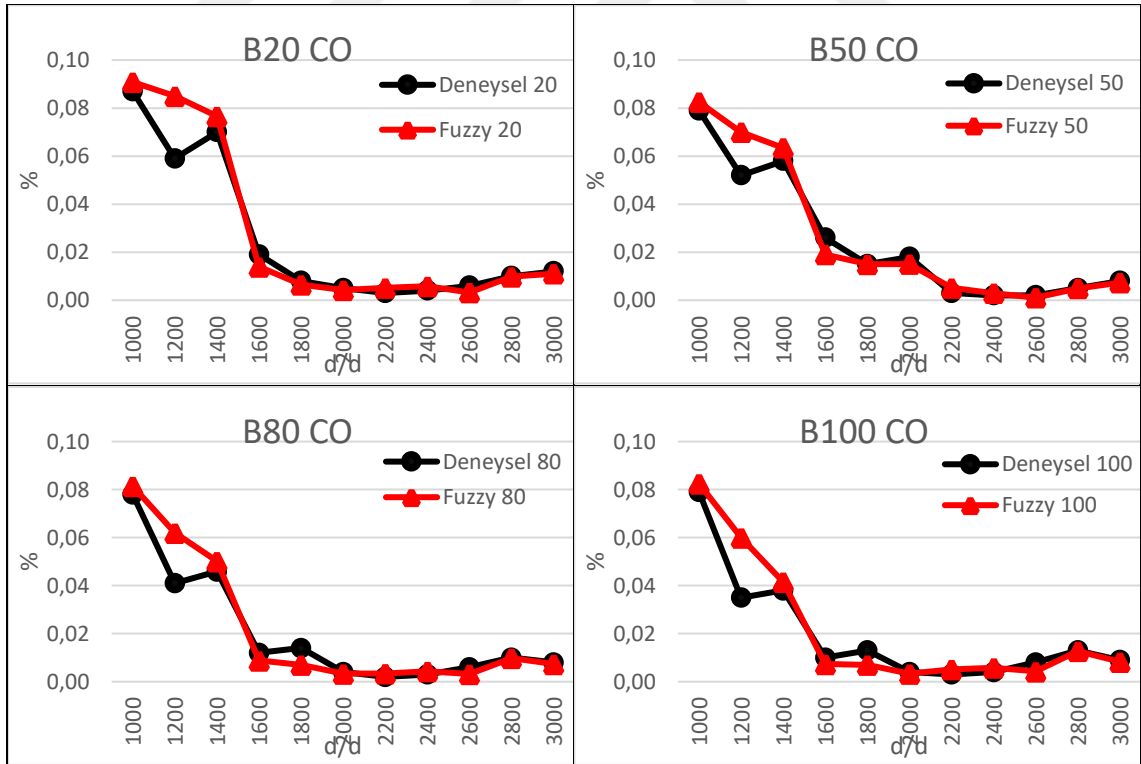
<i>Regresyon İstatistikleri</i>	
Çoklu R	0.979688887
R Kare	0.959790316
Ayarlı R Kare	0.959322761
Standart Hata	0.006191251
MAD	0.004622118
MSE	0.000047904
RMSE	0.006921289
Gözlem	88



Şekil 4.16. CO için karşılaştırma grafiği



Şekil 4.17. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan CO değerleri (B0-B15)



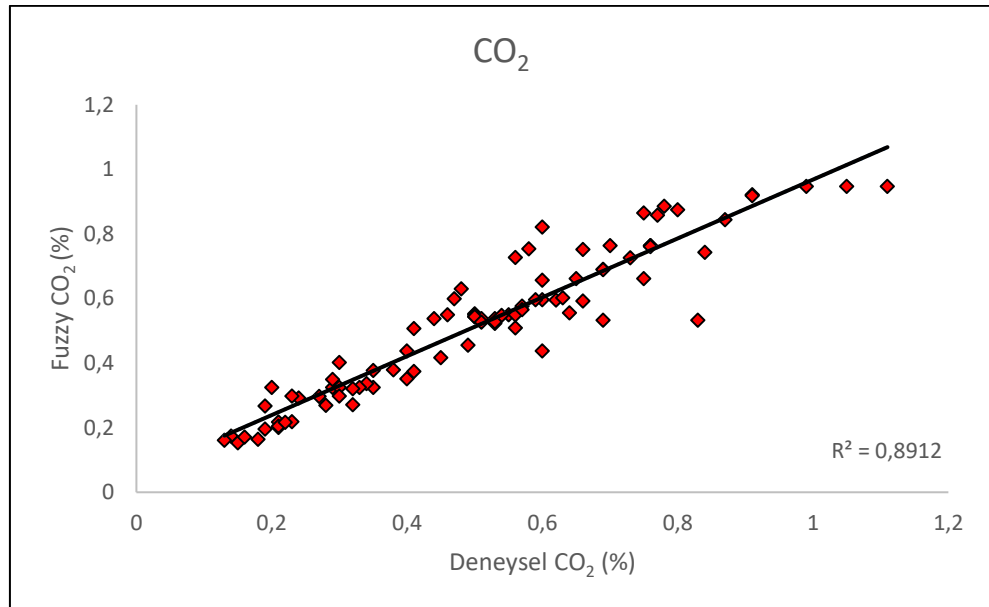
Şekil 4.18. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan CO değerleri (B20-B100)

4.7. CO₂

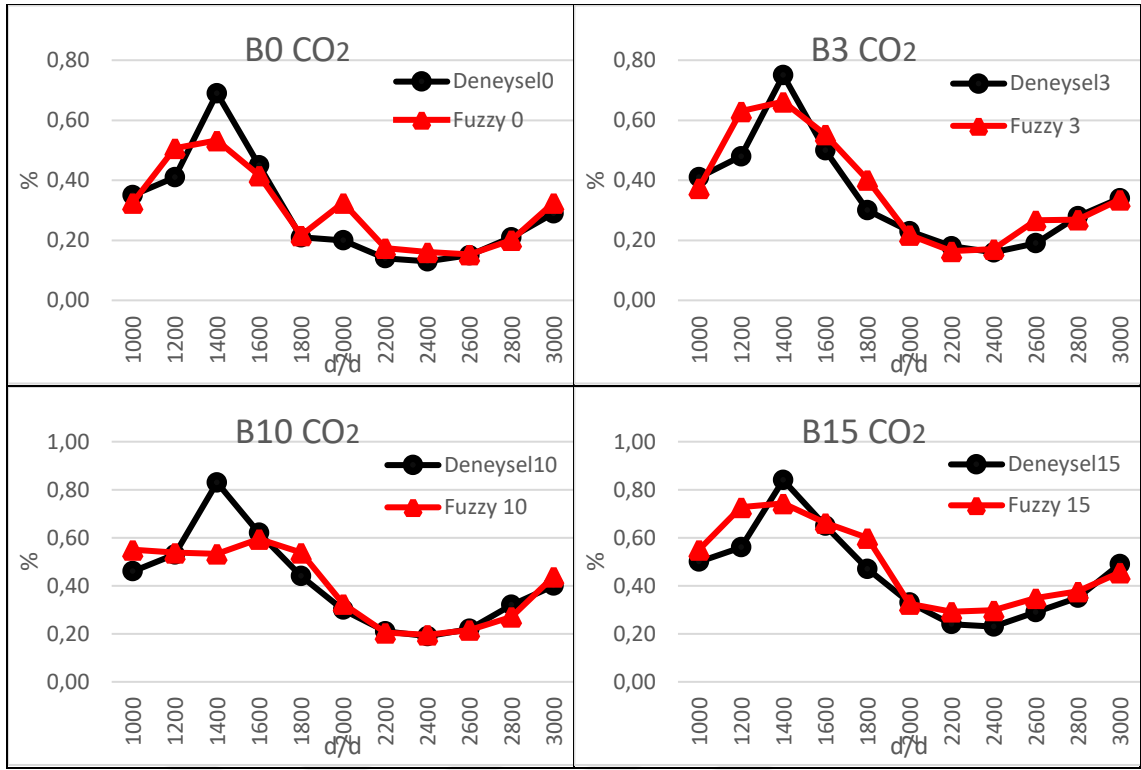
İçten yanmalı motorlardaki yanma sürecinde, yakıt olan hidrokarbonlar benzin, dizel gibi, oksijenle birleşerek CO₂ ve su (H₂O) gibi yanma ürünlerini oluşturur. CO₂, sera gazlarından biridir ve küresel iklim değişikliğinin ana nedenlerinden biri olarak kabul edilir. CO₂ için oluşturulan üyelik fonksiyonu ÇOK YÜKSEK (ÇY), YÜKSEK (Y), NORMAL (N), DÜŞÜK (D), ÇOK DÜŞÜK (ÇD) şeklindedir. Bulanık mantık ile elde edilen veriler ile deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilen grafiklerde gösterilmiştir. Regresyon analizleri ve karşılaştırma grafiği Çizelge 4.7 ve Şekil 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.7. CO₂ regresyon analizleri

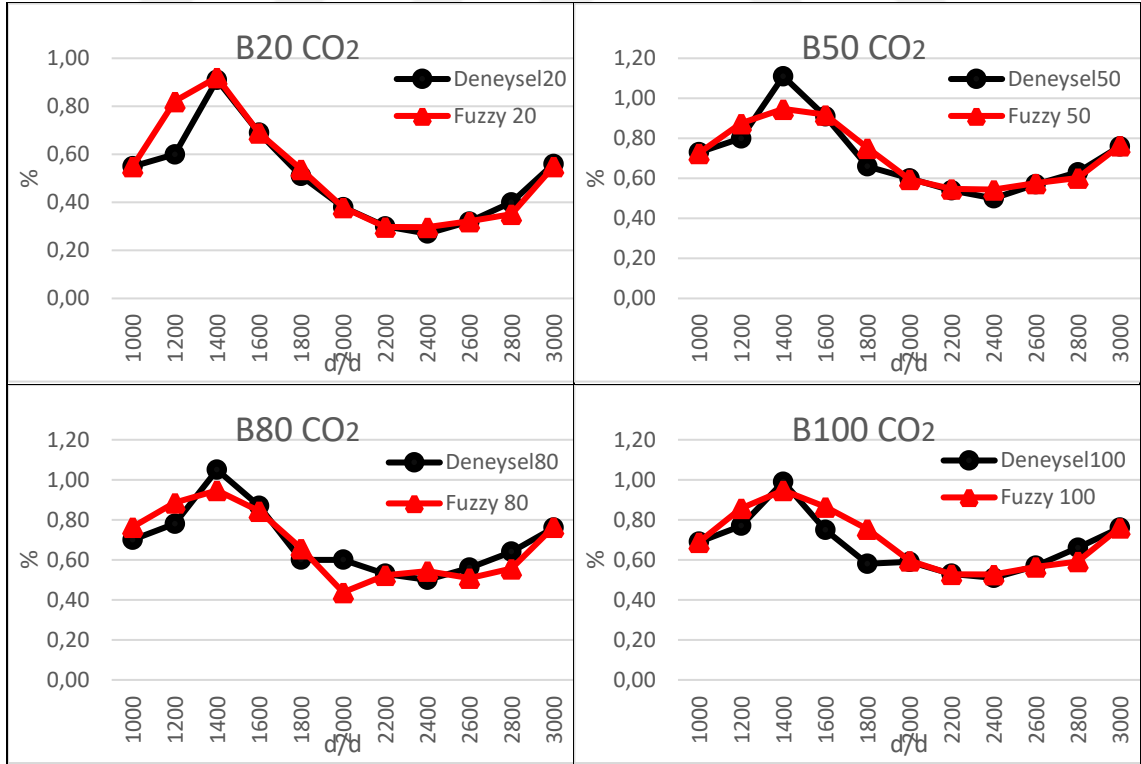
Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.944036
R Kare	0.891204
Ayarlı R Kare	0.889939
Standart Hata	0.075857
MAD	0.050864
MSE	0.005786
RMSE	0.076065
Gözlem	88



Şekil 4.19. CO₂ için karşılaştırma grafiği



Şekil 4.20. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan CO₂ değerleri (B0-B15)



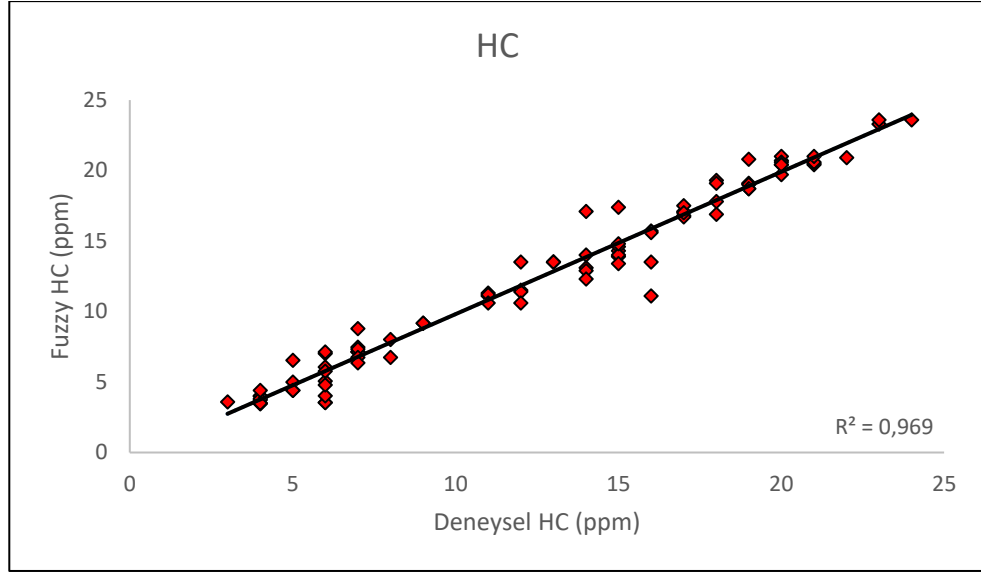
Şekil 4.21. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan CO₂ değerleri (B20-B100)

4.8. HC

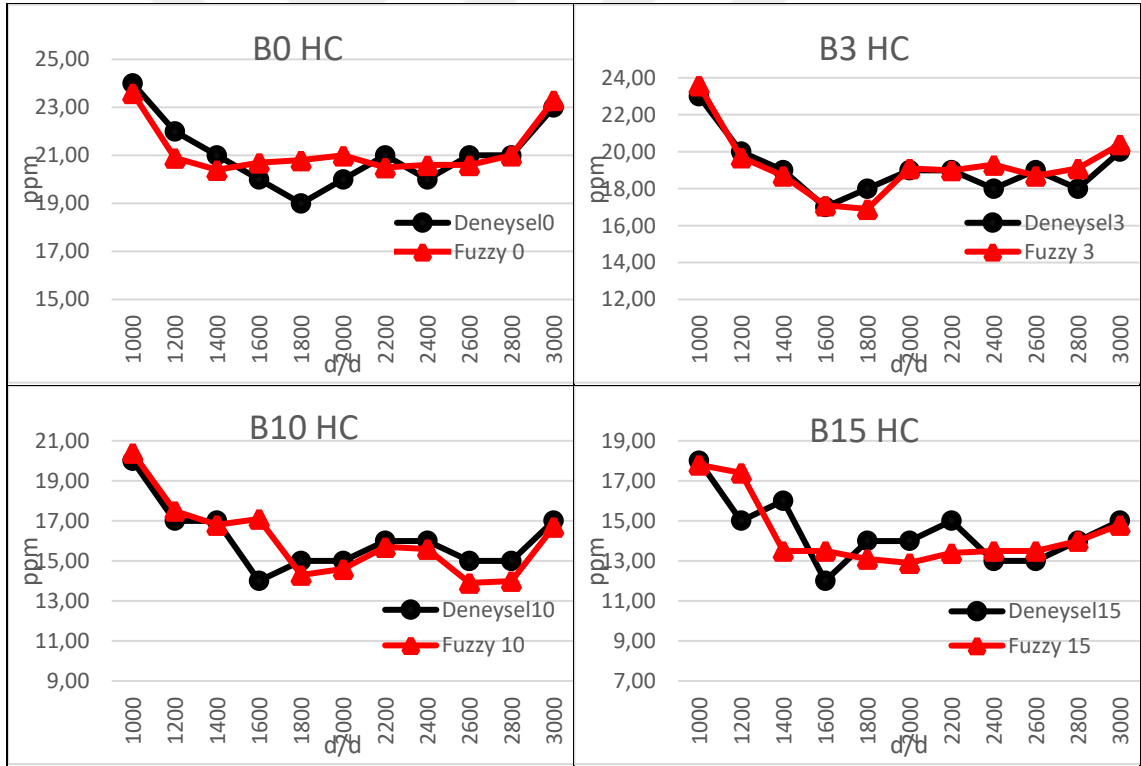
Hidrokarbon esaslı motor yakıtlarının yanması sırasında, genellikle oksijenle birleşerek su buharı (H_2O) ve karbon dioksit (CO_2) gibi yanma ürünleri oluşur. Ancak yanma işlemi tam olarak tamamlanmadığında veya silindir içerisine yeterince oksijen alınamadığında, hidrokarbon molekülleri tamamen oksitlenemez. Bu durumda, yanmayan hidrokarbonlar egzoz gazlarına salınarak hidrokarbon (HC) emisyonlarına neden olur. HC emisyonları, atmosfere salınan hidrokarbon bileşiklerinin bir türüdür. Bu, hava kirliliği ve çevresel etkiler açısından önemli bir konudur çünkü HC emisyonları, ozon oluşumu, asit yağmurları ve hava kalitesi sorunları gibi çeşitli sorunlara yol açabilir. Bu nedenle motorların daha verimli ve temiz yanma sağlamak için tasarlanması ve egzoz emisyonlarının kontrol altına alınması önemlidir. HC için de ÇOK YÜKSEK (ÇY), YÜKSEK (Y), NORMAL (N), DÜŞÜK (D), ÇOK DÜŞÜK (ÇD) şeklinde üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Elde edilen veriler ile deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 4.23 ve 4.24 'te verilmiştir. Sonuçların regresyon analizleri Çizelge 4.8' de ve karşılaştırma grafiği ise Şekil 4.22'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. HC regresyon analizleri

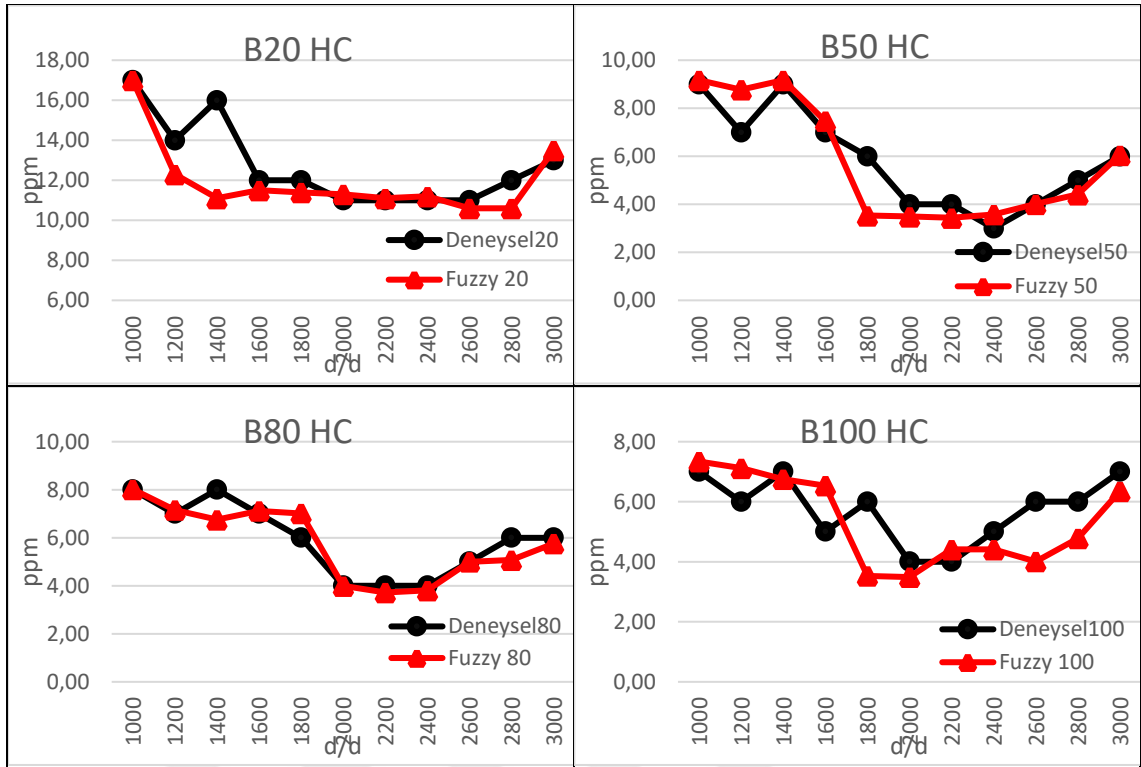
<i>Regresyon İstatistikleri</i>	
Çoklu R	0.984356
R Kare	0.968956
Ayarlı R Kare	0.968595
Standart Hata	1.06919
MAD	0.750682
MSE	1.204105
RMSE	1.097317
Gözlem	88



Şekil 4.22. HC için karşılaştırma grafiği



Şekil 4.23. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan HC değerleri (B0-B15)



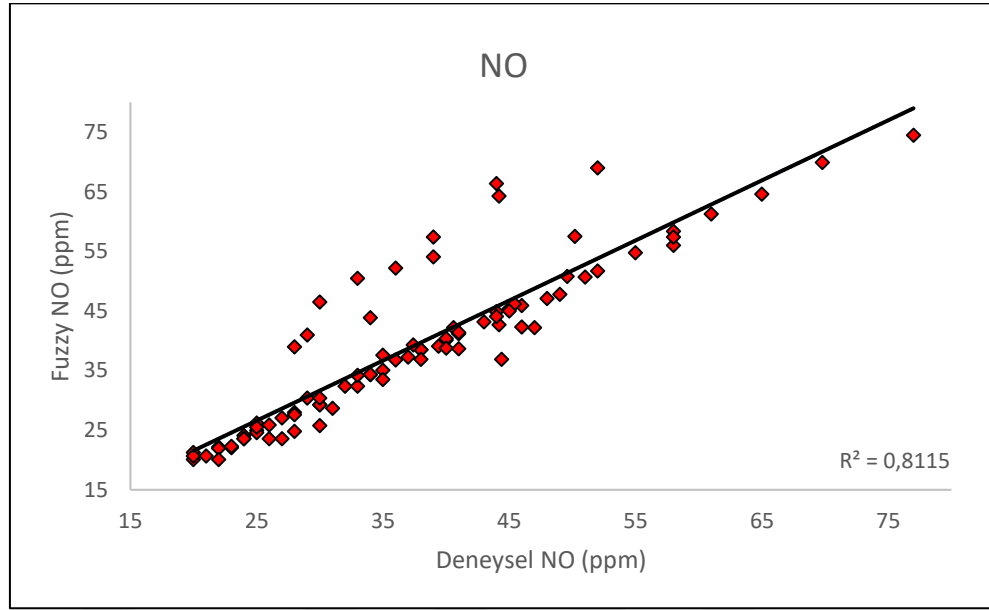
Şekil 4.24. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan HC değerleri (B20-B100)

4.9. NO_x

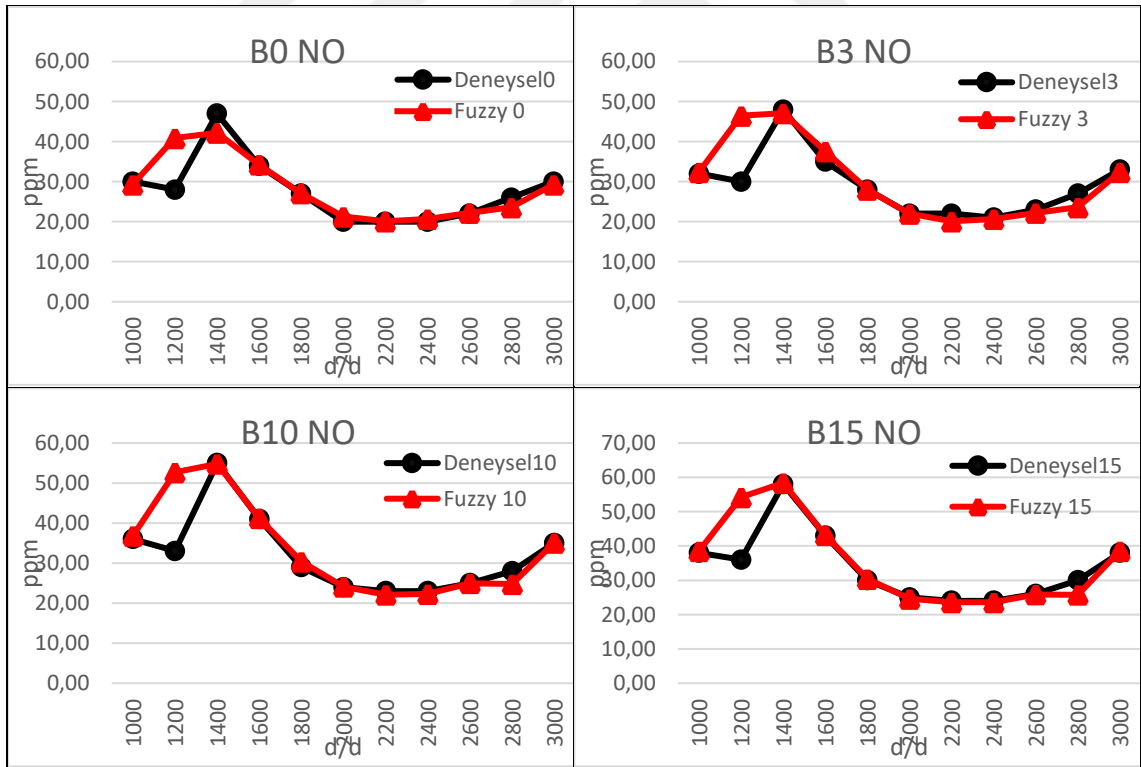
Bu emisyon, atmosferdeki azot ve oksijenin yüksek sıcaklık ve basınç altında reaksiyona girmesiyle meydana gelir. NO_x (azot oksitleri) emisyonları, asit yağmurlarına sebep olabilmektedir. NO_x emisyonları için oluşturulan üyelik fonksiyonu ÇOK YÜKSEK (ÇY), YÜKSEK (Y), NORMAL (N), DÜŞÜK (D), ÇOK DÜŞÜK (ÇD) şeklindedir. Elde edilen veriler ile ölçülen deneysel verilerin karşılaştırılması Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de verilmiştir. Regresyon analizleri Çizelge 4.9’da ve karşılaştırma grafiği Şekil 4.25’te verilmiştir.

Çizelge 4.9. NO regresyon analizleri

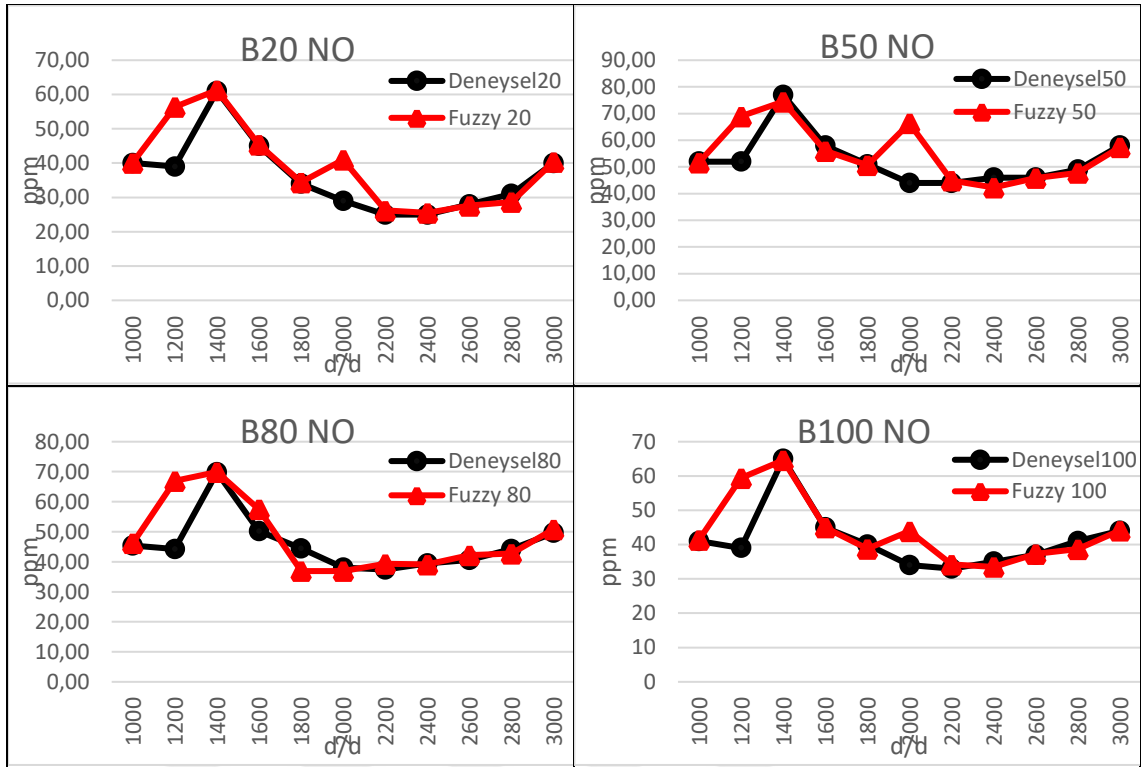
Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.900835
R Kare	0.811503
Ayarlı R Kare	0.809311
Standart Hata	5.252068
MAD	2.973864
MSE	36.60534
RMSE	6.050235
Gözlem	88



Şekil 4.25. NO için karşılaştırma grafiği



Şekil 4.26. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan NO değerleri (B0-B15)



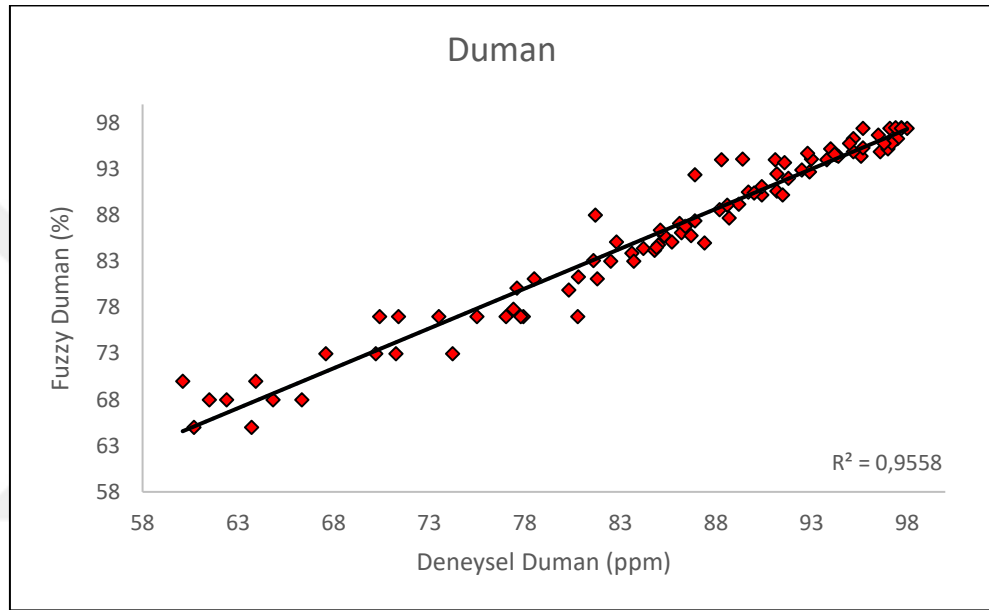
Şekil 4.27. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan NO değerleri (B20-B100)

4.10. DUMAN

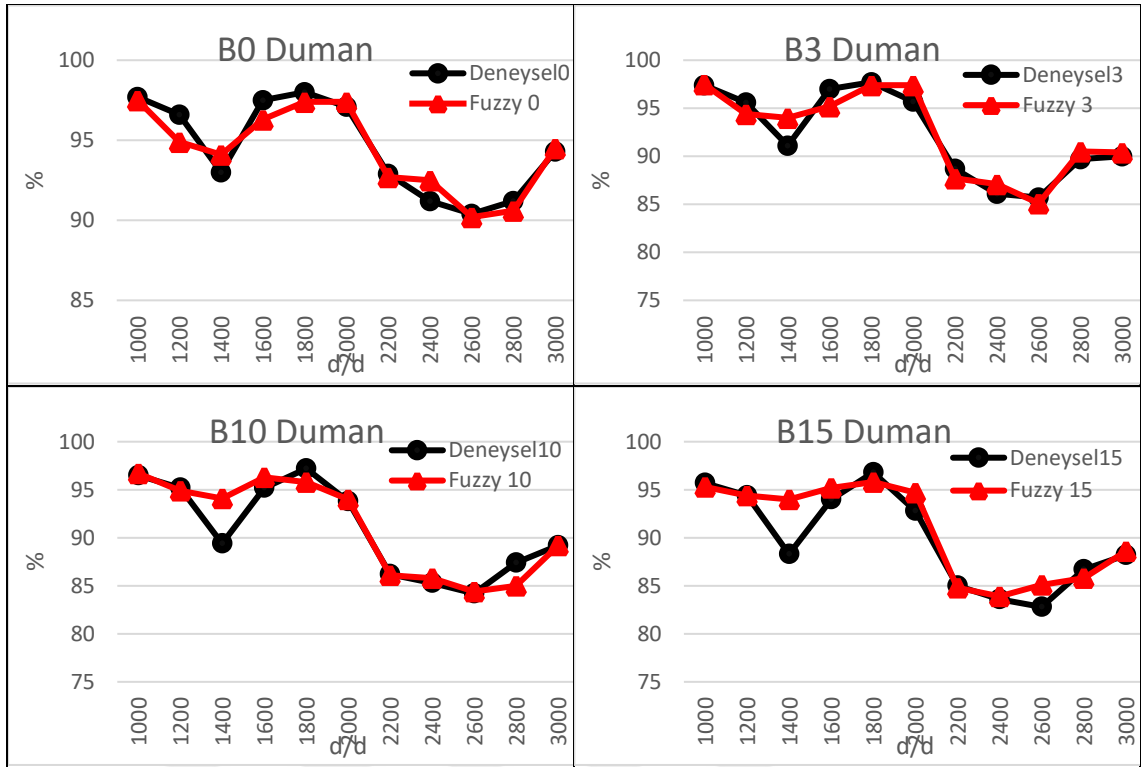
Dizel motorlarda duman ölçümü önemli yanma hakkında önemli bilgi verir. Yanma esnasında yetersiz oksijen olması, zengin karışım sebebiyle katı karbon parçacıkları oluşmasına sebep vererek duman koyuluğu oluşmasına sebep verir. Bu durumdan emisyon ölçümlerinde dizel motorlarda diğer emisyonlarla birlikte duman emisyonu değerlerine de bakılır. Duman için oluşturulan üyelik fonksiyonları ÇOK ÇOK FAZLA DÜŞÜK (ÇÇFD), ÇOK FAZLA DÜŞÜK (ÇFD), ÇOK DÜŞÜK (ÇD), FAZLA DÜŞÜK (FD), DÜŞÜK (D), NORMAL (N), YÜKSEK (Y), FAZLA YÜKSEK (FY), ÇOK YÜKSEK (ÇY), ÇOK FAZLA YÜKSEK (ÇFY), ÇOK ÇOK FAZLA YÜKSEK (ÇÇFY) şeklinde tanımlanmıştır. Elde edilen veriler ile ölçülen deneysel verilerin karşılaştırılması Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir. Regresyon analizleri ve karşılaştırma grafiği Çizelge 4.10 ve Şekil 4.28'de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Duman regresyon analizleri

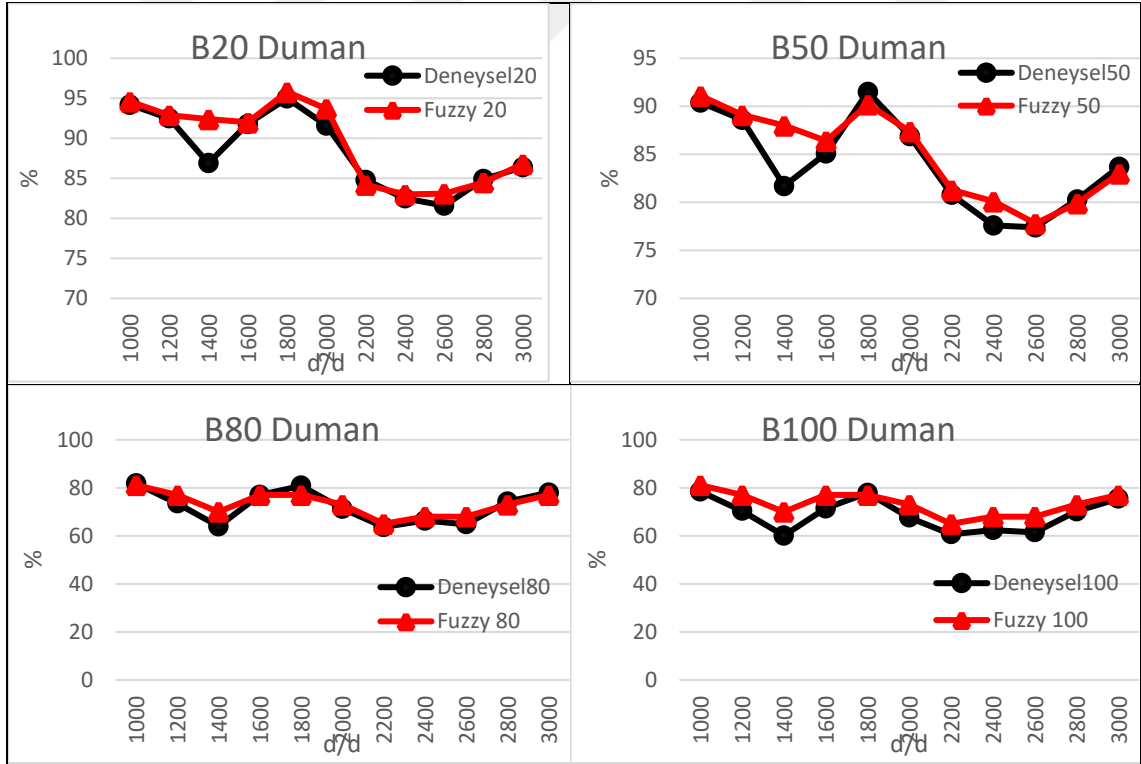
Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.977626583
R Kare	0.955753736
Ayarlı R Kare	0.955239245
Standart Hata	2.17718295
MAD	1.828459963
MSE	7.505925872
RMSE	2.739694485
Gözlem	88



Şekil 4.28. Duman için karşılaştırma grafiği



Şekil 4.29. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan Duman değerleri (B0-B15)



Şekil 4.30. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan Duman değerleri (B20-B100)

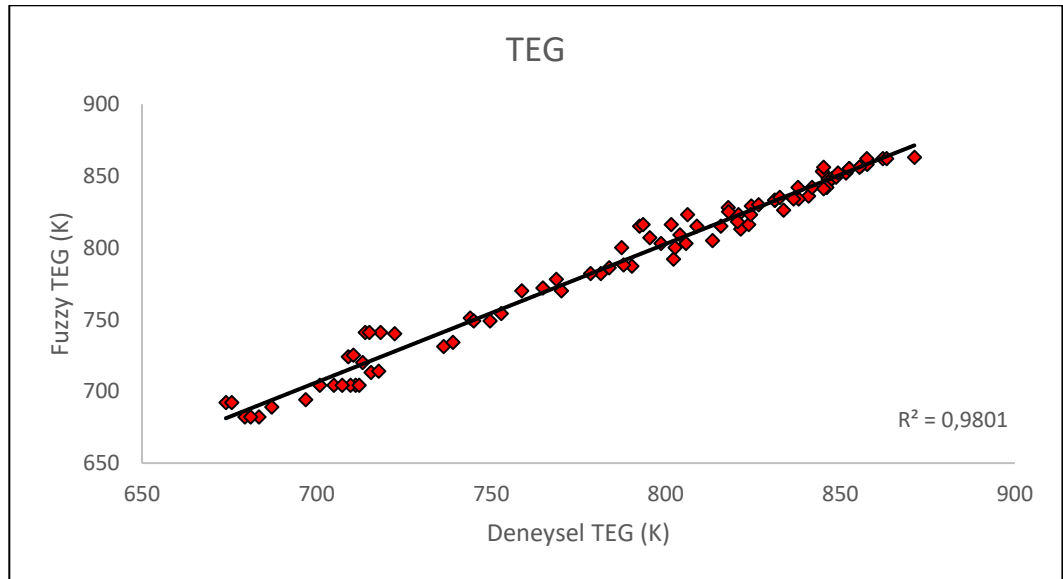
4.11. TEG

Egzoz gazı sıcaklığı, içten yanmalı motorlarda emisyon değerlerinin analiz edilmesinde önemli bir göstergedir. Egzoz gazı sıcaklığı yanmanın ne kadar kaliteli olduğunu belirten parametrelerden biridir. TEG için oluşturulan üyelik fonksiyonları ÇOK ÇOK FAZLA DÜŞÜK (ÇÇFD), ÇOK FAZLA DÜŞÜK (ÇFD), ÇOK DÜŞÜK (ÇD), FAZLA DÜŞÜK (FD), DÜŞÜK (D), NORMAL (N), YÜKSEK (Y), FAZLA YÜKSEK (FY), ÇOK YÜKSEK (ÇY), ÇOK FAZLA YÜKSEK (ÇFY), ÇOK ÇOK FAZLA YÜKSEK (ÇÇFY) şeklinde tanımlanmıştır.

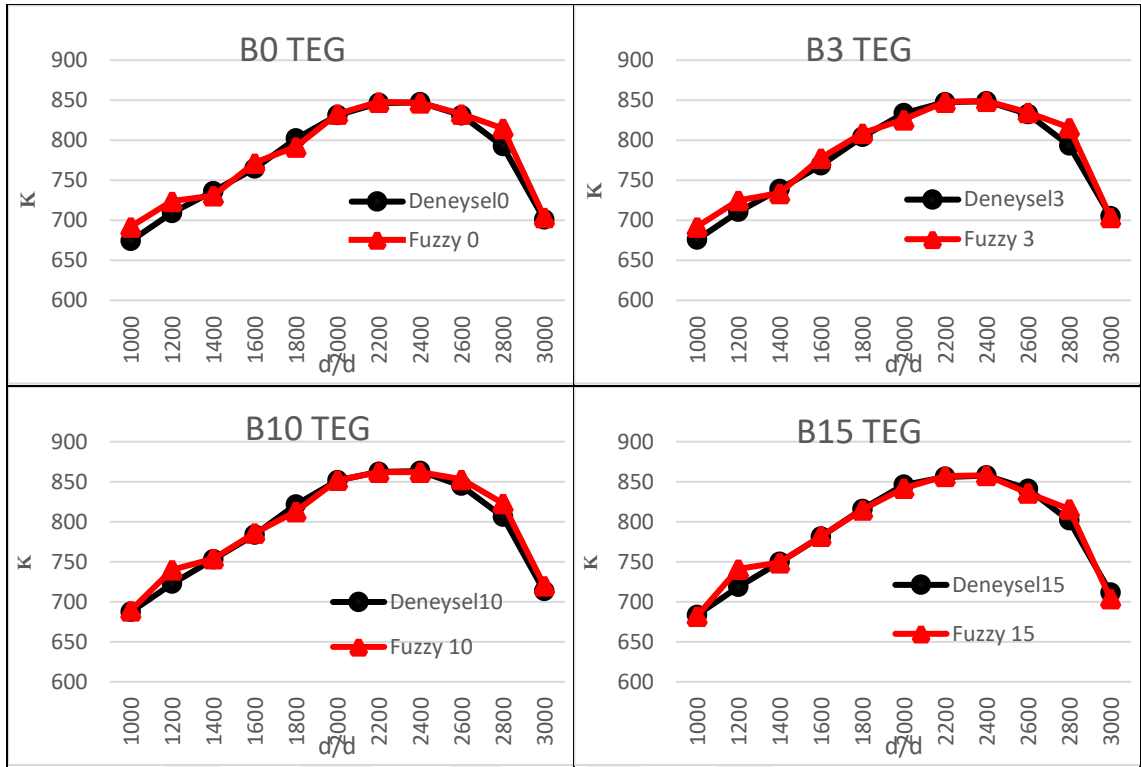
Elde edilen veriler ile ölçülen deneysel verilerin karşılaştırılması Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te verilmiştir. Regresyon analizleri Çizelge 4.11'de ve karşılaştırma grafiği Şekil 4.31'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. TEG regresyon analizleri

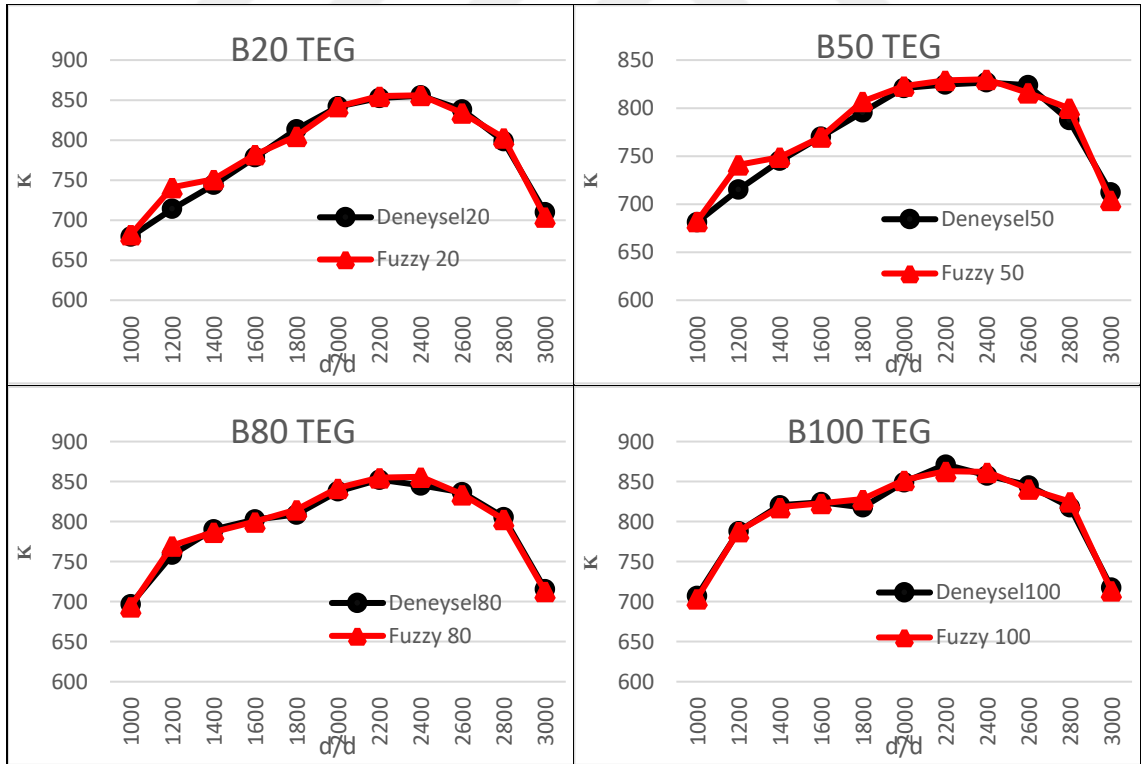
Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.99001
R Kare	0.98012
Ayarlı R Kare	0.979889
Standart Hata	8.244106
MAD	6.134473
MSE	77.11107
RMSE	8.781291
Gözlem	88



Şekil 4.31. TEG için karşılaştırma grafiği



Şekil 4.32. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan TEG değerleri (B0-B15)

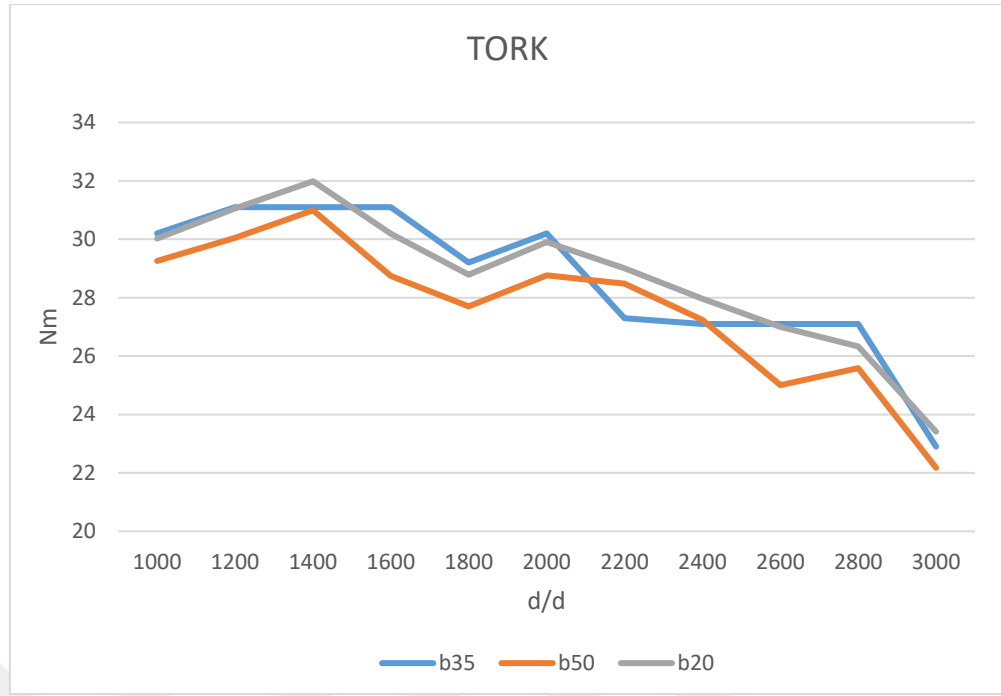


Şekil 4.33. Ölçülen ve bulanık mantıkla hesaplanan TEG değerleri (B20-B100)

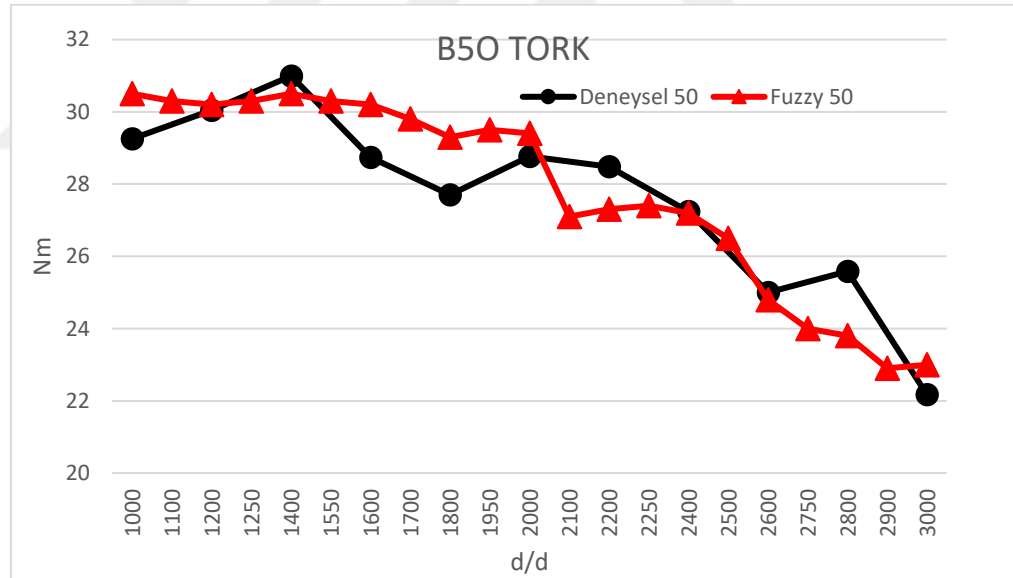
4.12. Deneysel Çalışması Yapılmayan Değerlerin Tahmini

Deneylerde ölçümü yapılamayan ara devirler ile karışımlar için de tahmin işlemi gerçekleştirilmiştir. B50 yakıtı için ölçümleri yapılmamış/yapılamayan 1100, 1250, 1550, 1700, 1950, 2100, 2250, 2500, 2750 ve 2900 ara devirler ile deneyler esnasında karışımı yapılmamış B35 yakıtının tahmini yapılmış ve sonuçlar aşağıda Şekil 4.34 ila Şekil 4.55'te verilen grafiklerde gösterilmiştir. Grafiklerde görüldüğü üzere deney yapılmayan verilerin tahmin sonuçları, beklendiği gibi olması gereken değerlere yakın şekilde çıkmıştır. Bu şekilde 1000 ile 3000 devir arasında istenilen değerlerde hesaplama yapılabilir. Aynı şekilde yakıt karışımları için de B0 ile B100 arasında istenilen karışım için uygulanabilir.

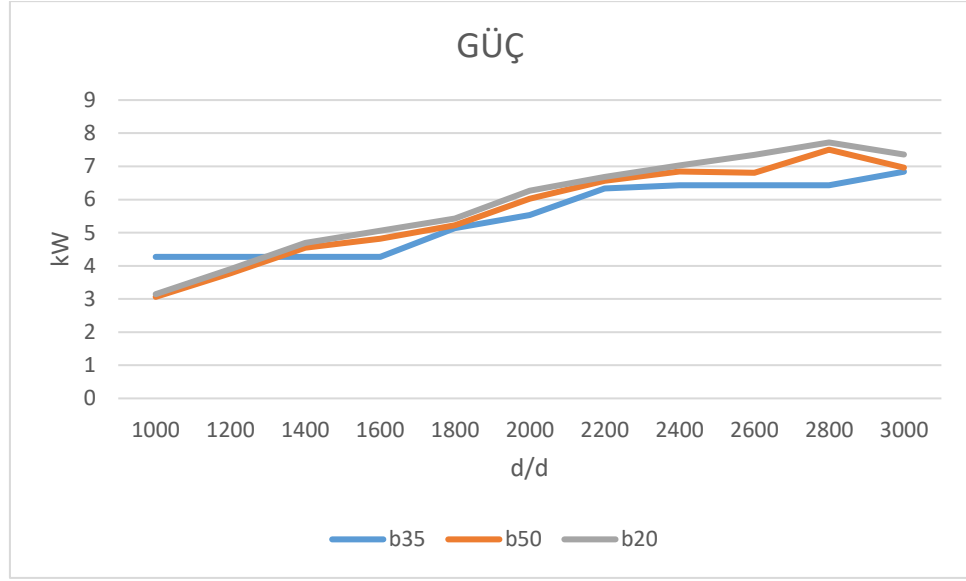




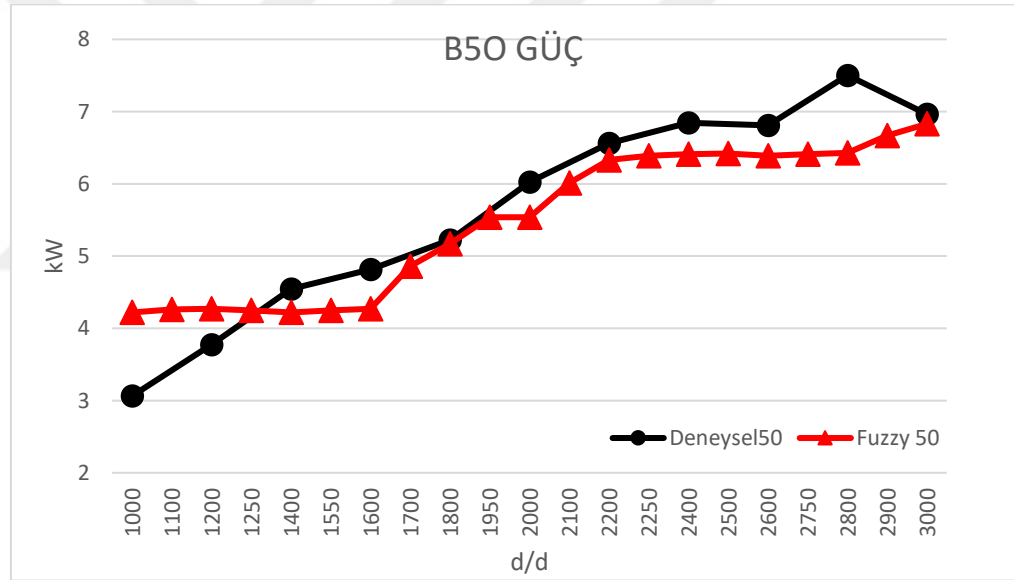
Şekil 4.34. Karışımı olmayan b35 yakıt tahmin sonuçlarının, b20 ve b50 yakıtları ile motor torku karşılaştırılması



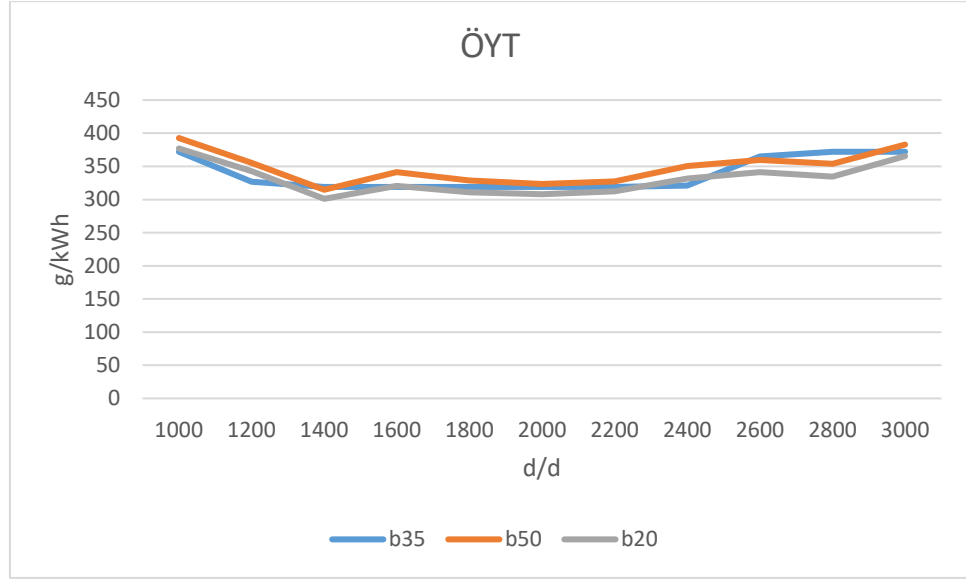
Şekil 4.35. B50 yakıtıyla ölçümleri olmayan bazı motor devirleri ve ölçülen motor tork değerleri



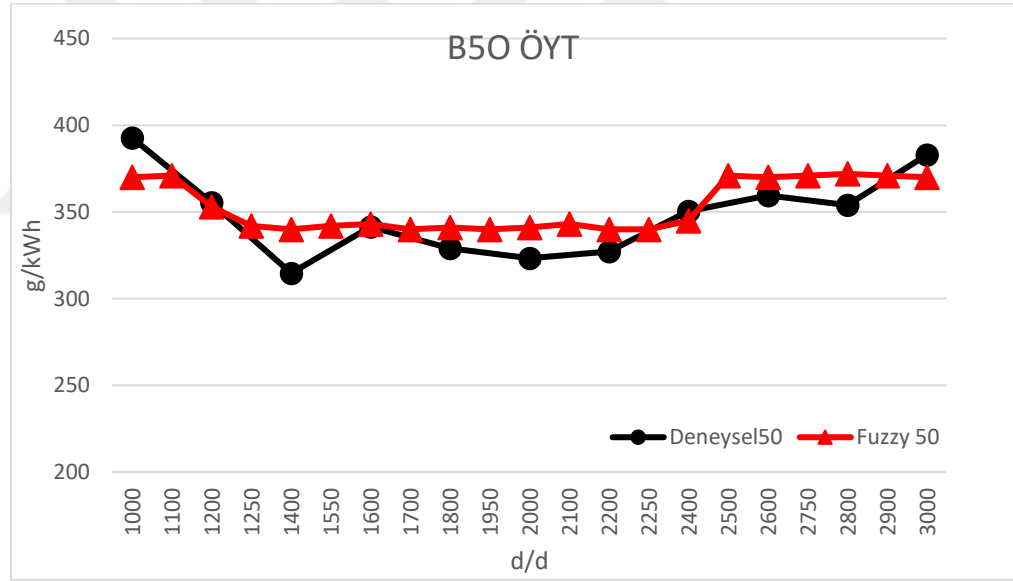
Şekil 4.36. Karışımı olmayan b35 yakıt tahmin sonuçlarının, b20 ve b50 yakıtları ile motor gücü karşılaştırılması



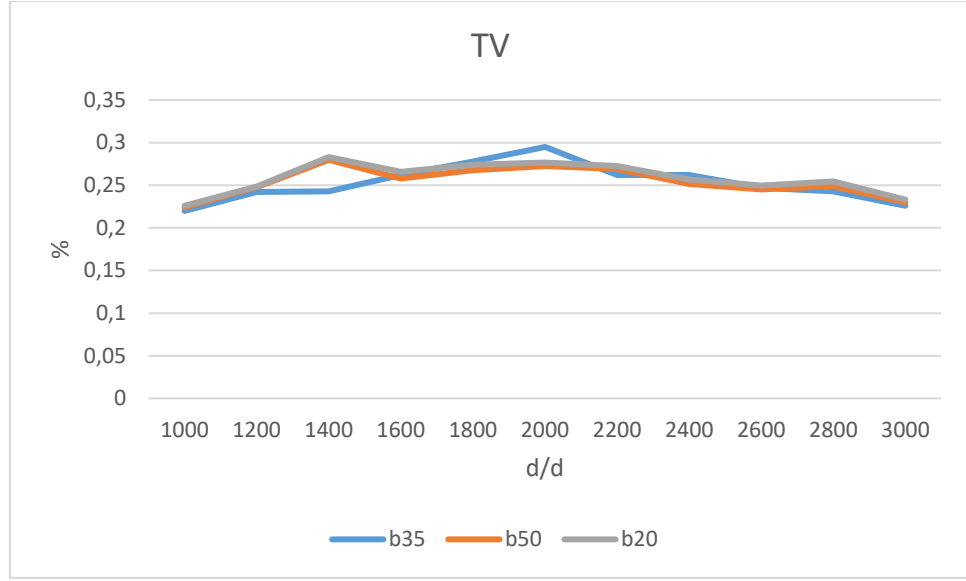
Şekil 4.37. B50 yakıtıyla ölçümleri olmayan bazı motor devirleri ve ölçülen motor güç değerleri



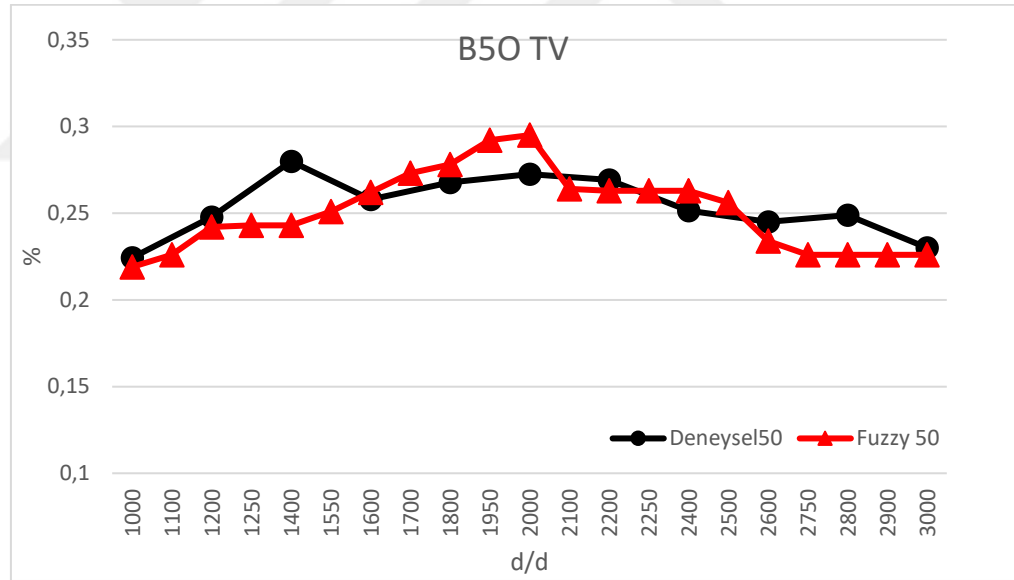
Şekil 4.38. Karışımı olmayan b35 yakıt tahmin sonuçlarının, b20 ve b50 yakıtları ile ÖYT karşılaştırılması



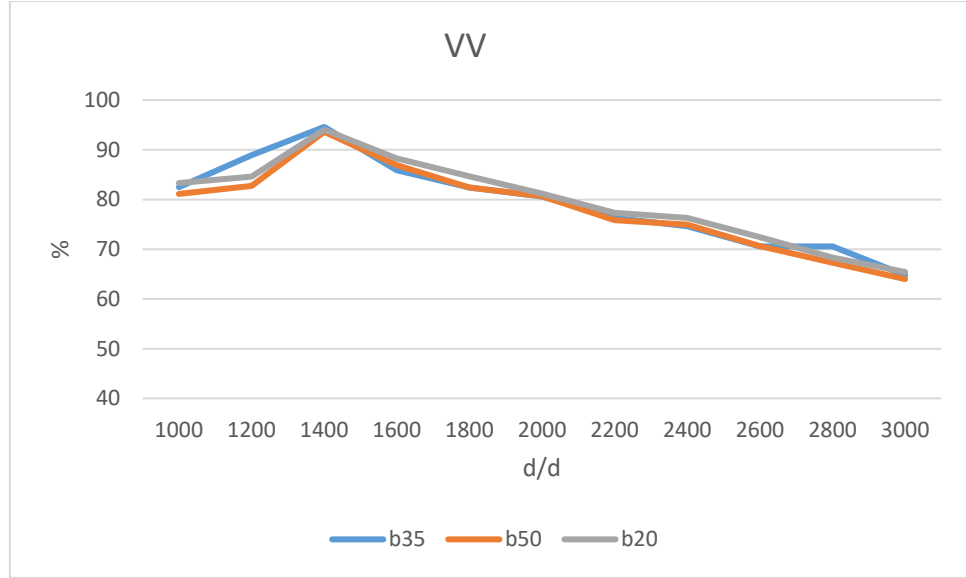
Şekil 4.39. B50 yakıtıyla ölçümleri olmayan bazı motor devirleri ve ölçülen ÖYT değerleri



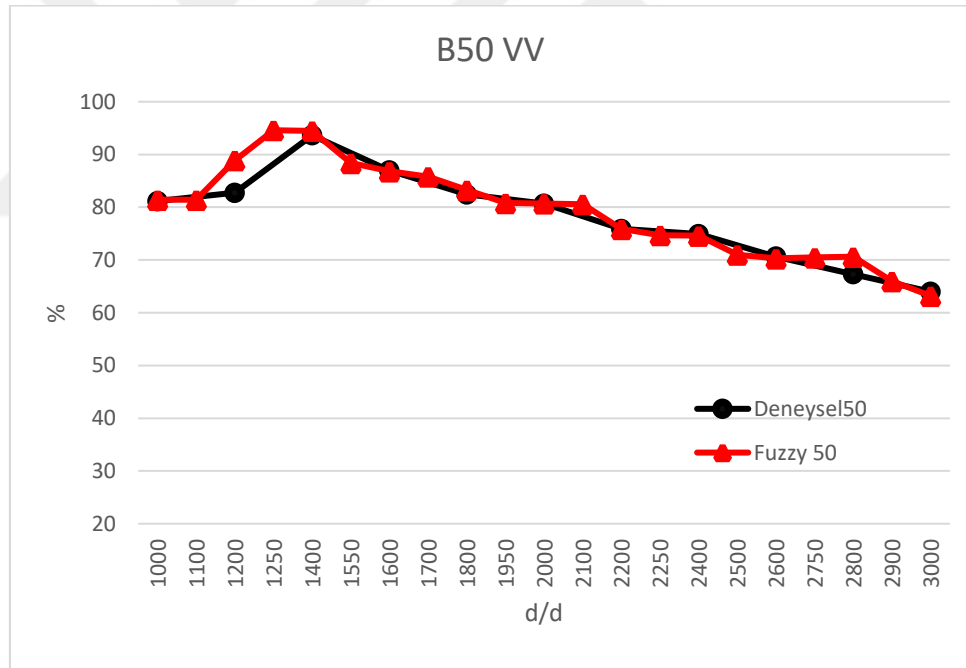
Şekil 4.40. Karışımı olmayan b35 yakıt tahmin sonuçlarının, b20 ve b50 yakıtları ile TV karşılaştırılması



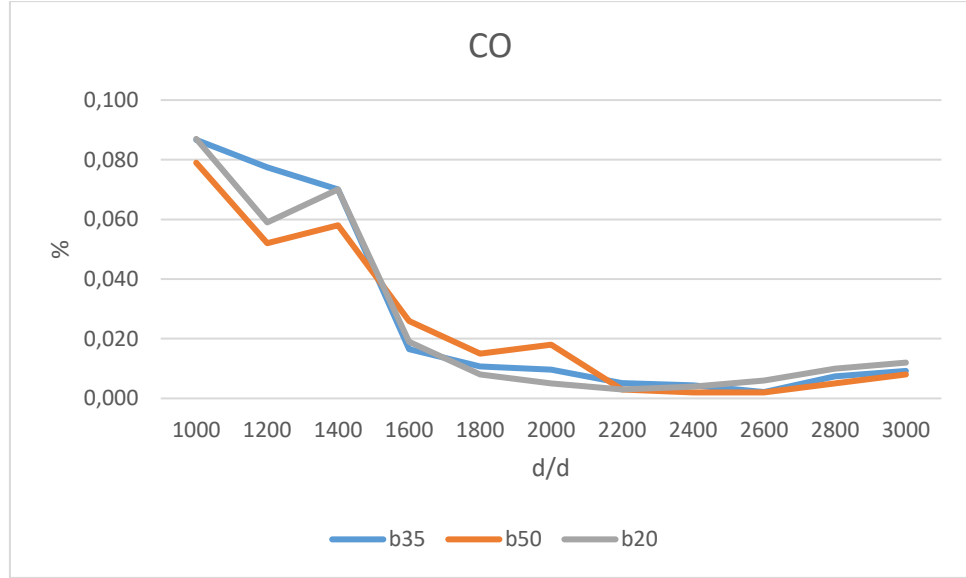
Şekil 4.41. B50 yakıtıyla ölçümleri olmayan bazı motor devirleri ve ölçülen TV değerleri



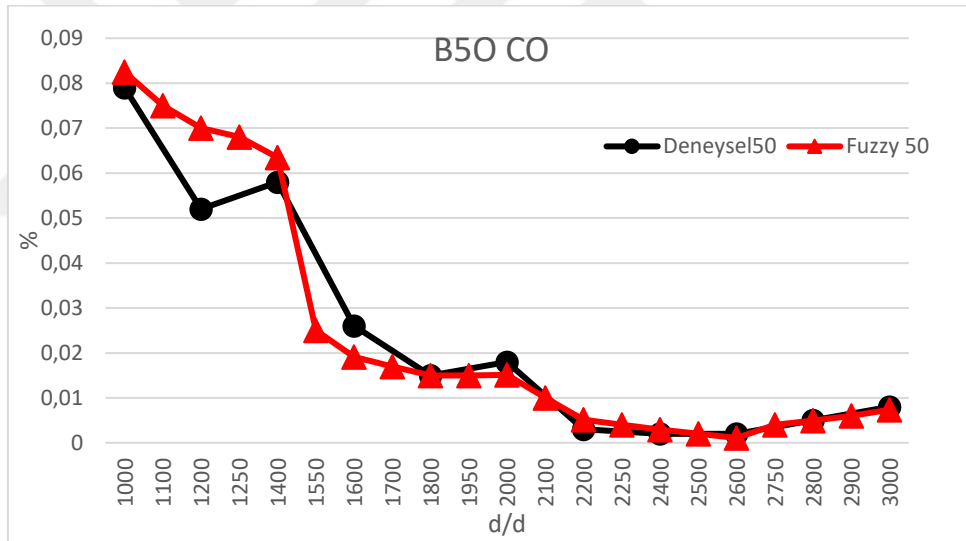
Şekil 4.42. Karışımı olmayan b35 yakıt tahmin sonuçlarının, b20 ve b50 yakıtları ile VV karşılaştırılması



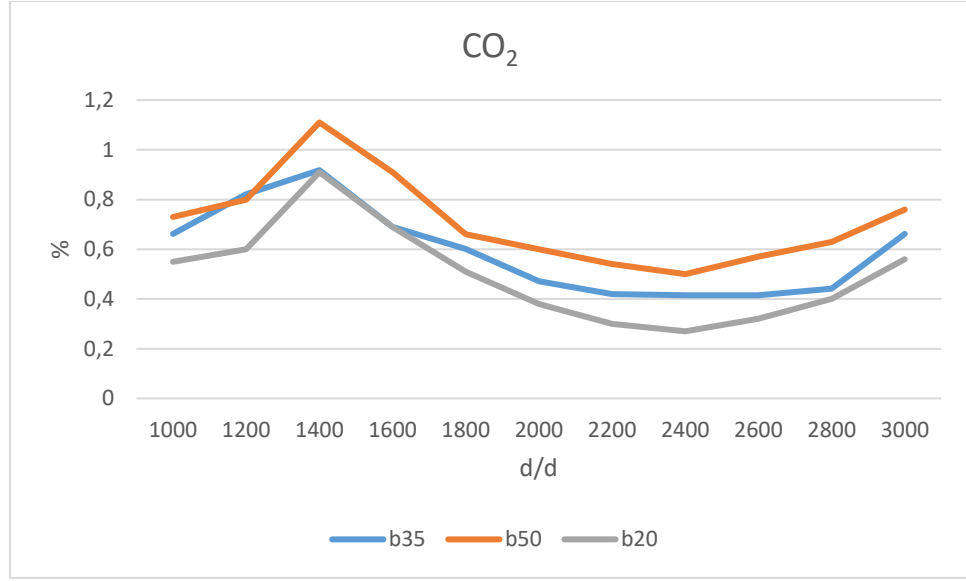
Şekil 4.43. B50 yakıtıyla ölçümleri olmayan bazı motor devirleri ve ölçülen VV değerleri



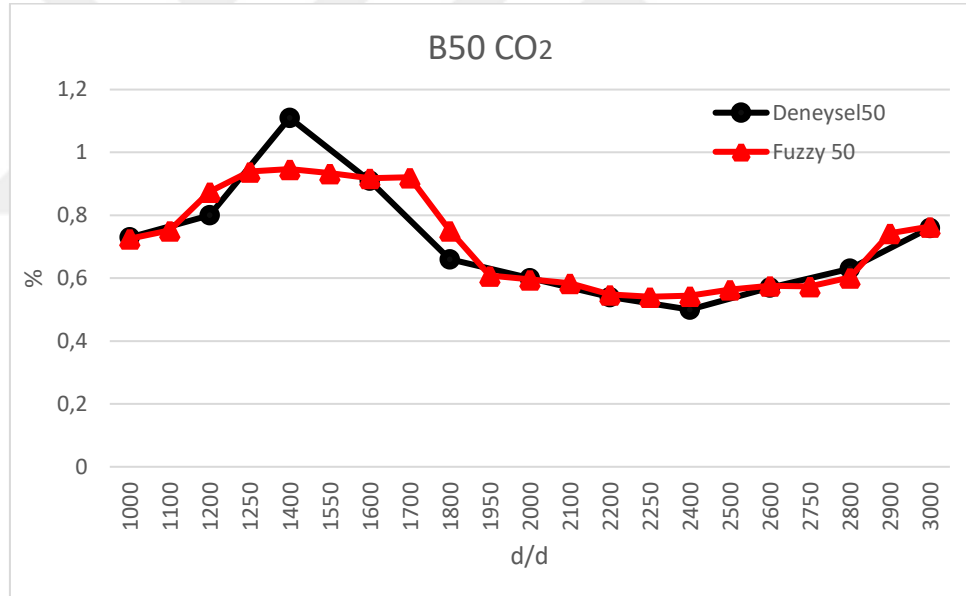
Şekil 4.44. Karışımı olmayan b35 yakıt tahmin sonuçlarının, b20 ve b50 yakıtları ile CO karşılaştırılması



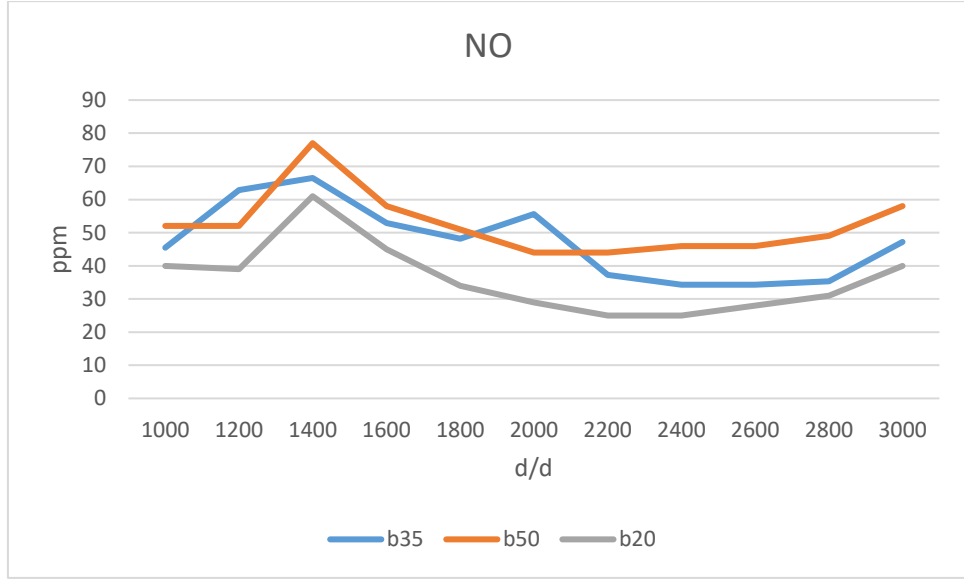
Şekil 4.45. B50 yakıtıyla ölçümleri olmayan bazı motor devirleri ve ölçülen CO değerleri



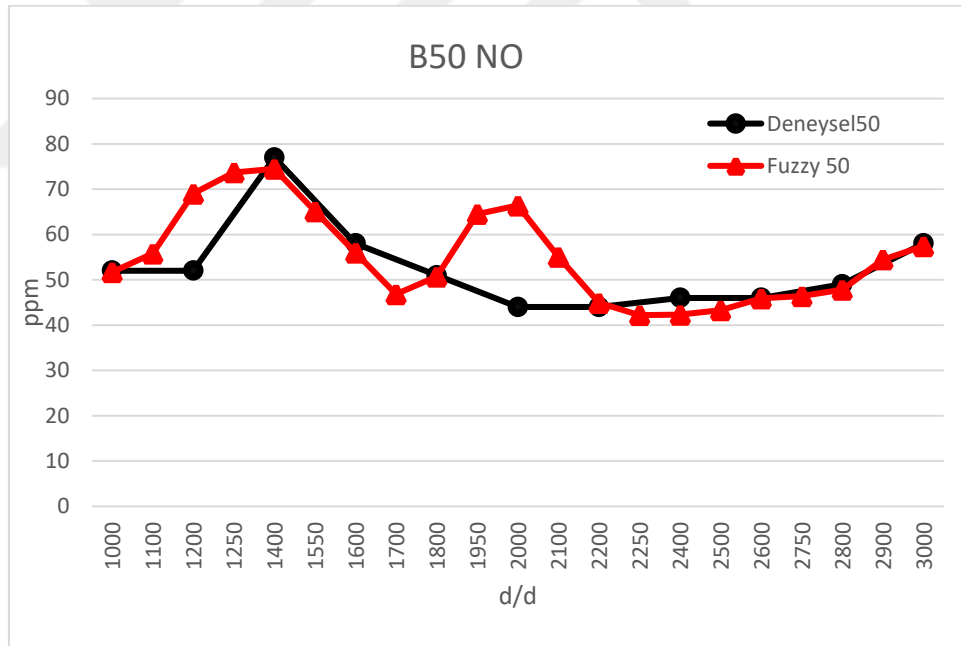
Şekil 4.46. Karışımı olmayan b35 yakıt tahmin sonuçlarının, b20 ve b50 yakıtları ile CO₂ karşılaştırılması



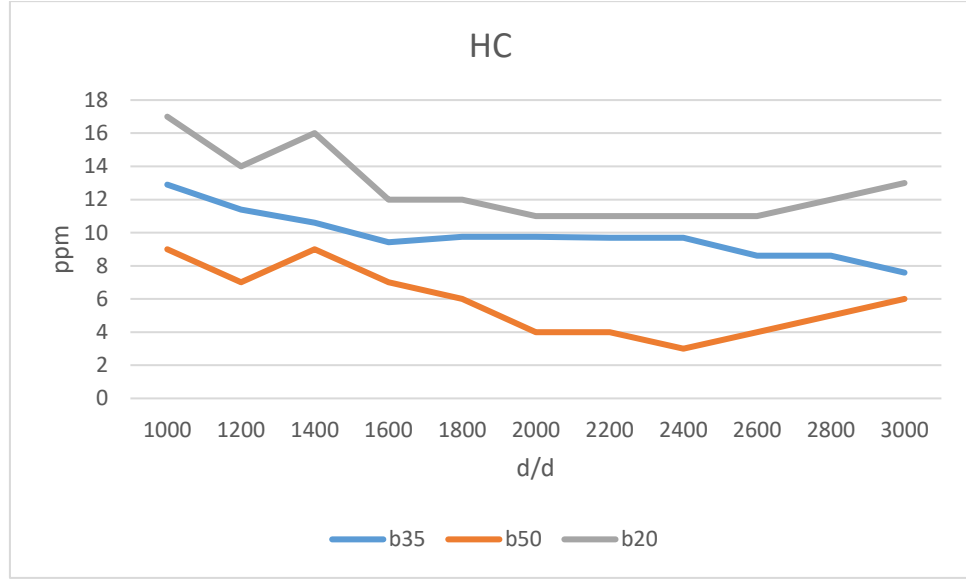
Şekil 4.47. B50 yakıtıyla ölçümleri olmayan bazı motor devirleri ve ölçülen CO₂ değerleri



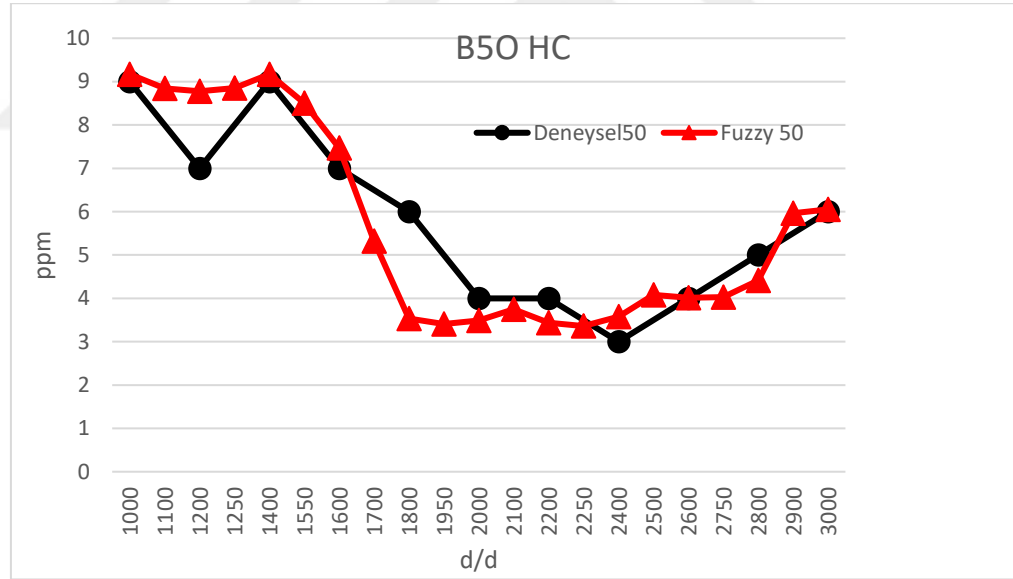
Şekil 4.48. Karışımı olmayan b35 yakıt tahmin sonuçlarının, b20 ve b50 yakıtları ile NO karşılaştırılması



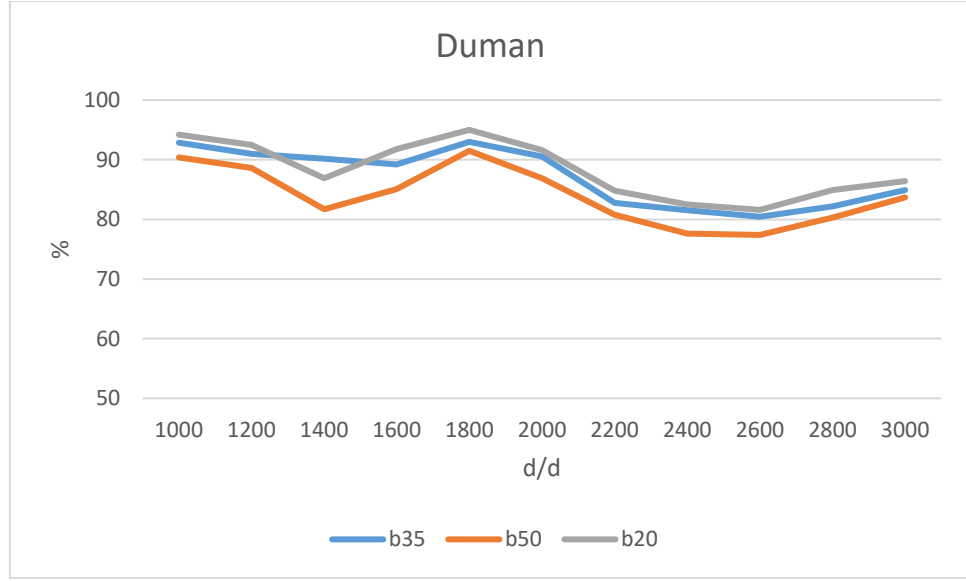
Şekil 4.49. B50 yakıtıyla ölçümleri olmayan bazı motor devirleri ve ölçülen NO değerleri



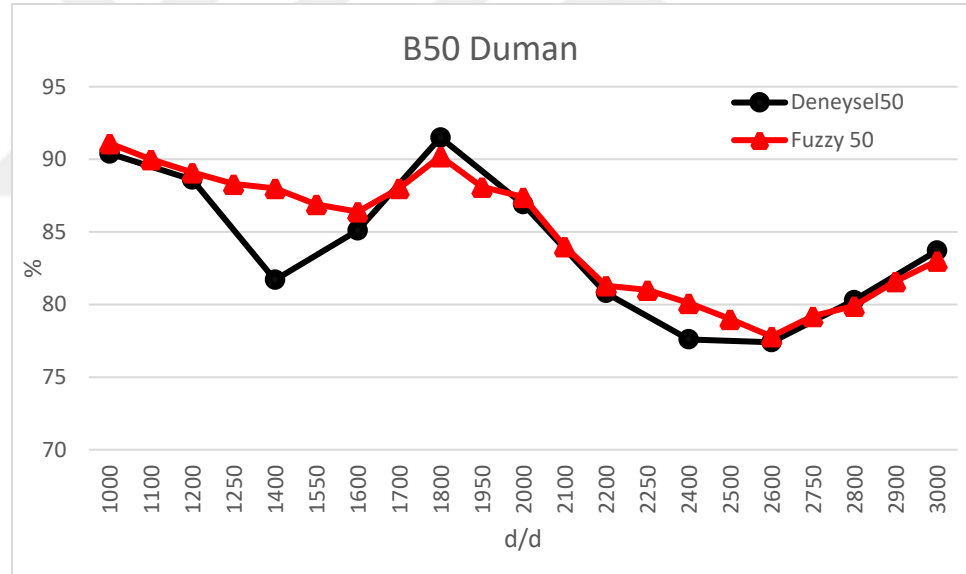
Şekil 4.50. Karışımı olmayan b35 yakıt tahmin sonuçlarının, b20 ve b50 yakıtları ile HC karşılaştırılması



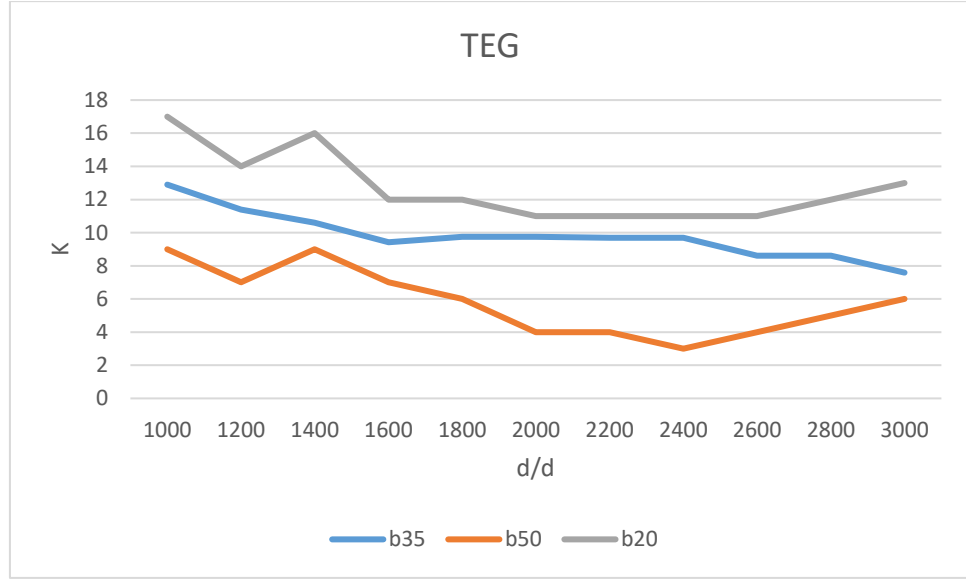
Şekil 4.51. B50 yakıtıyla ölçümleri olmayan bazı motor devirleri ve ölçülen HC değerleri



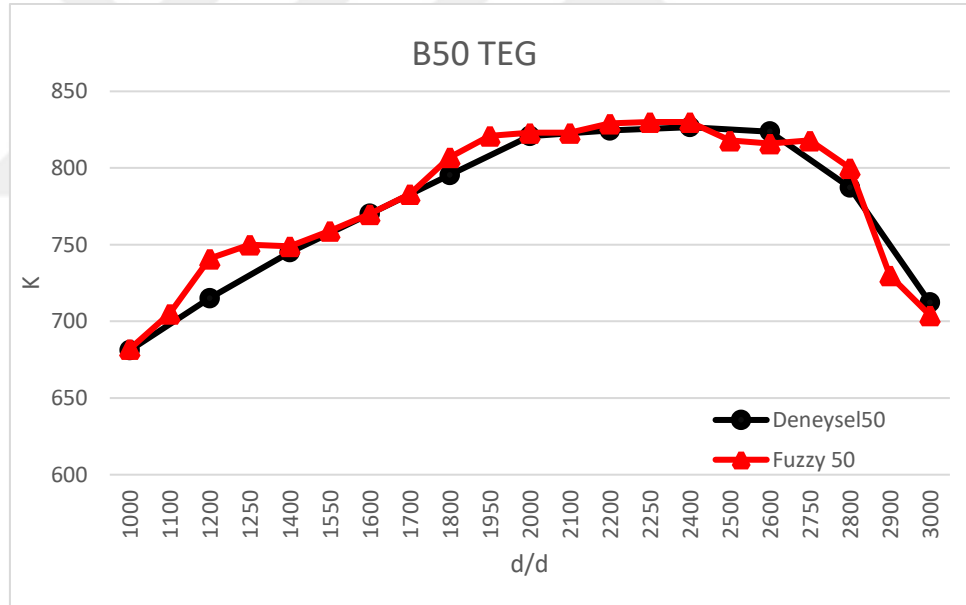
Şekil 4.52. Karışımı olmayan b35 yakıt tahmin sonuçlarının, b20 ve b50 yakıtları ile Duman karşılaştırılması



Şekil 4.53. B50 yakıtıyla ölçümleri olmayan bazı motor devirleri ve ölçülen Duman değerleri



Şekil 4.54. Karışımı olmayan b35 yakıt tahmin sonuçlarının, b20 ve b50 yakıtları ile TEG karşılaştırılması



Şekil 4.55. B50 yakıtıyla ölçümleri olmayan bazı motor devirleri ve ölçülen TEG değerleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bir dizel motor ile yapılan deneyler sonucu elde edilen Tork, Güç, ÖYT, VV, TV, CO, CO₂, HC, NO_x, Duman ve egzoz sıcaklığı (TEG) parametrelerinin sayısal değerleri tip-2 bulanık mantık ile modellenerek tahminleme yapılmıştır. Tahmin edilen değerler 0.983414994 ile 0.896687983 arasında değişen korelasyon katsayıları vermektedir. Geliştirilen bulanık model ile elde edilen değerlerin korelasyon katsayıları, TORK 0.96131002, GÜÇ 0.958585467, ÖYT 0.931075, TV 0.901124, VV 0.979435, HC 0.984356, NO_x 0.900835, CO₂ 0.944036, CO 0.979688887, DUMAN 0.977626583 ve TEG 0.99001 şeklinde olmuştur. Bu değerlere bakıldığında bulanık mantık ile yapılan tahminlerin başarılı olduğu görülmektedir. Yapılan karşılaştırmalar, dizel ve biyodizel yakıtlar kullanılarak dizel motorlarının doğru bir şekilde bulanık mantık ile modellemesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Bu tip bir bulanık mantık tahminleme modeli, üreticiler ve uygulama mühendisleri için farklı devirler ile motorun işletme koşullarını farklı yakıt karışımlarıyla tahmin etmek için yararlı olabilir. Daha çok veri ve daha fazla sayıda üyelik fonksiyonu ile birlikte oluşturulacak kuralların sayısının da artırılması ile daha da başarılı sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Abed, K., El Morsi, A. K., Sayed, M. M., El Shaib, A. ve Gad, M., 2018, Effect of waste cooking-oil biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine, *Egyptian journal of petroleum*, 27 (4), 985-989.
- Akçay, M., Yılmaz, İ. T., Feyzioğlu, A. ve Özer, S., 2019, Sıkıştırma ile ateşlemeli bir motora hidrojen ilavesinin egzoz emisyonlarına etkisi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34 (3), 21-34.
- Alçelik, N., 2017, Atık yağlardan üretilen biyodizelin tek silindirli bir dizel motorun performans, egzoz emisyonları ve titreşimine olan etkilerinin incelenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce*.
- Alptekin, E., 2013, Hayvansal atık yağlardan biyodizel üretimi ve bir dizel motorda kullanımının incelenmesi.
- An, H., Yang, W., Maghbouli, A., Li, J., Chou, S. ve Chua, K., 2013, Performance, combustion and emission characteristics of biodiesel derived from waste cooking oils, *Applied energy*, 112, 493-499.
- Antão, R., 2017, Type-2 fuzzy logic: uncertain systems' modeling and control, Springer, p.
- Atin, M., 1999, Bulanık Lineer Programlama (Basılmamış Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Ayaz, İ., 2014, Dizel motorlarda biyo-etanol biyo-dizel ve dizel yakıtı karışımlarının motor yüküne bağlı olarak kullanılabilirliğinin deneysel araştırılması.
- Aydın, M., Afşar, M. ve Çelik, M. B., 2017, Tek silindirli bir dizel motorda atık biyodizel kullanımının motor performansı ve emisyonlarına etkisi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21 (5), 871-878.
- Balasubramanian, D., Hoang, A. T., Venugopal, I. P., Shanmugam, A., Gao, J. ve Wongwuttanasatian, T., 2021, Numerical and experimental evaluation on the pooled effect of waste cooking oil biodiesel/diesel blends and exhaust gas recirculation in a twin-cylinder diesel engine, *Fuel*, 287, 119815.
- Calam, A., 2020, Atık Kızartma Yağı Biyodizeliyle Çalışan Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorun Yanma Performans ve Emisyon Özellikleri, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 22 (64), 97-106.
- Canakci, M., Erdil, A. ve Arcaklioğlu, E., 2006, Performance and exhaust emissions of a biodiesel engine, *Applied energy*, 83 (6), 594-605.
- Castillo, O., Melin, P., Castillo, O. ve Melin, P., 2008, 3 Type-2 Fuzzy Logic, *Type-2 fuzzy logic: theory and applications*, 29-43.
- Cheng, C.-H., Yang, K.-L. ve Hwang, C.-L., 1999, Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight, *European journal of operational research*, 116 (2), 423-435.
- Chuah, L. F., Aziz, A. R. A., Yusup, S., Bokhari, A., Klemeš, J. J. ve Abdullah, M. Z., 2015, Performance and emission of diesel engine fuelled by waste cooking oil methyl ester derived from palm olein using hydrodynamic cavitation, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 2229-2241.
- Çat, S., 2012, Dizel motorda atık biyodizel kullanımının performans ve emisyonlara etkisi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Çelebi, Y., 2017, Bütanol katkısının bir dizel motorda yakıt olarak biyodizel kullanımına etkilerinin deneysel araştırılması, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.

- Delavari, A., Halek, F. ve Amini, M., 2015, Continuous biodiesel production in a helicoidal reactor using ultrasound-assisted transesterification reaction of waste cooking oil, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 273-279.
- Devrim, E., 2019, Tip-2 bulanık küme yaklaşımı ile kusur sayısı kontrol diyagramlarının tasarımı ve otomotiv sektöründen bir gerçek hayat uygulaması, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Dey, S., Reang, N. M., Majumder, A., Deb, M. ve Das, P. K., 2020, A hybrid ANN-Fuzzy approach for optimization of engine operating parameters of a CI engine fueled with diesel-palm biodiesel-ethanol blend, *Energy*, 202, 117813.
- Dwivedi, G., Sharma, M., Verma, P. ve Kumar, P., 2018, Engine performance using waste cooking biodiesel and its blends with kerosene and ethanol, *Materials Today: Proceedings*, 5 (11), 22955-22962.
- Firoz, S., 2017, A review: advantages and disadvantages of biodiesel, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4 (11), 530-533.
- Gad, M. ve Ismail, M. A., 2021, Effect of waste cooking oil biodiesel blending with gasoline and kerosene on diesel engine performance, emissions and combustion characteristics, *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 1-10.
- Gokalp, B., Metin Ertunc, H., Hosoz, M. ve Ibrahim Sarac, H., 2010, Performance prediction of a CI engine using artificial neural network for various SME and diesel fuel blends, *International Journal of Vehicle Design*, 54 (2), 156-176.
- Gonzalez, C. I., Melin, P. ve Castillo, O., 2017, Edge detection method based on general type-2 fuzzy logic applied to color images, *Information*, 8 (3), 104.
- Gündüz, İ., 2017, Etanol katkılı kızartma yağlarının bir dizel motorunda kullanılabilirliğinin araştırılması/Investigating the utility ethanol added waste frying oils in a diesel engine.
- Hajlari, S. A., Najafi, B. ve Ardabili, S. F., 2019, Castor oil, a source for biodiesel production and its impact on the diesel engine performance, *Renewable Energy Focus*, 28, 1-10.
- Hakan Akpolat, Z., 2005, Non-singleton fuzzy logic control of a dc motor, *Journal of Applied Sciences*, 5 (5), 887-891.
- Ilangkumaran, M., Sakthivel, G., Syam Kumar, U., Vasudevan, M., Venkatesh, S. ve Viswanathan, B., 2015, Development of fuzzy logic model to predict the engine performance of fish oil biodiesel with diethyl ether, *International Journal of Ambient Energy*, 36 (3), 142-154.
- İlker, Ö., Ciniviz, M. ve SAYIN, B., 2021, Atık Kızartma Yağı Biyodizelinin Performans, Emisyon ve Yanma Karakteristiklerinin Pamuk Yağı ve Aspir Yağı Biyodizelleri ile Karşılaştırılması, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 37 (3), 392-403.
- İnal, A., 2017, Haşhaş yağından üretilen biyodizelin motor performansına etkisi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kıvrak, A. N., 2023, Dizel-Biyodizel-Bütanol ve Biyodizel-Bütanol Karışımlarının Performans ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*.
- Koca, G. Ö., Akpolat, Z. H. ve Özdemir, M., 2010, Dört-Kol Mekanizması için Tip-2 Bulanık Mantık Tabanlı bir Kontrolör Tasarımı, *Firat University Journal of Engineering Science*, 22 (2).
- Koçer, N. N. ve Durmuş, B., 2019, Atık yağlardan elde edilen biyodizel potansiyeli ve gliserol miktarının belirlenmesi, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 69-80.

- Kumar, N., 2010, Varun, and A. Kumar. 2010. "Biodiesel as an Alternative Fuel for CI Engines: Environmental Effect.", *Indian Journal of Science and Technology*, 3 (6), 602-606.
- Kumar, N., Yadav, K. ve Chaudhary, R., 2023, ANN prediction approach analysis for performance and emission of antioxidant-treated waste cooking oil biodiesel, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20 (11), 12581-12596.
- Makinist, S., 2013, İnsan hareketlerinin Tip-2 bulanık mantık tabanlı analiz ve simülasyonu, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- mathworks, 2024, <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/type-2-fuzzy-inference-systems.html>, [28.01.2024].
- Melin, P. ve Castillo, O., 2013, Type-2 Fuzzy Logic in Image Analysis and Pattern Recognition, *Advances in Type-2 Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*, 187-201.
- Mendel, J. M., 2017, Uncertain rule-based fuzzy systems, *Introduction and new directions*, 684.
- Namitha, S. ve Shantharama, R., 2013, Fuzzy Logic Controller for the Speed Control of an IC engine using MATLAB/SIMULINK, *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2 (2), 124-127.
- Nguyen, T. V., Nguyen, K. D., Ho, N. X. ve Nguyen, V. D., 2020, Engine performance and combustion characteristics of a direct injection compression ignition engine fueled waste cooking oil synthetic diesel, *International Journal of Coal Science & Technology*, 7 (3), 560-570.
- Örs, İ., 2014, Biyoyakıt kullanan bir dizel motorunun performans, yanma ve emisyon analizi.
- Örs, İ. ve Bakırcıoğlu, V., 2016, An experimental and ANNs study of the effects of safflower oil biodiesel on engine performance and exhaust emissions in a CI engine, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 5 (3), 125-135.
- Örs, İ., Sarıkoç, S. ve Yelbey, S., 2022, Experimental Investigation of Biodiesel and Acetylene Dual Fuel Use in a Diesel Engine with RCCI Approach.
- Özek, M. B., 2010, BULANIK MANTIK YÇYN YENY BYR YAKLA? IM: TYP-2 BULANIK MANTIK, *Engineering Sciences*, 5 (3), 541-557.
- Özgün, A. K., 2014, Atık kızartma yağı ve nötrale atık kızartma yağından üretilen biyodizel ve karışımlarının motor performans ve egzoz emisyonlarının karşılaştırılması olarak incelenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Öztürk, M., PAKSOY, T. ve ÖZTÜRK, M., 2017, Aralık tip-2 bulanık mantık yönteminin tedarikçi seçiminde kullanımının önemi üzerine bir araştırma, *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 10 (2), 1-18.
- Pradhan, J. P. ve Singh, B., 2020, Experimental investigation on performance of a CI Engine using waste cooking oil biodiesel blends with alcohol and Nanoparticle additives as fuel, *Materials Today: Proceedings*, 24, 1332-1339.
- Rajak, U., Singh, T. S., Verma, T. N., Chaurasiya, P. K., Shaik, S., Afzal, A., Cuce, E., Rajhi, A. A. ve Saleel, C. A., 2022, Experimental and parametric studies on the effect of waste cooking oil methyl ester with diesel fuel in compression ignition engine, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102705.
- Ranjan, A., Dawn, S., Jayaprabakar, J., Nirmala, N., Saikiran, K. ve Sriram, S. S., 2018, Experimental investigation on effect of MgO nanoparticles on cold flow properties, performance, emission and combustion characteristics of waste cooking oil biodiesel, *Fuel*, 220, 780-791.

- Roy, S., Banerjee, R. ve Bose, P. K., 2014, Performance and exhaust emissions prediction of a CRDI assisted single cylinder diesel engine coupled with EGR using artificial neural network, *Applied energy*, 119, 330-340.
- Sakthivel, G., Snehikumar, B. ve Ilangkumaran, M., 2016, Application of fuzzy logic in internal combustion engines to predict the engine performance, *International Journal of Ambient Energy*, 37 (3), 273-283.
- Sanli, H., 2018, An experimental investigation on the usage of waste frying oil-diesel fuel blends with low viscosity in a Common Rail DI-diesel engine, *Fuel*, 222, 434-443.
- Sarıdemir, S., 2016, Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarının Motor Gürültü Ve Egzoz Emisyonlarına Olan Etkisi, *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016) 3-5 Nov 2016 Alanya/Antalya-Turkey*.
- Sathish, T., Muthukumar, K., Abdulwahab, A., Rajasimman, M., Saravanan, R. ve Balasankar, K., 2023, Enhanced waste cooking oil biodiesel with Al₂O₃ and MWCNT for CI engines, *Fuel*, 333, 126429.
- Shanmugam, P., Sivakumar, V., Murugesan, A. ve Ilangkumaran, M., 2011, Performance and exhaust emissions of a diesel engine using hybrid fuel with an artificial neural network, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33 (15), 1440-1450.
- Şanlı, H., 2014, Atık kızartma yağlarının karakterizasyonu ve biyodizel üretiminde değerlendirilmesi.
- Şen, Z., 2004, Mühendislikte bulanık (fuzzy) mantık ile modelleme prensipleri, Su Vakfı, p.
- Vilela, L., Mata, T. ve Caetano, N., 2010, Biodiesel production from fish oil with high acidity, *3rd international symposium on energy from biomass and waste, Italy*, 1-14.
- Yasar, A., Kul, B. S. ve Ciniviz, M., 2022, Modeling the Performance of Fuzzy Expert System for Prediction of Combustion, Engine Performance, and Exhaust Emission Parameters of a Spark Ignition Engine Fueled With Waste Bread Bioethanol-Gasoline Blends, *Journal of Energy Resources Technology*, 144 (12), 122305.
- Yildiz, M., 2008, Atık yağlardan biyodizel üretimi ve karakterizasyonu, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.