



**ELEKTRİK SAYAÇLARINDA HATA ORANINA DEĞİŞKEN
PARAMETRELERİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ VE YAPAY SİNİR AĞI
İLE HATA TAHMİNİ**

Murat TAŞCI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Murat TAŞCI
05/01/2024

ELEKTRİK SAYAÇLARINDA HATA ORANINA DEĞİŞKEN PARAMETRELERİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ VE YAPAY SINIR AĞI İLE HATA TAHMİNİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Murat TAŞCI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Ülkemizde milyonlarca elektrik sayacı kullanıcısı bulunmaktadır. Yasal mevzuat kapsamında izin verilen elektrik sayacının çalışması sırasındaki hatalar abonelerin lehine veya aleyhine olabilmektedir. Dolayısıyla, bu çalışma hataları sayaç abonelerinin kullanım ücretlerini ciddi bir şekilde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, çalışma hatasına etki eden parametrelerin etkisini bilmek ve bu değişkenler dikkate alınarak sayacın kullanılacağı bölgeye göre sayaç üretimi ve seçiminin yapılması önem arz etmektedir. Ayrıca, bu durumun, elektrik dağıtım şirketlerinin çalışma verimliliğini arttırmasına, sayaç imalatçısının mevcut hata değerini minimize ederek mevcut tasarımını geliştirmesine ve ilgili Kamu Kurumlarının yapacağı düzenleyici ve denetleyici faaliyetlerinin etkinliğinin ve verimliliğinin artmasına imkân oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Bu çalışmada; öncelikle, akım, gerilim, frekans, sıcaklık, harmonik bozulma oranı, aktif ve reaktif güç tüketimi ve sayaç sabitesi gibi belirli parametrelerin değişimlerinin elektrik sayacının çalışması sırasında ortaya çıkan hata miktarlarına etkilerini inceleyen tip testleri araştırılmıştır. Sonrasında, elektrik sayacının yasal olarak teknik düzenlemesine uygun bir şekilde piyasaya arz edilebilmesi için gerekli olan tip onay raporlarında yer alan gerçek veriler kullanılarak korelasyon ve regresyon analizi yapılarak etkileri incelenmiştir. Akabinde, Matlab programı ile uygun bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuş ve minimum hata ve maksimum anlamlılık değerleri ile bu model optimize edilmiştir. Son olarak; belirli sıcaklık, akım, frekans ve güç faktörlerindeki durumlarda, birçok hata tahmini yapılarak kabul edilebilir seviyede sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada, elde edilen tüm bilgi ve sonuçlar sayaç imalatçıları, dağıtım şirketleri ve ilgili Kamu Otoritesi Kurumlar açısından değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, uygun yapay sinir ağı modelinin kullanımı ile mevcut çalışmaların etkinliğinin ve verimliliğinin arttırılabileceği gösterilmiş olup bu sayede ülkemizin bu alandaki kalite altyapısının geliştirilmesine önemli seviyede katkıda bulunulduğu düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 90517

Anahtar Kelimeler : Elektrik sayacı, hata tahmini, maksimum izin verilebilir hata, metroloji, yapay sinir ağı

Sayfa Adedi : 105

Danışman : Dr. Öğretim Üyesi Hıdır DÜZKAYA

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF VARIABLE PARAMETERS ON THE ERROR
RATE IN ELECTRICITY METERS AND ERROR ESTIMATION WITH ARTIFICIAL
NEURAL NETWORK

(M. Sc. Thesis)

Murat TAŞCI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

There are millions of electricity meter subscribers in Turkey. In scope of legal legislation, the operating error of an electricity meter may be in favor or against the subscriber within in the legal limit. So, this operating error may affect the usage fees of the subscribers significantly. Therefore, knowing and taking into consideration of the impact of the parameters that affect the operating error is important to produce and select the meter according to the region where the meter is used. Also, it is evaluated that it may provide an opportunity to electricity distribution companies to increase the operating efficiency, electricity meter manufacturers to improve its current meter design by minimizing the working error value and relevant Public Departments to increase the efficiency and productivity of their regulatory and supervisory activities. In this study; firstly, the type approval tests which are relevant to examining the impact of variation of an electricity meter's parameters such as current, voltage, frequency, temperature, harmonic distortion rate, active and reactive power consumption and meter constant on the working conditions have been researched. Then, the correlation and regression analysis were made by using the actual data in the type approval reports which are required to be placed on the market legally in accordance with the technical regulations and the impact of result was examined. Afterwards, a suitable artificial neural network model was created with the Matlab program and then this model was optimized by minimizing error and maximizing the significance values. Eventually, at the particular temperature, current, frequency and power factor condition some prediction of working error was made and acceptable results were obtained. In this study, all information and results which are obtained were evaluated in terms of electricity meter manufacturers, distribution companies and relevant Public Departments. In this context, it is showed that the effectiveness and efficiency of existing studies of them can be increased with using suitable artificial neural network model and it is thought that a significant contribution is provided to the development of our country's quality infrastructure by this study in this field.

Science Code : 90517

Key Words : Artificial neural network, electricity meter, prediction of error, maximum permissible error, metrology

Page Number : 105

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Hıdır DÜZKAYA

TEŞEKKÜR

Tez çalışması süreci boyunca danışmanlığını yürüten, ileri görüşleri ve yönlendirmeleri ile bana geniş ufuklar açan hocam Dr. Öğretim Üyesi Hıdır DÜZKAYA ile birlikte çalışmalarına destek veren tüm hocalarıma, ayrıca katkı ve desteklerini esirgemeyen Sanayi ve Teknoloji Bakanlığındaki tüm değerli yöneticilerime ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Ayrıca, rahmetli babam Eyyüp TAŞCI ve bugünlere gelmemde emeği sonsuz olan ve beni her zaman disiplinli çalışmam için motive eden annem Fadime TAŞCI olmak üzere ilkokuldan yüksek lisansa kadar süren eğitim hayatımda desteklerini esirgemeyen öğretmenlerim ile tez sürecinde desteğini eksik etmeyen güler yüzlü eşim Meryem Turgut TAŞCI ile canım kardeşlerim Tuba ve Suat TAŞCI'ya ve çalışmama izin verdiği için hayatımın neşe kaynakları olan biricik kızlarım Nur Neva ile Fatma Sena'ya teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
3. ELEKTRİK SAYACI TİP TESTLERİ, İSTATİSTİKSEL ANALİZ YÖNTEMLERİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI.....	19
3.1. Elektrik Sayacının Metrolojik Doğruluğuna İlişkin Tip Testleri.....	20
3.1.1. Temel çalışma hatasının belirlenmesi testi.....	23
3.1.2. Gerilim değişimlerinden kaynaklı hata testi.....	24
3.1.3. Frekans değişimlerinden kaynaklı hata testi.....	25
3.1.4. Sıcaklık değişimlerinden kaynaklı hata testi.....	26
3.1.5. Harmonik bozulma hata testi.....	27
3.1.6. Maksimum izin verilebilir hatanın hesaplanması.....	28
3.2. İstatistiksel Analiz Yöntemleri.....	30
3.2.1. Korelasyon analizi.....	31
3.2.2. Karl Pearson yöntemi.....	32
3.2.3. Charles Spearman rank yöntemi.....	33
3.2.4. Regresyon analizi.....	34

Sayfa

3.2.5. Performans başarısının hesaplanması.....	36
3.2.6. R kare.....	36
3.2.7. Ortalama mutlak hata.....	37
3.2.8. Ortalama kare hatası.....	37
3.2.9. Ortalama mutlak yüzde hatası.....	38
3.3. Yapay Sinir Ağı.....	39
3.3.1. Yapısı ve özellikleri.....	40
3.3.2. Geri yayılım algoritması.....	42
3.3.3. Esnek yayılım algoritması.....	43
3.3.4. Hızlı yayılım algoritması.....	43
3.3.5. Sınıflandırılması.....	43
3.3.6. İleri beslemeli yapay sinir ağı.....	44
3.3.7. Geri beslemeli yapay sinir ağı.....	44
3.3.8. Eğitilmesi, test edilmesi ve problem çözümü.....	47
4. ANALİZ VE MODELLEME.....	51
4.1. Gerçek Test Verileri Üzerinden İnceleme ve Değerlendirme.....	52
4.1.1. Belirli bir sıcaklıktaki ölçüm hatasının incelenmesi.....	57
4.1.2. Belirli bir akımdaki ölçüm hatasının incelenmesi.....	58
4.1.3. Bütüncül bir bakışla ölçüm hatasının incelenmesi.....	60
4.2. İstatistiksel Analiz Çalışması Sonuçları.....	61
4.2.1. Korelasyon analizi sonuçları.....	61
4.2.2. Regresyon analizi sonuçları.....	65
4.3. Yapay Sinir Ağı Modellemesi ve Hata Tahmini.....	70
4.3.1. Parametrelerin belirlenmesi.....	71

	Sayfa
4.3.2. Eğitim, test ve uygulama için hazırlık.....	72
4.3.3. Ağ modelinin seçimi.....	73
4.3.4. Öğrenme modelinin seçimi.....	74
4.3.5. Diğer parametrelerin belirlenmesi.....	75
4.3.6. Eğitim, test ve uygulama.....	79
4.3.7. Bulgular.....	80
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	105

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Literatür taraması sonuçları.....	11
Çizelge 3.1. Referans koşulları.....	21
Çizelge 3.2. Referans koşullarda yüzdesel hata limitleri.....	23
Çizelge 3.3. Akım değerleri için ilave gereklilikler.....	23
Çizelge 3.4. Referans koşullarda yüzdesel hata limitleri.....	24
Çizelge 3.5. Gerilim değişimlerine göre yüzdesel olarak kabul edilebilir hata limitleri.	25
Çizelge 3.6. Frekans değişimlerine göre yüzdesel olarak kabul edilebilir hata limitleri.	26
Çizelge 3.7. Sıcaklık değişimlerine göre yüzdesel olarak kabul edilebilir hata limitleri.	27
Çizelge 3.8. Uzun süreli harmonik bozukluklar için kritik değişim değerleri.....	28
Çizelge 3.9. Nominal çalışma şartlarında yüzde olarak MIH değerleri.....	30
Çizelge 3.10. Aktivasyon fonksiyonu örnekleri.....	42
Çizelge 3.11. YSA sınıflandırması.....	43
Çizelge 3.12. Performans ölçüt formülleri.....	49
Çizelge 4.1. A marka elektrik sayacı temel bilgileri.....	52
Çizelge 4.2. B marka elektrik sayacı temel bilgileri.....	52
Çizelge 4.3. C marka elektrik sayacı temel bilgileri.....	53
Çizelge 4.4. A marka elektrik sayacına ait bileşik maksimum hata değerleri.....	53
Çizelge 4.5. B marka elektrik sayacına ait bileşik maksimum hata değerleri.....	54
Çizelge 4.6. C marka elektrik sayacına ait bileşik maksimum hata değerleri.....	56
Çizelge 4.7. A, B ve C marka elektrik sayacı korelasyon analizi için girdi verileri.....	62
Çizelge 4.8. A, B ve C marka elektrik sayacı PF=1 için korelasyon analizi sonucu.....	62
Çizelge 4.9. A, B ve C marka elektrik sayacı PF=0,5 için korelasyon analizi sonucu...	63
Çizelge 4.10. A, B ve C marka elektrik sayacı PF=0,8 için korelasyon analizi sonucu..	64

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.11. Kümülatif korelasyon analizi sonuçları.....	65
Çizelge 4.12. A, B ve C marka elektrik sayacı regresyon analizi girdi veri formatı.....	66
Çizelge 4.13. A, B ve C marka elektrik sayacına ait Solver regresyon analizi sonuçları.	67
Çizelge 4.14. A, B ve C marka elektrik sayacına ait Stata regresyon analizi sonuçları...	69
Çizelge 4.15. YSA modeli için veri dağılımı.....	72
Çizelge 4.16. Nöron sayısına göre performans ölçüm sonuçları.....	75
Çizelge 4.17. YSA modeli tahmin sonuçları ve hata miktarları.....	83
Çizelge 4.18. YSA performans ölçüm sonuçları.....	86

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Elektromekanik elektrik sayacı.....	19
Şekil 3.2. Kombi tip elektrik sayacı.....	20
Şekil 3.3. Farklı korelasyon yöntemlerinin aynı verilerle tahmin derecesi.....	32
Şekil 3.4. Yapay sinir ağı örnek modeli.....	39
Şekil 3.5. Yapay sinir ağı katmanları.....	41
Şekil 3.6. İleri beslemeli YSA blok diyagramı.....	44
Şekil 3.7. Geri beslemeli YSA blok diyagramı.....	45
Şekil 3.8. Danışmanlı öğrenme yapısı.....	45
Şekil 3.9. Danışmansız öğrenme yapısı.....	46
Şekil 3.10. Destekleyici öğrenme yapısı.....	47
Şekil 4.1. A, B ve C marka elektrik sayacının 30°C sıcaklıkta ve farklı güç faktörlerinde değişken akımlara göre gerçek BMH hatası ve BMH/MİH oranı.....	57
Şekil 4.2. A, B ve C marka elektrik sayacının 5 A referans akımda ve farklı güç faktörlerinde değişken sıcaklık değerlerine göre gerçek BMH hatası ve BMH/MİH oranı.....	59
Şekil 4.3. A, B ve C marka elektrik sayacının farklı sıcaklık ve akım değerlerinde tüm güç faktörlerinde göre gerçek BMH hatası ve BMH/MİH oranı.....	60
Şekil 4.4. Matlab Nftool arayüzü görseli.....	71
Şekil 4.5. Matlab Nntool ara yüzü değişkenlerin sınıflandırılması.....	73
Şekil 4.6. Gizli katmanın özellikleri.....	77
Şekil 4.7. Çıkış katmanının özellikleri.....	78
Şekil 4.8. YSA blok diyagramı.....	78
Şekil 4.9. YSA eğitim parametreleri.....	79
Şekil 4.10. YSA eğitim testi.....	80

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. YSA eğitim sonrası performans grafiği.....	81
Şekil 4.12. YSA eğitim sonrası performans ölçütlerine göre analiz.....	81
Şekil 4.13. YSA eğitim regresyon sonuçları.....	82
Şekil 4.14. YSA gerçek test verileri ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
A_t	Gerçek değer
C	Celsius
cov	Kovaryans
e_{base}^2	Baz hatası testinde ölçülen maksimum hata farkı
$e_{frekans}^2$	Frekans testinde ölçülen maksimum hata farkı
$e_{gerilim}^2$	Gerilim testinde ölçülen maksimum hata farkı
$e_{harmonik}^2$	Harmonik testinde ölçülen maksimum hata farkı
$e_{kararsızlık}^2$	Kararsızlık testinde ölçülen maksimum hata farkı
$e_{sıcaklık}^2$	Sıcaklık testinde ölçülen maksimum hata farkı
$e^2(PF_p, I_i)$	Belirli bir yükteki sayacın hatası
f	Sayaca uygulanan gerilimin frekansı
fn	Nominal referans frekans
F_t	Tahmin değeri
ρ	Spearman korelasyon katsayısı
Hz	Hertz
I	Sayaçtan geçen elektrik akımı
I_{max}	MİH sınırları içinde kalan hatalar için en büyük I
I_{min}	MİH sınırları içinde kalan hatalar için en küçük I
I_n	Sayaç için referans akımı
I_r	Referans akım
I_{st}	Birim güç faktöründe beyan edilen en düşük akım
I_{tr}	Hataların en küçük MİH değeri içindeki akım
K	Kelvin
kWh	Aktif enerji güç birimi(kilo cinsinden)
kVarh	Reaktif enerji güç birimi(kilo cinsinden)

Simgeler**Açıklamalar**

Mwh	Aktif enerji güç birimi (mega cinsinden)
MVarh	Reaktif enerji güç birimi (mega cinsinden)
Pa	Pascal
R	Korelasyon katsayısı
R²	Karar(belirlilik) katsayısı
rx_y	Pearson korelasyon katsayısı
SD	Standart sapma
SD_x	x değişkeninin standart sapmasını
SD_y	y değişkeninin standart sapmasını
U	Sayaca uygulanan elektrik gerilimi
Un	Nominal referans gerilim
V	Volt
α	Alfa
β	Beta
ϵ	Epsilon
φ	Fi
Ω	Ohm
$\delta e_{p,i}^2(T)$	Aynı yükte sıcaklık değişiminden gelen % hata farkı
$\delta e_{p,i}^2(U)$	Aynı yükte gerilim değişiminden gelen % hata farkı
$\delta e_{p,i}^2(f)$	Aynı yükte frekans değişiminden gelen % hata farkı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif akım
AE	Gerçek hata
ART	Adaptif Rezonans Teori
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BMH	Bileşik maksimum hata
BP	Geri yayılım algoritması
BTK	Kısaltmalar alfabetik sırayla verilmelidir
Cap	Kapasitif

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DC	Doğru akım
EKK	En küçük kareler
EN	Avrupa Normu
GEM	Genelleştirilmiş Eklemeli Model
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
Ind	Endüktif
LMÖA	Levenberg-Marquardt Öğrenme Algoritması
LOGSIG	Logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonu
LVQ	Linear Vector Quantization
MAD	Gerçek sapmanın ortalaması
MAE	Ortalama mutlak hata
MAPE	Ortalama mutlak yüzde hatası
MATLAB	Matrix Laboratory
MID	Measuring Instruments Directive(2014/32/EU)
MIMO	Multiple input multiple output
MISO	Multiple input single output
MİH	Maksimum izin verilebilir hata
MLP	Multi Layer Perceptron
MSE	Ortalama kare hata
NARX	Doğrusal olmayan otoregresif dışsal girdili model
NFTOOL	Neural Fitting Application
OIML	Uluslararası Yasal Metroloji Organizasyonu
ÖAK	Ölçüler ve Ayar Kanunu
ÖAY	Ölçü Aletleri Yönetmeliği(2014/32/AB)
ÖÖAMY	Ölçü ve Ölçü Aletleri Muayene Yönetmeliği
ESGSMY	Elektrik, Su ve Gaz sayaçları Muayene Yönetmeliği
ÖÖATOY	Ölçü ve Ölçü Aletleri Tip Onay Yönetmeliği
PF	Güç faktörü
QP	Hızlı yayılım algoritması
RMSE	Kök Ortalama Karekök Hatası
RP	Esnek yayılım algoritması
SD	Standart sapma

Kısaltmalar**Açıklamalar****SISO**

Single input single output

SOM

Self Organizing Map

SSE

Tahmini hata karelerinin toplamı

SSR

Regresyon karelerinin toplamı

SST

Gerçek hataların karelerinin toplamı

STB

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı

TANSIG

Tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu

THD

Toplam harmonik bozulma

TRAINLM

Eğitim fonksiyonu

TS

İşaretlerin izlenimi

TSE

Türk Standardları Enstitüsü

ÜGTDK

Ürün Güvenliği ve Teknik Düzenlemeler Kanunu

YSA

Yapay sinir ağı

1. GİRİŞ

Günümüzde hemen hemen her alanda artan elektrik enerjisinin kullanımı ve dünya üzerindeki kısıtlı kaynakların durumu birlikte dikkate alındığında, elektrik sayaçlarının en az ölçüm hatası ile çalışmasının öneminin büyük olduğu görülecektir. Çünkü, gelişen teknolojiyle birlikte günlük ihtiyaçların karşılanması amacıyla kullanılan elektrikli ekipmanlar da farklılaşarak artmaktadır. Dolayısıyla, enerjinin de verimli bir şekilde kullanılması önem arz etmektedir. Bu nedenle, birçok ülkede akıllı elektrik sayacının kullanımı hızlı bir şekilde artmaktadır. Ayrıca, son zamanlardaki elektrikli araçların kullanım sayılarındaki artış ve hızlı şarj teknolojilerinin gelişimindeki ivme de bu durumu destekler mahiyettedir.

Diğer taraftan, dünya nüfusunun hızlı bir şekilde artışı ve bu nüfus artışlarının şehirlerde yoğunlaşması ile birlikte dünya popülasyonunun 2025 yılı itibariyle yaklaşık 8 milyar olabileceği, 2035 yılı sonunda ise enerji kullanım miktarının 40% oranında artabileceği varsayılmaktadır (Duman, 2018). Teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte insanoğlunun günlük hayatında ihtiyaç duyacağı birçok şeye ulaşımı kolaylaşmakta ve bu durum insan yaşamını da uzatmaktadır. Fakat, teknolojinin hızlı gelişimi şehirlerde yaşayan insan yoğunluğunu arttırmaktadır. Dolayısıyla, yeni süreçte enerjiye duyulan ihtiyaç sürekli artış göstermektedir. Bu nedenle, enerjinin verimli kullanılması dünyada sürekli gündem olan konular arasında yer almaktadır (Cengiz, Atıç, Parlakyıldız, Palta ve El, 2015). Dolayısıyla, enerji kaynaklarının sınırlı olması, ücretlerin değerinin ve tüketim miktarının sürekli artış göstermesi gibi durumlar kısıtlı kaynakların verimli ve etkili bir şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Bunun haricinde, bilinçli bir tüketici toplumu olarak daha ucuz ve kaliteli enerji kullanma isteği ortaya çıkmaktadır (Ünsal ve Tunaboşlu, 2009).

Bu bağlamda, piyasaya arz edilen elektrik sayaçlarının çalışma yöntemi incelendiğinde, akım, gerilim ve frekans dalga formunun daha önceden bilindiği enerji devrelerinde sayacın ölçüm yapılmak üzere tasarlandığı görülecektir. Bu nedenle, harmonik bileşenli akım ve gerilimin mevcut olduğu sistemlerde, elektrik sayacının aktif ve reaktif enerji ölçümlerinin hata değerleri fazla olabilmektedir (Günay, 2019). Bu sebeple, elektrik devrelerinde kullanılan enerjinin minimum hata ile ölçülmesinin önemli bir konu olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, 1905 yılından beri elektrik sayacının harmonik bileşenli dalga formuna sahip ölçüm hataları araştırma konusu olmaktadır (Rosa, Lloyd ve Reid, 1905: 421). Dolayısıyla,

elektrik sayacının çalışması sırasında ortaya çıkabilecek ölçüm hatalarını en aza indirmek önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Öte yandan, enerji dağıtım ve kullanım miktarının yüksek olduğu yerlerde daha hassas ölçümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum ise, daha yüksek doğruluk sınıfına sahip elektrik sayacının kullanılmasının önemini arttırmaktadır. Bu nedenle, elektrik sayacının çalışması sırasında ortaya çıkan ölçüm hatası miktarı ve faz kayması oranının optimum değerinin belirlenmesi hususu araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Dolayısıyla, elektrik sayacının mevzuatında belirtilen teknik gereklere uygun bir şekilde üretilerek piyasaya sunulması ve hizmete sunulduktan sonra doğru ayarlı olarak kullanılması hususu sayaç imalatçıları, elektrik dağıtım şirketleri, kullanıcılar ve yetkili kamu otoriteleri açısından oldukça önemli bir konudur.

Diğer taraftan, ülkemizde milyonlarca elektrik sayacı kullanan abone bulunmakta ve elektrik sayacının çalışması sırasında abonelerin lehine veya aleyhine olacak şekilde ortaya çıkacak çalışma hataları faturaları doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle, çalışma hatasına etki eden parametrelerin önemini bilmek özellikle sıcaklık değişkeni dikkate alındığında sayacın kullanıldığı bölgeye göre dağıtım şirketlerinin kullanacağı sayacın seçiminde önemli bir rol oynayacaktır. Ayrıca, sayaç imalatçısının da bu durumu dikkate alarak tasarımını geliştirmesine imkân oluşturacaktır. İlgili kamu kurumları açısından ise yasal mevzuatın tüm aktörler açısından uygunluğunu ve etkisini görmesine ışık tutacaktır.

Bu nedenle, hazırlanan bu tezde öncelikle akım, gerilim, frekans ve sıcaklık gibi belirli temel parametrelerin değişimlerinin elektrik sayacının çalışması esnasında ortaya çıkan ölçüm hatası miktarına etkilerini incelemek ve sonrasında elde edilen gerçek veriler ile uygun bir yapay sinir ağı oluşturularak hata tahmini yapmak amaçlanmıştır.

Bu kapsamda; akım, gerilim, frekans ve sıcaklık gibi temel parametrelerin değişimlerinin elektrik sayacının piyasaya arz işlemi öncesinde sunulması gereken tip onay test testlerinde yer alan gerçek veriler dikkate alınmıştır. Bu çerçevede, B sınıfı elektrik sayacının çalışma şartlarındaki hata miktarı, hata miktarına etkileri ve birbirleri ile arasındaki korelasyon ilişkisi incelenmiştir. B sınıfı sayaç, 50 Hz. elektrik şebekelerinde kullanılmak üzere konut, ticari ve hafif endüstride kullanılması amaçlanan, aktif elektrik enerjisini ölçmek üzere imal edilmiş $\pm 1\%$ doğruluk sınıfına sahip aktif enerji sayacıdır (TS EN 50470-1, 2007).

Sonrasında, gerçek hata verilerinin yasal mevzuatın izin verdiği maksimum hata oranına uygunluğu karşılaştırılmıştır. Ayrıca, araştırmalar sonucunda temin edilen tip onay testlerinde yer alan birçok farklı modeldeki elektrik sayacının gerçek hata miktarını etkileyebilecek parametreler düzenlenmiştir. Bu değişkenlerin etkinliği araştırıldıktan sonra Matlab programında uygun bir yapay sinir ağı modeli geliştirilerek ölçüm hata miktarı tahmini yapılmıştır.

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. Bu bölümde, tezin amacı, önemi ve katkısı hakkında bilgilendirmeler yapılarak araştırma konusuna genel bir giriş yapılmıştır.

İkinci bölümde; literatürde elektrik sayacının çalışması sırasında ölçüm sonucuna etki eden içsel ve dışsal faktörlerin neler olduğu literatürdeki boşluklar da dikkate alınarak incelenmiş ve sonuçları sunulmuştur. Ayrıca, incelenen çalışmalardaki sonuçların birbirleriyle daha kolay bir şekilde karşılaştırılabilmesi ve bu tezden sonraki çalışmalara altyapı oluşturulabilmesi amacıyla incelenen araştırmalar konu, yöntem, kullanılan parametre ve bulgular özelinde bir icmal tablosu olarak derlenmiştir.

Üçüncü bölümde; elektrik sayacının tanımı ve çeşitleri açıklanmış, piyasaya arz öncesinde gerekli olan elektriksel tip testlerinin neler olduğu ve nasıl gerçekleştirildiği anlatılmıştır. İlgili yasal mevzuatında düzenlenen bileşik maksimum hata miktarının nasıl hesaplandığı, bu hataya etki eden değişken faktörlerin neler olduğu incelenmiştir. Korelasyon ve regresyon analiz yöntemleri ile yapay sinir ağı modellerine ilişkin bilgiler sunulmuştur. Ayrıca, istatistiki olarak verilerin anlamlılık derecesini ölçen matematiksel yöntemlerden bahsedilmiştir. İlâveten, yapay sinir ağının özelliklerinin neler olduğu, yapısının nasıl oluşturulduğu, eğitim ve test algoritmalarının hangi özelliklere sahip olduğu ve uygulama sırasında nelere dikkat edilmesi gerektiği hususlarına değinilmiştir.

Dördüncü bölümde; aynı teknik özelliklere sahip B sınıfı 3 adet aktif elektrik sayacına ait tip test sonuçları incelenmiş, bu faktörlerin etkisini belirlemek üzere korelasyon analizi ve regresyon analizi çalışması yapılmış ve anlamlı olduğu belirlenen parametreler esas alınarak Matlab programı kullanılmak suretiyle 9 adet farklı elektrik sayacı verileri ile uygun bir yapay sinir ağı modellenmiş ve sonrasında hata tahmini yapılarak sonuçların anlamlılık seviyeleri irdelenmiştir.

Son bölümde ise tez çalışmasında elde edilen inceleme ve analiz sonuçlarına, değerlendirmelere ve sonraki çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez ile elektrik sayacının piyasaya arz işlemleri sırasında gerekli olan tip onay testlerinde yer alan B sınıfına ait üç farklı modeldeki aynı teknik özelliklere sahip aktif elektrik sayacının gerçek test verileri dikkate alınarak değişken parametrelerin ölçüm hatasına etkisi incelenmiştir. Akabinde, 5 adet C sınıfı ve 4 adet B sınıfı elektrik sayacına ait gerçek test verileri kullanılarak yapay sinir ağı ile hata tahmini yapılmış, uygun ve anlamlı sonuçların elde edilmiş ve sonuçların imalatçı, dağıtım şirketi ve ilgili kamu kurumlarının çalışmaları açısından değerlendirilmesi suretiyle konuya farklı bir perspektif ile yaklaşmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Elektrik sayacının piyasaya arz edilmeden önce çalışma sıcaklıklarına ve tiplerine göre dayanıklılık, sağlamlık, elektromanyetik bozulma, akım, gerilim, frekans ve güç faktörü bozulması, faz kayması ve harmonik bozulma gibi bazı tip testlerine tabi tutulması ve belirlenen kıstaslara uygun olması gerekmektedir. Bu çerçevede, metrolojik açıdan ölçüm doğruluğunun sağlanabilmesi için maksimum izin verilebilir hata oranları belirlenmiştir. Bu hata oranları incelendiğinde, akım ve gerilim için hata değerlerinin 0,7-9% aralığında belirlendiği ve söz konusu hata miktarlarının sıcaklığa göre de değişkenliğinin mevcut olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, bu hataların elektrik sayacının kullanımı sırasında önemli derecede teknik ve ekonomik etki oluşturabileceği değerlendirilmektedir (Ölçü Aletleri Yönetmeliği [ÖAY], 2016). Ayrıca, elektrik sayacının kurulumu sonrasında elektrik dağıtım sisteminde farklı özellikte olan yüklerin devreye bağlanması ile ortaya çıkacak harmonik bozulmalarının ve dış ortamlardan kaynaklanan sıcaklık, basınç, nem ve rüzgâr gibi faktörlerin etkisi ile birlikte ölçüm hatasının daha kritik seviyelere gelebileceği düşünülmektedir.

Bu problem nedeniyle, elektrik sayacının hangi akım, gerilim, sıcaklık ve güç faktörlerinde nasıl ölçüm hataları oluşturduğunu bilmek, bu bilgiye göre imalatçı tarafından sayacın ölçüm hatasını en aza indirgeyecek şekilde tasarımını geliştirmesine imkân sağlamak, kullanıcıların kullanacakları bölgeye göre en az hatası olan sayacı seçmesini sağlamak ve yetkili kamu otoritelerince de yasal düzenlemelerde gerekli güncellemeleri yapmasını sağlamak önemli bir konudur. Bu bağlamda, literatürde yapılan çalışmalar sırasıyla aşağıdaki gibi sunulmaktadır.

Yazıcıoğlu (2016), tarafından yapılan bir araştırmada; elektrik sayacında doğası gereği ortaya çıkan malzeme direnci sebebiyle parçalarda bozulmaların olduğu ve durumun enerji zayıfına yol açtığı, bu durumun nedenlerinden birisinin imalat aşamasında kullanılan gevşek haldeki klemens vidalarının ve ayrıca ilerleyen zaman içinde bu vidaların gevşemesi olduğu belirlenmiştir. Bu amaçla bin serisi alüminyum alaşımın bakır kaplaması yapılmıştır. Bu teller ile birlikte benzer özelliklere sahip değişik kalınlıklardaki teller önce sabit akım değerlerinde sonra farklı tork değerlerinde ayrı ayrı olacak şekilde test edilerek direnç miktarları ölçülmüş ve sonrasında karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, akımın sabit olduğu durumda, tork değeri arttıkça malzeme direncinin azaldığı anlaşılmıştır.

Bu durumun gerekçesinin ise, artan tork kuvveti ile telin temas yüzeyinin artmasına sebep olduğu durumu gösterilmiştir. Bu araştırma sonucunda, elektrik sayacının ölçümlerinde oluşan hataya üretimde kullanılan tellerin malzeme yapısının ve tork değerinin etki ettiği bulgusuna ulaşılmıştır.

Jaiswal, Wath ve Ballal (2016) tarafından yapılan bir araştırmada ise, matematiksel modellerle açıklanamayan dinamik ve doğrusal olmayan sistemlerde enerji ölçümündeki hatayı ölçmek amacıyla SISO (tekil giriş tekil çıkış) sistemi üzerine odaklanarak geliştirilen modelin etkinliği araştırılmıştır. Bu çalışmada, deneysel veriler ve simülasyon sonuçları kullanılarak doğrusal olmayan otoregresif dışsal girdili yapay sinir ağı modeli (Nonlinear Autoregressive Exogenous Neural Network Model) (NARX) geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda, mikroişlemci tabanlı enerji ölçüm cihazının doğruluğunun gerilim ve akım sensöründen, analog/dijital dönüştürücülerin çözünürlüğünden, enerji hesaplamada kullanılan örnekleme oranından, benimsenen algoritmanın özelliklerinden, gerilimin spektral içeriği gibi diğer faktörlerden etkilendiği ve ayrıca mevcut dalga biçimi, güç faktörü, yükleme koşulu, kararlılık, sıcaklık ve nemin de çalışma hatasına katkıda bulunduğu belirlenmiş olup önerilen yöntemin SISO (tekil giriş tekil çıkış), MIMO (çoklu giriş çoklu çıkış) ve MISO (çoklu giriş tekil çıkış) sistemleri için uygulanabilir olduğu kanaatine varıldığı anlaşılmıştır.

Ma, Teng, Tang, Qui ve Yang (2022) tarafından yapılan bir araştırmada ise, elektronik elektrik sayacının fiziksel ve tasarımsal özelliklerinin haricinde sıcaklık, basınç, nem, rüzgar ve ultraviyole gibi çevresel faktörlerden kaynaklı olarak ve çalışma süresine göre ölçüm hatasının etkilendiğinin anlaşıldığı, bu kapsamda gerçek veriler üzerinden çevresel faktörlerin etkisine göre yapay zeka ile bir tahmin modeli kullanılarak sonuçların incelendiği ve yapılan çalışmaların sonucunda çevresel sıcaklık değerlerinin akıllı elektrik sayacının çalışma sırasındaki ölçüm hatasına etkisinin pozitif yönde, nemin ise negatif yönde azımsanmayacak derecede etkili olduğunun tespit edildiği anlaşılmıştır.

Kaczmarek (2016) tarafından yapılan bir çalışmada ise, enerji ölçümlerinde hesaplanan bileşik hataya ve faz kaymalarına dış ortamdan gelen etkilerle birlikte sistem içerisinde yer alan gerilim ve akım ölçüm transformatörlerinin kullanımından kaynaklanan harmonik bozulmaların da etkili olduğu, bu etkinin doğrudan akım ve gerilim bozulmalarının toplamı şeklinde belirtilmesinin uygun olmadığı, bunun yerine bir düzeltme faktörü belirlenerek

bileşik hatanın etkisinin dikkate alınmasının daha uygun olacağını belirtildiği görülmektedir.

Zhang ve diğerleri (2018) tarafından yapılan araştırmada ise, aktif elektrik sayacının çalışması sırasında birleşik ölçüm hatasına etki eden içsel faktörlerin akım, gerilim, frekans, güç faktörü, sıcaklık, konumlandırma (eğim), kararsızlık ve harmonik bozulmalar gibi hususların olduğu, konumlandırma ve sıcaklık gibi bazı faktörlerin etkisinin az olduğu, bu hatanın tanımının ve unsurlarının Uluslararası Yasal Metroloji¹ Organizasyonu (OIML)'nin R46-1/-2:2012 Aktif Elektrik Enerji Sayaçları başlıklı rehber dokümanında (OIML R46-1/-2, 2012) ayrıntılı olarak açıklandığı, bileşik hatanın matematiksel olarak modellendiği, araştırmacılar tarafından OIML R46 dokümanında belirtilen bu modelin etkilerini gözlemlemek üzere deneysel bir şablon sunulduğu ifade edilmektedir.

Goncalves, Canesin, Pinto, Galotto ve Godoy (2009) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, indüksiyon ve elektronik aktif elektrik sayacının ölçüm hatasını incelemek ve tahmin etmek üzere Genelleştirilmiş Eklemeli Model (GEM) ve Ridge regresyon analizi yöntemi ile gerçek deneysel test verileri kullanılarak bir model geliştirildiği anlatılmaktadır. Bu çalışmada, gerçek değişik yüklerle beslenmiş, harmonik bozulmaları bulunan, dengeli ve dengesiz gerilim şartlarına haiz bir elektrik dağıtım sistemi içerisinde elde edilmiş elektrik dalga formlarına ait 26 veri esas alınmıştır. 2% ve 1% hata sınıfına sahip toplam 16 adet 3 fazlı aktif elektrik sayacı ile testler yapılmıştır. Bu testlerde, gerilim harmonik bozulmalarının gerçek gerilim değerlerine etkisinin az olduğu, hatta dağıtım ile ilgili düzenlemelerde bu değişkenin etkisinin 5% ile sınırlandırıldığı belirtilmektedir. Dolayısıyla, bu parametrenin ölçüm hatasına etkisinin ihmal edilebileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca, asıl harmonik etkinin akımdan kaynaklanması nedeniyle akımın harmonik bozulmasının etkisinin incelenmesinin daha uygun olduğu, ancak faz kaymasının akım ve gerilim harmonik bozulmalarından birlikte etkilenmesi sebebiyle sunulan matematiksel modelin bu doğrultuda geliştirildiği ifade edilmiştir. Bu modelin kullanılması sayesinde, negatif hataların elektrik sayacının ölçüm hatasına etkilerini azalttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, aktif ve reaktif sayaçta belirli harmonik bozulma sınırına dikkat edilmesi şartıyla bu modelin

¹ Ölçüm bilimi ve uygulamaları anlamına gelmekte olup ölçüm belirsizliği ve uygulama alanı ne olursa olsun ölçümün tüm teorik ve uygulamalarını içermektedir (Bureau International des Poids et Mesures[BIPM] Metroloji, 2021).

değişken yüklerden kaynaklı harmonik etkiyi göz ardı etmeksizin ölçüm hatası tahmininde kullanılmasının mümkün olduğu belirtilmiştir.

Bernieri, Ferrigno, Laracca ve Luongo (2008) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, elektrik enerjisinin ölçümünde ortaya çıkan hata miktarının etkisinin günlük hayatta kullanılan elektrikli ekipmanlar dikkate alındığında önemli bir boyutta olduğu, İtalya’da yaklaşık 30 milyon elektrik abonesi olduğu düşünüldüğünde bu hataların faturaya ve sisteme olan etkisinin azımsanmayacak oranda olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle, elektrik sayacının kalibrasyon ve izlenebilirliklerinin yasal mevzuatla sağlanması gerektiğine ilişkin bir ihtiyacın ortaya çıktığı, bu hususun Avrupa Birliğinin tek pazar stratejisi kapsamında üye ülkelerce benimsenecek ortak mevzuatla aşılması amacıyla 2004 yılında elektrik sayacı da dahil olmak üzere birçok ölçü aletinin Ölçü Aletleri Direktifi (MID, 2014)² bünyesinde elektrikselsel ve çevresel etkiler açısından maksimum izin verilebilir hata oranının belirlenmesi suretiyle giderildiği ifade edilmiştir. Bu çerçevede İtalya’da elektrik sayacının piyasaya arzından sonra kullanımda iken belirli periyotlarla kontrol edilmesi ve bu kontrol sonrasında yılda iki kez kalibrasyonun yapılması gerektiği belirtilmiştir. Bu amaçla söz konusu direktifin gerekliliklerinin analizini yapmak ve ayrıca kolay ve ekonomik olması açısından sanayi ve hane kullanımları için elektrik sayacının uzaktan kalibrasyon işleminin yapılabilmesi için uygun bir cihaz tasarımı ile izlenebilirliğin sağlanabileceğini göstermek için çalışmaların yapıldığı anlaşılmaktadır. Bu Direktif, genel olarak insan sağlığı ve güvenliği ile tüketicinin ve çevrenin korunması gibi hususlara odaklanmaktadır. Bu çerçevede, ölçü aletinin ölçüm sonuçlarından etkilenenler açısından yüksek düzeyde bir metrolojik koruma sağlamak ve bu doğrultuda üreticiler tarafından ölçüm verilerinin güvenliğini sağlamak amacıyla ölçüm teknolojileri çerçevesinde daha kaliteli tasarımlar yapılmasına imkân verilmektedir. Dolayısıyla, bu Direktif kapsamında bulunan aktif elektrik sayacı da dahil taksimetre ve otomatik tartı aletleri gibi ölçü aletlerinin piyasaya arzı aşamasında maksimum izin verilebilir hata oranı ve elektromanyetik girişim gibi çevresel etmenlerin testlerine ilişkin gereklilikleri ve işaretleme kriterleri belirleyerek ve bu alanda

² Measuring Instruments Directive(2014/32/EU)(MID) isimli Direktif Avrupa Birliği Komisyonu tarafından ilk olarak 2004 yılında yayımlanmış olup ülkemizde de 1/95 sayılı Gümrük Birliği Kararı’na uyumlaştırılması gereken teknik düzenleme kapsamında 2008 yılında Ölçü Aletleri Yönetmeliği(2004/22/AT) olarak uyumlaştırılarak yayımlanmıştır. Akabinde, 2014 yılında Avrupa Birliği tarafından bu Direktif kaldırılarak yerine 2014/32/EU Direktifini yayımlanmıştır. Ülkemiz ise bu Direktifi 29.06.2016 tarihli ve 29757 sayılı Resmî Gazete’de, Ölçü Aletleri Yönetmeliği(2014/32/AB) (ÖAY, 2016) olarak yürürlüğe sunmuştur. Bu yönetmeliğe <https://www.mevzuat.gov.tr> adresi üzerinden erişim sağlanabilir.

gerek kullanıcıları gerekse de üreticileri koruyarak metroloji alanında uygun bir kalite altyapısı oluşturulmasının amaçlandığı anlaşılmaktadır.

Wu, Mu, Xu, Ji, Bao ve Quyang (2017) tarafından yapılan çalışmada ise, frekans offset değerlerinin dijital elektrik sayacının sahada kullanılmaları sırasında aşırı hatalara sebebiyet verebileceği, bu sebeple söz konusu durumun hem teorik hem de simülasyon sonuçları ile araştırıldığı belirtilmektedir. Bu yapılan çalışmalar sonucunda dijital elektrik sayacının reaktif enerji ölçümlerinde bu hatanın aktif enerji ölçümüne oranla daha yüksek olduğu, simülasyon sonuçlarına göre mevcut hesaplama algoritması kullanılan sayacın 49.5-50.5 Hz. frekans aralığı için belirlenen doğru ölçüm gerekliliğini tam olarak karşılayamadığı ifade edilmektedir. Gerçek sayaç test sonuçlarında da bu sonucun gözlemlendiğinin belirlendiği ve genel olarak sayaç üreticilerinin aktif enerji açısından bu hatayı azaltacak şekilde önleyici tasarımlar geliştirdiğinin belirtildiği görülmektedir. Fakat, reaktif enerji açısından bu durumun dikkate alınmamış olabileceğine kanaat getirildiği, dolayısıyla geliştirilen üçgen pencere ağırlıklı algoritma kullanılarak bu etkinin azaltılabileceği sonucuna varıldığı belirtilmektedir.

Kong, Ma, Zhao, Li ve Teng (2019) tarafından yapılan araştırmada, elektrik sayacının mevcut doğrulama yöntemleri göz önüne alındığında, yüksek bakım maliyeti, düşük doğruluk ve çalışma kapsamındaki kısıtlar gibi sorunların mevcut olduğunun görülmesi sebebiyle kullanıcı tarafında elektrik sayacı tarafından toplanan büyük ölçekli ölçüm veriler analiz edilerek elektrik sayacının çalışma hatası için çevrimiçi bir tahmin yönteminin önerildiği anlaşılmıştır. Bu yöntemde, ölçüm hatasını tahmin etmek ve tahminlerin doğruluğu belirleyebilmek için yinelemeli en küçük kareler ve çift parametrelili yöntemlerin esas alındığı ve gerçekleştirilen program kontrollü yük simülasyon sistemi aracılığıyla önerilen yöntemin daha yüksek doğruluk ve uygunluk ile test edildiği belirlenmiştir.

Shklyarskiy, Hanzelka ve Skamvin (2020) tarafından yapılan araştırmada, harmoniklerin doğrusal olmayan yüklere sahip bir elektrik ağında elektrik enerji sayacının işletilmesi üzerindeki etkisinin incelendiği, genel harmonik bozulmaların aktif elektrik sayacı üzerindeki etkileri dikkate alınırken reaktif elektrik sayacı üzerindeki etkilerinin pek dikkate alınmadığı belirtilmektedir. Ayrıca, aktif enerji ölçümündeki hata üzerindeki maksimum etkinin dikkate alınan harmoniklerin sayısı ve bunların genliği ve reaktif enerji ölçümündeki hatanın ayrıca temel ve harmonik frekanslardaki faz açısından etkilendiğinin laboratuvar

koşullarında doğrulandığı ve kapasitör kullanımının reaktif enerji ölçümündeki hatanın ve harmoniklerin faz kayma açısının değişim aralığının önemli ölçüde arttığını gösterdiğini ifade etmektedir. Bu durumun bazı formüllerde belirtildiği, bu kapsamda saha ölçümleri yapılarak bu etkinin varlığının mevcut olduğunun gösterildiği, bu çalışma sonucunda ise gerilim ve akım bozulma değerlerinin izin verilen hata değerlerini aşmazsa, bu hatanın en fazla %5-7 aralığında olduğunun değerlendirildiği ifade edilmiştir.

Bernieri, Betta, Ferrigno ve Laracca (2012) tarafından yapılan araştırma ise, elektrik enerjisi ölçümüne ilişkin teknik düzenleme olan Ölçü Aletleri Direktifinin ve ayrıca uyumlaştırılmış standartlarının zorunlu kıldığı test gerekliliklerinin analizini yapmaktadır. Ayrıca, çalışmada ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini zorlayabilecek miktarda bir serbestlik olup olmadığı kontrol edilmiş ve bunun mümkün olduğu değerlendirilmesine ulaşıldığı görülmüştür.

Çetina, Roscoe ve Wright (2017) tarafından yapılan araştırmada, bozuk dalga biçimi koşulları altında elektrik sayacının piyasaya arzı aşamasında gerekli olan testlerin dahil edilmesinin geçerliliği ve olası etkisinin yanı sıra, faturalandırma amacıyla elektrik sayacına uygulanan standartlara ilişkin yeni doğruluk gerekliliklerinin incelendiği görülmektedir. Bu incelemede, elektrik sayacının sinüzoidal olmayan gerilim veya akım dalga formuna maruz kaldıklarında karşılaştıkları sorunlar, daha sonra doğrulukla ilgili uygulanabilir standartlar ve son olarak, sinüzoidal olmayan dalga şekli koşulları altında elektrik sayacına yönelik testlerin genişletilmesinin uygunluğu araştırılmıştır.

Bartolomei, Cavaliere, Mingott, Peretto ve Tinarelli (2019) tarafından yapılan araştırmada, elektrik sayacının çalışma gerekliliklerinin her zaman örtüşmeyen ve aynı kuralları öngören farklı standartlar tarafından düzenlendiği ve bu durumun oluşturduğu karışıklığı gidermek için bu çalışma ile güncel standartlar arasında kısa bir karşılaştırma yapılarak yeni bazı testlerin önerildiği anlaşılmaktadır. Bu testlerin ölçülen enerjide rastgele seçilmiş ve tam değerde olmayan frekansların etkisine odaklandığı görülmektedir. Bu amaçla kullanıma hazır iki adet B³ sınıfı elektrik sayacı kullanılmış ve yapılan çalışma sonucunda 3 farklı

³ OIML R46-1/-2 rehber dokümanına göre aktif elektrik sayacı doğruluk değerlerine göre A, B, C ve D sınıfı olarak kategorize edilmekte olup 2014/32/AB Yönetmeliğine göre piyasaya arz aşamasında D sınıfı için belirlenmiş bir ölçüm hatası sınırı bulunmamaktadır. B Sınıfı, tüketimin 5000 kWh/yıl seviyesini aştığı veya ilgili otorite tarafından seçilen başka bir değer olduğu büyük tüketiciler için önerilen en düşük doğruluk sınıfıdır. A, B ve C sınıfı sayaç için sırasıyla yasal olarak maksimum izin verilebilir hata değerleri güç

frekans taramasına göre birinci sayaç için ortalama 0,037% seviyesinde ikinci sayaç için ortalama 0,046% ölçüm hatasına sahip olduğu belirlenmiş olup ilgili standartların frekans etkisi dikkate alınarak bu testlerin geliştirilmesine katkı sunacak şekilde belirlendiği sonucuna ulaşıldığı anlaşılmaktadır.

Costa (2022) tarafından yapılan araştırmada, dört adet IEC 0,2S ve 0,5S doğruluk sınıfına sahip elektrik sayacının test edilerek çift yönlü elektrik sayacının doğrudan ve ters güç akışlarında elektrik enerjisini ölçerken performansını ve metrolojik değerlendirmesini odaklanılmıştır. Ayrıca, çalışmada kalibrasyon sonuçları üzerinde yapılan karşılaştırmalar sonucunda her iki yöndeki ölçüm sonuçları arasındaki farkın ölçüm belirsizliği ve izin verilen maksimum hatalara kıyasla önemli olmadığını gösterdiği sonucuna ulaşıldığı belirtilmektedir.

Bu bölümde yer verilen literatür taraması sonuçlarının daha kolay bir şekilde karşılaştırılabilmesi için yapılan çalışmalar tablo halinde Çizelge 2.1’de sunulmaktadır.

Çizelge 2.1. Literatür taraması sonuçları

Kaynak	Çalışma Konusu	Kullanılan Yöntem	Kullanılan Parametre	Bulgu
Yazıcıoğlu (2016)	Elektrik sayacında kaybolan enerjiyi en aza indirmek için alüminyum alaşımların özellikleri ve deformasyonları hakkında incelemeler yapılmıştır.	Bin serisi alüminyum alaşımın bakır kaplaması yapılmıştır. Bu teller ile birlikte benzer özelliklere sahip değişik kalınlıklardaki teller önce sabit akım değerlerinde sonra farklı tork değerlerinde ayrı ayrı olacak şekilde test edilerek direnç miktarları ölçülmüş ve sonrasında karşılaştırması yapılmıştır.	Seçilen alüminyum alaşım serisinin bakır kaplaması yapılarak testlerde kullanılmıştır.	Bu karşılaştırma sonucunda, akımın sabit olduğu durumda, tork değeri arttıkça malzeme direncinin azaldığı anlaşılmıştır. Bu durumun gerekçesinin ise, artan tork kuvveti ile telin temas yüzeyinin artmasına sebep olduğu durumu gösterilmiştir. Bu araştırma sonucunda, elektrik sayacının ölçümlerinde oluşan hataya üretimde kullanılan tellerin malzeme yapısının ve tork değerinin etki ettiği bulgusuna ulaşılmıştır.

faktörünün “1” olduğu durumda; $\pm 2,5\%$, $\pm 1,5\%$ ve $\pm 1,0\%$ iken güç faktörünün 0,5 veya 0,8 olduğu durumda $\pm 2,0\%$, $\pm 1,0\%$ ve $\pm 0,5\%$ olarak belirlenmiştir (Ölçü Aletleri Yönetmeliği, 2016).

Çizelge 2.1. (devam) Literatür taraması sonuçları

<p>Jaiswal, Wath ve Ballal (2016)</p>	<p>Matematiksel modellerle açıklanamayan dinamik ve doğrusal olmayan sistemlerde enerji ölçümündeki hatayı belirlemek amacıyla SISO sistemi üzerine odaklanarak geliştirilen modelin etkinliği araştırılmıştır.</p>	<p>Doğrusal olmayan otoregresif dışsal girdili modele (NARX) sahip YSA kullanılmıştır.</p>	<p>DeneySEL veriler ve simülasyon sonuçları</p>	<p>Mikroişlemci tabanlı enerji ölçüm cihazının doğruluğunun gerilim ve akım sensöründen, analog/dijital dönüştürücülerin çözünürlüğünden, enerji hesaplamada kullanılan örnekleme oranından, benimsenen algoritmanın özelliklerinden, gerilimin spektral içeriği gibi diğer faktörlerden etkilendiği anlaşılmıştır. Ayrıca, mevcut dalga biçimi, güç faktörü, yükleme koşulu, kararlılık, sıcaklık ve nemin de çalışma hatasına katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Önerilen yöntemin SISO, MIMO ve MISO sistemleri için uygulanabilir olduğu kanaatine varılmıştır.</p>
<p>Ma, Teng, Tang, Qui ve Yang (2022); Zhang ve diğerleri (2021)</p>	<p>Elektronik elektrik sayacının fiziksel ve tasarımsal özelliklerinin haricinde sıcaklık, basınç, nem, rüzgâr ve ultraviyole gibi çevresel faktörlerden kaynaklı olarak çalışma süresine göre ölçüm hatasının etkilenip etkilenmediğine yönelik incelenme yapılmıştır.</p>	<p>Çevresel faktörlerin etkisine göre yapay zekâ ile bir tahmin modeli kullanılmıştır.</p>	<p>Sıcaklık, basınç, nem, rüzgâr ve ultraviyole gibi çevresel faktörlere ait gerçek veriler kullanılmıştır.</p>	<p>Çevresel sıcaklık değerlerinin akıllı elektrik sayacının çalışma sırasındaki ölçüm hatasına etkisinin pozitif yönde, nemin ise negatif yönde azımsanmayacak derecede etkili olduğu belirlenmiştir.</p>

Çizelge 2.1. (devam) Literatür taraması sonuçları

Kaczmarek (2016)	Elektrik enerji sistemlerinde ölçü transformatörlerinden kaynaklı olarak ortaya çıkan harmonik bozulmaların ölçüm hatasına etkisini incelemek amaçlanmıştır.	Laboratuvar çalışmalarında elde edilen sonuçlar üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır.	2 adet dijital güç ölçüm cihazı kullanılarak ölçü transformatörü bağlı sistem üzerinden ölçümler yapılmıştır.	Enerji ölçümlerinde hesaplanan bileşik hataya ve faz kaymalarına dış ortamdan gelen etkilerle birlikte sistem içerisinde yer alan gerilim ve akım ölçüm transformatörlerinin kullanımından kaynaklanan harmonik bozulmaların da etkili olduğu, bu etkinin doğrudan akım ve gerilim bozulmalarının toplamı şeklinde belirtilmesinin uygun olmadığı, bunun yerine bir düzeltme faktörü belirlenerek bileşik hatanın etkisinin dikkate alınmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.
Zhang ve diğerleri (2018)	Aktif elektrik sayacının çalışması sırasındaki bileşik ölçüm hatasına etki eden içsel faktörlerin akım, gerilim, frekans, güç faktörü, sıcaklık, konumlandırma(eğim), kararsızlık ve harmonik bozulmalar olduğu, konumlandırma ve sıcaklık gibi bazı faktörlerin etkisinin az olduğu, bu hatanın tanımının ve unsurlarının OIML R46-1/-2, 2012 dokümanında ayrıntılı olarak açıklandığı, bileşik hatanın matematiksel olarak modellendiği belirtilerek OIML R46 dokümanında belirtilen bu modelin etkilerini gözlemek amaçlanmıştır.	Deneysel şablon kullanmıştır.	2 adet dijital güç ölçüm cihazı üzerindeki ölçüm hataları FLUKE6100B sinyal üreticinin bağlı olduğu sistemde test edilmiştir.	Araştırma çalışmasında önerilen şablonun OIML R46'da belirtilen modele uygun olduğu, referans ve uygulama açısından anlamlı olduğu belirtilmektedir.

Çizelge 2.1. (devam) Literatür taraması sonuçları

<p>Goncalves, Canesin, Pinto, Galotto ve Godoy (2009)</p>	<p>İndüksiyon ve elektronik aktif elektrik sayacının ölçüm hatasını incelemek ve tahmin etmek amaçlanmıştır.</p>	<p>Genelleştirilmiş Eklemeli Model (GEM) ve Ridge regresyon analizi yöntemi kullanılmıştır.</p>	<p>Farklı ve dengesiz yüklere sahip bir enerji sisteminden elde edilmiş 26 çift test dalgasına sahip gerçek deneysel test verileri kullanılarak bir model geliştirilmiştir.</p>	<p>Bu metodolojinin, modellenemeyen ve yaklaşım odaklı durumların hatalarını azaltarak analitik modelin negatif etkilerini minimize ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu modelin aktif veya reaktif enerji sistemlerinde diğer ölçüm hatasını belirleme modellerine de uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu modelin 5% gerilim harmonik bozulması değerinden, 50% akım harmonik bozulması değerinden az olan kararsız sistemlerde ölçüm hatası tahmini için uygun olduğu ifade edilmiştir.</p>
<p>Bernieri, Ferrigno, Laracca ve Luongo (2008)</p>	<p>2014/32/EU Direktifinin gerekliliklerinin analizini yapmak ve ayrıca kolay ve ekonomik olması açısından sanayi ve hane kullanımları için elektrik sayacının uzaktan kalibrasyon işleminin yapılabilmesinin mümkün olduğunu göstermeye odaklanmıştır.</p>	<p>Deneysel sonuçlar üzerinden karşılaştırma yapılmıştır.</p>	<p>Uygun bir cihaz tasarımı ile izlenebilirliğinin sağlanabileceğini göstermek için çalışmalar yapılmıştır.</p>	<p>2014/32/EU Direktifinin elektrik sayacının uzaktan kalibrasyonuna yönelik olarak bir revizyona ihtiyacı olduğu belirtilmiştir. Bu doğrultuda geliştirilecek uzaktan kalibrasyon cihazının optimizasyonunun sonraki çalışmalarda incelenebileceği ifade edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. (devam) Literatür taraması sonuçları

<p>Wu, Mu, Xu, Ji, Bao ve Quyang (2017)</p>	<p>Frekans ofset değerinin dijital elektrik sayacının sahada kullanılmaları sırasında aşırı hatalara sebebiyet verebileceği, bu sebeple söz konusu durumun hem teorik hem de simülasyon sonuçları ile araştırılması amaçlanmıştır.</p>	<p>Üçgen pencere ağırlıklı algoritma modeli kullanılmıştır.</p>	<p>Dijital elektrik sayacında aktif ve reaktif enerji ölçümleri için, 1, 0,8 ve 0,5 güç faktörlerinde 49,5 Hz. ile 50,5 Hz. arasında değişen frekanslardaki teorik ve simülasyon sonucuna göre ölçüm hataları kullanılmıştır.</p>	<p>Yapılan çalışmalar sonucunda dijital elektrik sayacının reaktif enerji ölçümlerinde bu hatanın aktif enerji ölçümüne oranla daha yüksek olduğu, simülasyon sonuçlarına göre mevcut hesaplama algoritması kullanılan sayacın 49.5-50.5 Hz. frekans aralığı için belirlenen doğru ölçüm gerekliliğini tam olarak karşılayamadığı ve gerçek sayaç test sonuçlarında da bu sonucun gözlemlendiğinin belirlenmiştir. Genel olarak sayaç üreticilerinin aktif enerji açısından bu hatayı azaltacak şekilde önleyici tasarımlar geliştirdiğinin ancak reaktif enerji açısından bu durumun dikkate alınmamış olabileceğine kanaat getirilmiştir. Bu çalışmada, geliştirilen üçgen pencere ağırlıklı algoritma kullanılarak bu etkinin azaltılabileceği sonucuna varıldığı belirtilmektedir.</p>
<p>Kong, MA, Zhao, Li ve Teng (2019)</p>	<p>Elektrik sayacının mevcut doğrulama yöntemleri göz önüne alındığında, yüksek bakım maliyeti, düşük doğruluk ve çalışma kapsamındaki kısıtlar gibi sorunların mevcut olduğunun görülmesi sebebiyle kullanıcı tarafında elektrik sayacı tarafından toplanan büyük ölçekli ölçüm verileri analiz edilerek elektrik sayacının çalışma hatası için çevrimiçi bir tahmin yöntemi araştırılmıştır.</p>	<p>Bu yöntemde ölçüm hatasını tahmin etmek ve tahminlerin doğruluğu belirleyebilmek için yinelemeli en küçük kareler ve çift parametrelili yöntemlerin esas alınmıştır.</p>	<p>Belirli bir bölgede kullanılan elektrik sayacındaki güç tüketim oranı, yük durumu, bozulma oranı, gerilim seviyesi ve tipi gibi veriler kullanılarak çalışmalar yapılmıştır.</p>	<p>Gerçekleştirilen program kontrollü yük simülasyon sistemi aracılığıyla önerilen yöntemin daha yüksek doğruluk ve uygunluk ile test edildiği belirlenmiştir.</p>

Çizelge 2.1. (devam) Literatür taraması sonuçları

Shklyarskiy, Hanzelka ve Skamvin (2020)	Harmonik bozulmaların doğrusal olmayan yüklere sahip olduğu bir elektrik ağında elektrik enerji sayacının işletilmesi üzerindeki etkisinin incelendiği, genel harmonik bozulmaların aktif elektrik sayacı üzerindeki etkileri dikkate alınırken reaktif elektrik sayacı üzerindeki etkilerinin pek dikkate alınmadığı belirtilerek konu bu yönüyle incelenmiştir.	Elektronik elektrik sayacı kullanılarak güç ölçümündeki harmonik bozulmanın etkisi ve reaktif enerji ölçümünde kapasitör bankların kullanımının etkisini belirlemek için deneysel sonuçlar temel yöntemlerle hesaplanarak karşılaştırılmıştır.	Laboratuvar ortamında elde edilmiş aktif elektrik sayacının harmonik bozulmalara sahip yüklerdeki ölçüm hatası verileri kullanılmıştır.	Aktif enerji ölçümündeki hata üzerindeki maksimum etkinin dikkate alınan harmoniklerin sayısı ve bunların genliği ve reaktif enerji ölçümündeki hatanın ayrıca temel ve harmonik frekanslardaki faz açısından etkilendiğinin laboratuvar koşullarında doğrulaması yapılmıştır. Ayrıca kapasitör kullanımının reaktif enerji ölçümündeki hatanın ve harmoniklerin faz kayma açısının değişim aralığının önemli ölçüde arttığını gösterdiği belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda gerilim ve akım bozulma değerlerinin izin verilen hata değerlerini aşmazsa, bu hatanın en fazla %5-7 aralığında olduğunun anlaşıldığı ifade edilmiştir.
Bernieri, Betta, Ferrigno ve Laracca (2012)	Elektrik enerjisi ölçümüne ilişkin olarak 2014/23/EU Direktifinin ve uyumlaştırılmış standartlarının zorunlu kıldığı test gerekliliklerinin analizini yapmak ve ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini zorlayabilecek miktarda bir serbestlik olup olmadığını incelemek amaçlanmıştır.	Birçok elektrik sayacının gerçek verileri kullanılarak yürürlükte olan ve ayrıca taslak standarttaki değerler ile 2014/32/EU Direktifinde yer alan değerler karşılaştırılarak sonuçlar arasında anlamsal bir boşluk olup olmadığı incelenmiştir.	Gerçek test verileri 4 farklı durum için kullanılmıştır.	Elektrik sayacının ölçüm sonuçlarının güvenilirliğinin ve uyumluluğunun belirli bir değere kadar serbestlik durumunun mümkün olduğu değerlendirilmesine ulaşıldığı görülmüştür.

Çizelge 2.1. (devam) Literatür taraması sonuçları

<p>Çetina, Roscoe ve Wright (2017)</p>	<p>Bozuk dalga biçimi koşulları altında elektrik sayacının piyasaya arzı aşamasında gerekli olan testlerin dahil edilmesinin geçerliliği ve olası etkisinin yanı sıra, faturalandırma amacıyla elektrik sayacına uygulanan standartlara ilişkin yeni doğruluk gereklilikleri incelenmiştir. Ayrıca, bu incelemede elektrik sayacının sinüzoidal olmayan gerilim veya akım dalga formuna maruz kaldıklarında karşılaştıkları sorunlar, daha sonra doğrulukla ilgili uygulanabilir standartlar ve son olarak, sinüzoidal olmayan dalga şekli koşulları altında elektrik sayacına yönelik testlerin genişletilmesinin uygunluğu araştırılmıştır.</p>	<p>Deneysel sonuçlar üzerinden karşılaştırma yapılmıştır.</p>	<p>Elektrikli ısıtıcı, LED lamba, floresan lamba, elektromekanik sayaç farklı faz açılarında test edilmiştir.</p>	<p>Enerji sistemlerinde farklı cihaz ve yüklerden kaynaklı bozulmaların özellikle düşük gerilimli sistemlerde önemli etkiye sahip olduğu ve mevcut yasal düzenlemelere göre elektrik sayacının 2% seviyesine kadar müsaade edilebilir yasal toleransları olduğu dikkate alındığında düzenleyici otoritelerinin ilgili standartların içereceği doğruluk testlerin adil bir enerji ticareti kapsamında nasıl oluşturulması gerektiğine yönelik mutabık kalınması gerektiği sonucuna varıldığı görülmektedir.</p>
<p>Bartolomei, Cavaliere, Mingott, Peretto ve Tinarelli (2019)</p>	<p>Elektrik sayacının çalışma gerekliliklerinin her zaman örtüşmeyen ve aynı kuralları öngören farklı standartlar tarafından düzenlendiği, bu durumun oluşturduğu karışıklığı gidermek için bu çalışma ile güncel standartlar arasında kısa bir karşılaştırma yapılmıştır.</p>	<p>Deneysel çalışmaların yapılması ve sonuçların karşılaştırılması suretiyle incelenmiştir.</p>	<p>Bu amaçla kullanıma hazır iki adet B sınıfı elektrik sayacı kullanılmıştır.</p>	<p>3 farklı frekans taramasına göre birinci sayaç için ortalama 0,037% seviyesinde ikinci sayaç için ortalama 0,046% ölçüm hatasına sahip olduğu belirlenmiş olup ilgili standartların frekans etkisi dikkate alınarak bu testlerin geliştirilmesine katkı sunacak şekilde hata oranlarının belirlendiği sonucuna ulaşıldığı anlaşılmaktadır.</p>

Çizelge 2.1. (devam) Literatür taraması sonuçları

Costa (2022)	Çift yönlü elektrik sayacının doğrudan ve ters güç akışlarında elektrik enerjisini ölçerken performansına ve metrolojik değerlendirmesine odaklanılmıştır.	Deneysel çalışmaların yapılması ve sonuçların karşılaştırılması suretiyle incelenmiştir.	Dört adet IEC 0,2S ve 0,5S doğruluk sınıfına sahip elektrik sayacı test edilmiştir.	Kalibrasyon sonuçları üzerinde yapılan karşılaştırmalar sonucunda her iki yöndeki ölçüm sonuçları arasındaki farkın, ölçüm belirsizliği ve izin verilen maksimum hatalara kıyasla önemli olmadığını gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.
--------------	--	--	---	---

Bu literatür taraması çalışmaları sonucunda, elektrik sayacının çalışma hatasına etki eden içsel ve dışsal faktörlerin neler olduğu araştırılmış, etki seviyeleri incelenmiş, akabinde ölçüm hatası tahmini için hangi yöntemlerin uygulanabilir olduğu belirlenmiş ve tez çalışması bu doğrultuda ilerletilmiştir.

3. ELEKTRİK SAYACI TİP TESTLERİ, İSTATİSTİKSEL ANALİZ YÖNTEMLERİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI

Elektrik sayacı, enerji devresinin belirli bir bağlantı yerinden yapılan ölçümünde, iletilen enerjinin zamana göre yekûn sonucunu kayıt altına alan aygıt olarak bilinmektedir (Şahin, 2007). Başka bir ifadeyle, gücü zamana göre entegre ederek elektrik enerjisini sürekli olarak ölçen ve sonucunu kaydeden cihaz olarak da bilinmektedir (OIML R46-1/-2, 2012).

Bu bağlamda elektrik sayacı; elektrik devresinden geçen akımın türüne göre doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) sayaç; tasarım özelliğine göre mekanik, elektromekanik ve elektronik sayaç; bağlantı yapısına göre monofaze ve trifaze sayaç; ölçülen enerji tipine göre aktif, reaktif ve kombi tipi sayaç; imalat ve bağlanma şekline göre sekonder doğrudan bağlantılı, primer akım trafosuna bağlı ve primer akım ve gerilim trafosuna bağlı sayaç; fonksiyonlarına ve tüketim şekline göre normal sayaç, talep sayacı, çoklu tarife sayacı, çift yönlü sayaç (ithalat-ihracat), yük profillerini kaydeden sayaç ve haberleşme özellikli sayaç gibi türleri vardır (Tasci ve Düzkaya, 2023). Elektromekanik bir elektrik sayacının temsili bir görseli ise Şekil 3.1’de aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Elektromekanik elektrik sayacı (Fleming, 1914)

Aktif elektrik enerji sayacı, sistemde kullanılan elektrik enerjisinin aktif enerji kısmını ölçmeye yarayan aygıt olarak tanımlanabilir (MID, 2014; ÖAY, 2016). Diğer bir ifadeyle, aktif gücün zamana göre integralini alarak aktif enerjiyi ölçmesi amaçlanan cihaz olarak da bilinmektedir. Statik (reaktif) sayaç, akımın ve gerilimin yarı iletken (elektronik) elemanlar

üzerinde, ölçülecek enerjiyle orantılı bir çıktı üretecek şekilde davranış gösterdiği sayaç olup reaktif enerjiyi ölçmek üzere tasarlanmışlardır (Türk Standardları Enstitüsü [TSE] TS EN 50470-1, 2007).



Şekil 3.2. Kombi tip elektrik sayacı (STB, 2017)

Kombi tip sayaç ise gerek reaktif gerekse de aktif enerji ölçümü gerçekleştirebilme kabiliyetine sahip bir sayaç olup genellikle insanların yoğun olarak bulunduğu fazla miktarda enerji kullanılan yapılarda tercih edilmektedir. Mevzuat gereğince, 9 kW üzeri güce sahip yapılarda bu elektrik sayacının kullanılması gerekmektedir (Sezer, Daldal ve Yücedağ, 2020). Kombi tip elektrik sayacına ait örnek bir görsel Şekil 3.2 olarak sunulmaktadır.

3.1. Elektrik Sayacının Metrolojik Doğruluğuna İlişkin Tip Testleri

Ülkemizde, elektrik sayacı, 7223 sayılı Ürün Güvenliği ve Teknik Düzenlemeler Kanunu (ÜGTDK, 2020) ve 3516 sayılı Ölçüler ve Ayar Kanunu (ÖAK, 1989) ile bu Kanunlara dayanılarak hazırlanmış olan Ölçü ve Ölçü Aletleri Tip Onay Yönetmeliği (ÖÖATOY, 2008) ve Ölçü Aletleri Yönetmeliği (2014/32/AB) (ÖAY, 2016) kapsamında gerekli

işaretleme, uygunluk değerlendirme, muayene ve damgalama işlemleri gerçekleştirilmiş olarak mevzuatına uygun bir şekilde kullanıma sunulması gerekmektedir.

Çizelge 3.1. Referans koşulları (TS EN 62052-11, 2021: Tablo 10)

Etken değişken	Referans Değer	İzin verilen tolerans
Ortam sıcaklığı	Referans sıcaklığı veya yokluğunda 23°C	±2 °C
Ortam bağıl nemi	45 % - 75 %	-
Hava basıncı	86 kPa - 106 kPa	-
Gerilim	Nominal gerilim	±1,0 %
Frekans	Nominal frekans	±0,3 %
Faz sırası	L1 – L2 – L3	-
Gerilim dengesizliği	Bağlı bütün fazlar	-
Dalga formu	Sinüzoidal gerilim ve akım	Toplam bozulma faktörü <2 %
Dış kaynaklı sürekli manyetik indüksiyon	Sıfır	-
Güç frekanslı manyetik alanı	Sıfıra eşit manyetik alan	Yüzde hatanın değişmesine neden olan indüksiyon değeri ±%0,1 'den büyük ancak her durumda 0,05 mT'den küçük olmalıdır
Elektromanyetik radyo frekans alanı 30 kHz'den 6 GHz'e kadar	Sıfır	<1 V/m
Aksesuarların çalıştırılması	Yok	-
Tetiklenen radyo frekans alanlarına göre bozulmalar, 150kHz -80 MHz	Sıfır	<1 V
İletilen, diferansiyel mod bozulmalar ve sinyalizasyon frekans aralığı 2 kHz ila 150 kHz AC güç bağlantı noktalarında	Sıfır	<0,1 A
DC voltajı ve akım dalgalanması	Sıfır	±1,0 %
Toprak direnci	Sıfır	<2 Ω

Söz konusu mevzuat kapsamında, aktif elektrik sayacı 2014/32/AB Yönetmeliği çerçevesinde gerekli piyasaya arz işlemleri Onaylanmış Kuruluşlar tarafından yapılarak reaktif elektrik sayacı ile kombi tip elektrik sayacı ise Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından ulusal tip onayı verilmek suretiyle piyasaya arz edilmektedir.

Bu bağlamda, elektrik sayacının metrolojik fonksiyonlar açısından başarılı olarak kabul edilebilmesi için gerçekleştirilmesi gereken tip testlerinde referans olarak alınan temel

kriterler Çizelge 3.1’de verilmektedir. Bu testlerde, sayacın kapağı kapalı olarak ve tüm parçaların topraklama bağlantısı tamamlanmış bir şekilde test edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, testler gerçekleşmeden önce sayacın uygun bir termal kararlılık seviyesine ulaşması için yeterli bir süre beklenmesi gerekmektedir. İlâveten, her bir akım değeri için sayacın 5 dakikayı geçmeyecek şekilde çalıştırılarak dengelenmesi sağlanmalıdır (TS EN 62052-11, 2021).

Öte yandan; sayacın, faz, akım ve gerilim ölçüm bağlantılarının doğru ve uygun bir şekilde yapılmasına dikkat edilmelidir. Testlerde, A ve B sınıfı elektrik sayacı için izin verilen akım ve gerilim hata payı $\pm 2\%$, C ve D sınıfı elektrik sayacı için $\pm 1\%$ olarak belirlenmiştir. Fakat, TS EN 62052-11 standardında A, B ve C sınıfı için bu hata miktarı hepsi için $\pm 1\%$ olarak belirtilmektedir. Her iki dokümanda A, B, C ve D sınıfı sayaç için faz kaymasının ise benzer olarak en fazla 2° ’lik bir hataya izin verecek şekilde düzenlendiği görülmektedir. Bu testlerin öncesinde varsa sayaca ilave soket ve ekran gibi ekipmanların da ayrıca bu şartları sağlaması gerekmektedir. Ayrıca, gerçekleştirilecek testlerde referans olarak kullanılacak sayacın doğruluğunun da yeterli seviyede olması önem arz etmektedir (OIML R46-1/-2, 2012).

Diğer taraftan; testlerin, bileşik ölçüm belirsizliği açısından 95% güven aralığında olması ve MİH değerinin 1/5’inden daha fazla hataya sahip olmaması gerekmektedir. Bu koşul; 0,1S sınıfı sayaç için 1/3 oranı şeklinde belirlenmiştir. Üç fazlı bir AC sayaç için yapılacak testin 1,0 güç faktöründe ve 0,05 In akım değerinde üç ölçüm yapılmasını içerecek şekilde olması ve her ölçümden sonra akım devrelerine ve gerilim devrelerine faz sırası değişmeden 120° ’nin üzerindeki bir derece ile bağlantısı yapılarak gerçekleştirilmesi gerekir. Bu testlerde, akım bir etki büyüklüğü olarak kabul edilmez ve ayrıca değeri referans koşullarında belirtilmez, çünkü sayacın enerji ölçüm doğruluğu, etki miktarlarını referans değerlerinde tutarken değişen yük akımına göre belirlenir (TS EN 62052-11, 2021).

Burada yer verilen birçok test için, diğer etki miktarları referans koşullarda sabit tutulursa ölçülen gücün sabit olması beklenir. Fakat, gerilim değişiminin etkisi ve yük dengesizliği gibi bazı testler için bunun mümkün olmadığı bilinmektedir. Bu sebeple, ölçüm hata kayması her zaman mutlak güç olarak ölçülmesinden ziyade göreceli hatanın kayması olarak ölçülmesi daha doğru olacaktır (OIML R46-1/-2, 2012).

3.1.1. Temel çalışma hatasının belirlenmesi testi

Bu testin amacı, aktif elektrik sayacının ölçüm hatasına etki eden temel etkiyi ölçmektir. Bu amaçla, elektrik sayacının farklı güç faktörlerinde akım değıştikçe meydana çıkan hata miktarını ölçülür. Dengeli yüklere veya tek fazlı yüklere sahip tek fazlı ve çok fazlı A, B ve C sınıfı aktif elektrik sayacının izin verilen yüzdesel hata miktarları Çizelge 3.2’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.2. Referans koşullarda yüzdesel hata limitleri (TS EN50470-3, 2022: Tablo 5)

Doğrudan bağlı veya transformatörle çalışan sayaç için akım değeri	Güç Faktörü	Limit hata değeri (%)		
		A (±)	B (±)	C (±)
$I_{tr} \geq I \geq I_{min}$	1	2,5	1,5	1,0
$I_{max} \geq I \geq I_{tr}$	0,5; 0,8 ve 1	2,0	1,0	0,5

Çizelge 3.2’ye göre, aktif elektrik sayacın tek fazlı yük ve dengeli çok fazlı yük taşıdığı durumlarda I_{ref} ve birim güç faktörü arasındaki yüzde hata farkı, A, B ve C sınıfı indeksleri için %2,5, %1,5 ve %1’i geçmemesi gerekmektedir (ÖAY, 2016: Ek V).

Çizelge 3.3. Akım değeri için ilave gereklilikler (ÖAY, 2016: Ek V)

	A	B	C
Doğrudan bağlı			
I_{st}	$\leq 0,05 * I_{tr}$	$\leq 0,04 * I_{tr}$	$\leq 0,04 * I_{tr}$
I_{min}	$\leq 0,5 * I_{tr}$	$\leq 0,5 * I_{tr}$	$\leq 0,3 * I_{tr}$
I_{max}	$\geq 50 * I_{tr}$	$\geq 50 * I_{tr}$	$\geq 50 * I_{tr}$
Transformatör bağlı			
I_{st}	$\leq 0,06 * I_{tr}$	$\leq 0,04 * I_{tr}$	$\leq 0,02 * I_{tr}$
I_{min}	$\leq 0,4 * I_{tr}$	$\leq 0,2 * I_{tr}^{(1)}$	$\leq 0,2 * I_{tr}$
I_n	$= 20 * I_{tr}$	$= 20 * I_{tr}$	$= 20 * I_{tr}$
I_{max}	$\geq 1,2 * I_n$	$\geq 1,2 * I_n$	$\geq 1,2 * I_n$
Elektromekanik B Sınıfı sayaç hakkında $I_{min} \leq 0,4 * I_{tr}$ olarak kullanılır.			

Üreticinin, elektrik sayacının doğru bir şekilde çalışabilmesi için nominal frekans, nominal gerilim ve maksimum, minimum ve nominal akım gibi çalışma durumlarına ilişkin bilgileri sunması gerekmektedir. Ayrıca, sayaç Çizelge 3.3'te belirtilen şartları sağlamalıdır (ÖAY, 2016: Ek V).

Öte yandan, dengeli veya tek fazlı yük değerlerine ait sayaçlar için minimum ve maksimum akım değerlerinin dışındaki akım değerlerinde izin verilen hata miktarı Çizelge 3.4'te belirtilen hata miktarı limitini geçmemelidir (OIML R46-1/-2, 2012).

Çizelge 3.4. Referans koşullarda yüzdesel hata limitleri (OIML R46-1/-2, 2012: Tablo 2)

Doğrudan bağlı veya transformatörle çalışan sayaçlar için akım değeri	Güç Faktörü	Limit hata değeri (%)			
		A (±)	B (±)	C (±)	D (±)
$I_{max} \geq I \geq I_{tr}$	1	2,0	1,0	0,5	0,2
	0,5; 0,8 ve 1	2,5	1,5	0,6	0,3
$I_{tr} > I \geq I_{min}$	1	2,5	1,5	1,0	0,4
	0,5; 0,8 ve 1	2,5	1,8	1,0	0,5
$I_{min} > I \geq I_{st}$	1	2,5 I_{min}/I	1,5 I_{min}/I	1,0 I_{min}/I	0,4 I_{min}/I

3.1.2. Gerilim değişimlerinden kaynaklı hata testi

Bu testin amacı, aktif elektrik sayacının ölçüm hatasına gerilim değişimlerinin etkisini ölçmektir. Bu amaçla, elektrik sayacının gerilimi değiştirilerek nominal çalışma gerilimindeki ölçüm sonucundan sapma miktarı belirlenir. Bu tip testi, minimum 0,5 endüktif ve 1,0 güç faktörlerinde, nominal gerilimin 10% eksik ve 10% fazla olduğu gerilim devrelerinde, $10 \cdot I_{tr}$ akım değeri kullanılarak gerçekleştirilir (OIML R46-1/-2, 2012).

Aktif elektrik sayacı, gerilim değişimlerine karşı belirlenen hata limitlerini aşmaması gerekir. Dengeli yüklere veya tek fazlı yüklere sahip tek fazlı ve çok fazlı sayaç için bu limit değerleri Çizelge 3.5'de sunulmaktadır. İmalatçı tarafından test sırasında dikkate alınacak

işlemler TS EN IEC 62052-11:2021/A11:2022 standardının 9.4.3 maddesinde belirtilen şekilde uygulanması gerekmektedir (TS EN 50470-3, 2022).

Çizelge 3.5. Gerilim değişimlerine göre yüzdesel olarak kabul edilebilir hata limitleri (OIML R46-1/-2, 2012: Tablo 4)

Etki Değeri (%)	Doğrudan bağlı veya transformatörle çalışan sayaçlar için akım değeri	Güç Faktörü	Limit hata değeri (%)		
			A (±)	B (±)	C (±)
Gerilim değişimi ±10	$I_{max} \geq I \geq I_{min}$	1	1,0	0,7	0,2
	$I_{max} \geq I \geq I_{tr}$	0,5; 0,8 ve 1	1,5	1,0	0,4

Aktif elektrik sayacının; gerilim, frekans ve güç faktörü aralıkları, Çizelge 3.4.'te gösterilen maksimum izin verilebilir hata (MİH) miktarı gereklerini sağlaması gerekmektedir. Bu frekans ve gerilim aralıkları ise en az Eş. (3.1) ve Eş. (3.2)'de sunulan değerlerde olmalıdır. İlaveten, PF değeri 0,5 endüktif- 0,8 kapasitif aralığında bulunmalıdır (ÖAY, 2016).

$$0,9. U_n \leq U \leq 1,1. U_n \quad (3.1)$$

$$0,98. f_n \leq f \leq 1,02. f_n \quad (3.2)$$

3.1.3. Frekans değişimlerinden kaynaklı hata testi

Bu testin amacı, aktif elektrik sayacının ölçüm hatasına frekans değişimlerinin etkisini ölçmektir. Bu amaçla, elektrik sayacının çalışma frekansı değiştirilerek nominal çalışma frekansındaki ölçüm sonucundan sapma miktarı belirlenir.

Bu tip testi, minimum, 0,5 endüktif ve 1 güç faktörlerinde nominal gerilimin 2% eksik ve fazla olduğu frekanslarda $10 \cdot I_{tr}$ akım ile gerçekleştirilir (OIML R46-1/-2, 2012). Dengeli yüklerle veya tek fazlı yüklerle sahip tek fazlı ve çok fazlı aktif elektrik sayacı, frekans değişimlerine karşı belirlenen hata limitlerini aşmaması gerekir. Bu limit değerleri Çizelge 3.6'da sunulmaktadır.

Çizelge 3.6. Frekans değişimlerine göre yüzdesel olarak kabul edilebilir hata limitleri (OIML R46-1/-2, 2012: Tablo 4)

Etki Değeri (%)	Doğrudan bağlı veya transformatörle çalışan sayaçlar için akım değeri	Güç Faktörü	Limit hata değeri (%)		
			A (±)	B (±)	C (±)
Frekans değişimi ±2	$I_{max} \geq I \geq I_{min}$	1	0,8	0,5	0,2
	$I_{max} \geq I \geq I_{tr}$	0,5; 0,8 ve 1	1,0	0,7	0,2

İmalatçı tarafından test sırasında dikkate alınacak işlemler TS EN IEC 62052-11:2021/A11:2022 standardının 9.4.6 maddesinde belirtilen şekilde uygulanması gerekmektedir. Bu amaçla, sayaca gerilim devrelerine belirtilen en yüksek nominal gerilimle enerji verilir. Bu test için ölçülen frekans, imalatçı tarafından belirtilen aralıkta değişmeli ancak nominal frekansın -2% ile +2% aralığında olmalıdır. Birden fazla anma frekansında çalışacak şekilde derecelendirilen sayaç için bu deney, sayacın anma frekanslarının her birine uygulanmalıdır (TS EN 62052-11, 2021).

3.1.4. Sıcaklık değişimlerinden kaynaklı hata testi

Bu testin amacı, aktif elektrik sayacının ölçüm hatasına sıcaklık değişimlerinin etkisini ölçmektir. Bu amaçla, elektrik sayacının çalışma sıcaklığı değiştirilerek nominal çalışma sıcaklığındaki ölçüm sonucundan sapma miktarı belirlenir.

Bu tip testi, minimum, 0,5 endüktif ve 1 güç faktörlerinde I_{tr} , $10 \cdot I_{tr}$ ve I_{max} akım değerlerinde gerçekleştirilir (OIML R46-1/-2, 2012). Aktif elektrik sayacı, sıcaklık değişimlerine karşı belirlenen hata limitlerini aşmaması gerekir. Dengeli yüklerle veya tek fazlı yüklerle sahip tek fazlı ve çok fazlı sayaç için bu limit değerleri Çizelge 3.7'de sunulmaktadır.

İmalatçı tarafından test sırasında dikkate alınacak işlemler TS EN IEC 62052-11:2021/A11:2022 standardının 9.4.4 maddesinde belirtilen şekilde uygulanması gerekmektedir. Bu amaçla, sıcaklık katsayısının belirtilen çalışma sıcaklığı aralığı için belirlenmesi gerekmektedir.

Çizelge 3.7. Sıcaklık değişimlerine göre yüzdesel olarak kabul edilebilir hata limitleri
(TS EN IEC 50470-3, 2022: Tablo 7)

Etki Miktarı	Doğrudan bağlı veya transformatörle çalışan sayaçlar için akım değeri	Güç Faktörü	Limit hata değeri (%)		
			A (±)	B (±)	C (±)
Sıcaklık değişimi					
5°C'den 30°C'ye	$I_{max} \geq I \geq I_{min}$	1	1,8	0,9	0,5
	$I_{max} \geq I \geq I_{tr}$	0,5 ind- 0,8 cap	2,7	1,3	0,9
-10°C'den 5°C'ye 30°C'den 40°C'ye	$I_{max} \geq I \geq I_{min}$	1	3,3	1,6	1,0
	$I_{max} \geq I \geq I_{tr}$	0,5 ind- 0,8 cap	4,9	2,3	1,6
-25°C'den -10°C'ye 40°C'den 55°C'ye	$I_{max} \geq I \geq I_{min}$	1	4,8	2,4	1,4
	$I_{max} \geq I \geq I_{tr}$	0,5 ind- 0,8 cap	7,2	3,4	1,4
-40°C'den -25°C'ye 55°C'den 70°C'ye	$I_{max} \geq I \geq I_{min}$	1	6,3	3,1	1,9
	$I_{max} \geq I \geq I_{tr}$	0,5 ind- 0,8 cap	9,4	4,4	3,1

Öte yandan, ilgili doğruluk sınıfı standardında aksi belirtilmediği sürece bu çalışma sıcaklık aralığının 20 K genişliğinde alt aralıklara bölünmesi gerekmektedir. Daha sonra bu alt aralıkların her biri için sıcaklık katsayısı, her alt aralığın ortasınının 10 K üstünde ve 10 K altında ölçümler alınarak belirlenmesi gerekmekte ve deney sırasında sıcaklık hiçbir durumda belirtilen çalışma sıcaklığı aralığının dışında olmamalıdır (TS EN 62052-11, 2021).

3.1.5. Harmonik bozulma hata testi

Bu testin amacı, sinüzoidal olmayan çeşitli akım ve gerilim sinyallerini ölçerken ölçü aletinin doğruluğunu sağlamaktır. Sinüzoidal koşullardaki içsel hatayla karşılaştırıldığında hata değişimi, nominal gerilime ve akıma harmonikler eklenerek ölçülür. Deneyde, ilgili standardında belirtilen dörtgen ve tepe dalga formları kullanılarak gerçekleştirilir. Bu amaçla, tek bir harmonik değerinin genliği, gerilim için $0,12 U_1/h$ 'den ve akım için I_1/h 'den fazla olmamalıdır. Burada h, harmonik sayısını, U_1 ve I_1 ise ilgili temel gerilim ve akım değerlerini ifade etmektedir. Faz açısı ise, sırasıyla temel frekans geriliminin veya akım bileşeninin sıfır geçişine göre hesaplanır (OIML R46-1/-2, 2012). Dolayısıyla, aktif elektrik sayacının harmonik bozulmalarına ilişkin hata limitlerini aşmaması gerekir.

İmalatçı tarafından test sırasında dikkate alınacak işlemler TS EN IEC 62052-11:2021/A11:2022 standardının 9.4.2 maddesinde belirtilen şekilde uygulanması gerekmektedir. Akım ve gerilim devrelerinde harmonik bileşenler, tek harmonikler ve alt harmoniklerin hata değişimleri hem TS EN 50470-3:2022 standardının 7.10 maddesinde yer alan Tablo 9’unda hem de Ölçü Aletleri Yönetmeliğinin (2014/32/AB) Ek 5’inin Tablo 3’ünde verilmiş olup bu değerler Çizelge 3.8’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.8. Uzun süreli harmonik bozukluklar için kritik değişim değerleri (ÖAY, 2006: Tablo 3)

Bozulma (Akım devrelerinde)	Limit hata değeri (±%)		
	A sınıf	B sınıf	C sınıf
Harmonik bileşenler	1	0,8	0,5
DC ve harmonikler	6	3	1,5

Diğer taraftan, elektromekanik elektrik sayacı için bu değerler düzenlenmemiştir (ÖAY, 2016).

3.1.6. Maksimum izin verilebilir hatanın hesaplanması

Metrolojik açıdan aktif elektrik sayacının MİH değerinin hesaplanmasında x, y ve z gibi tanımlanabilecek her bir faktörün değişim etkisinin farklı olarak değerlendirilmesi gerekir (ÖAY, 2016: EK V). OIML rehber dokümanlarında ve imalatçı tip test raporlarında MİH hatası kompozit hata olarak da kullanılmaktadır. Bu hata, tip testi sonuçları kullanılarak belirli bir sayaç tipi için tahmin edilebilirdir (OIML R46-1/-2, 2012). Genel olarak, bileşik ölçüm hatası $\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 + \dots)}$ şeklinde hesaplanır.

Bu çerçevede, literatürde yapılan incelemeler neticesinde, belirli bir yükteki kompozit hatanın hesaplanması için iki yöntem bulunduğu görülmektedir. Birinci yöntem hem OIML R46 rehber dokümanında hem de TS EN 50470-3:2022 standardında yer alırken ikinci yöntem sadece OIML R46 rehber dokümanında bilgi amaçlı olarak sunulmaktadır. Test raporları üzerinde yapılan incelemelerde, imalatçı firmalar tarafından gerçekleştirilen tip testlerinde birinci yöntemin esas alındığı görülmektedir.

Birinci Yöntem:

Bu yöntemde Gauss dağılım yönteminde belirtilen varsayımlar esas alınarak hesaplama yöntemi belirlenmiştir (Zhang ve diğerleri, 2018).

$$e_{c(p,i)} = \sqrt{e^2(PF_p, I_i) + \delta e_{p,i}^2(U) + \delta e_{p,i}^2(f) + \delta e_{p,i}^2(T)} \quad (\text{TS EN 50470-3, 2022}) \quad (3.3)$$

Eş. (3.3)'de yer alan; $e^2(PF_p, I_i)$ terimi belirli bir yükteki sayacın hatasını, $\delta e_{p,i}^2(U)$ terimi aynı yükte gerilim değişiminden gelen yüzdesel hata farkını, $\delta e_{p,i}^2(f)$ terimi aynı yükte frekans değişiminden gelen yüzdesel hata farkını ve $\delta e_{p,i}^2(T)$ aynı yükte sıcaklık değişiminden gelen yüzdesel hata farkını göstermektedir.

İkinci Yöntem:

Bu yöntemde dikdörtgen dağılım yönteminde belirtilen varsayımlar esas alınarak hesaplama yöntemi belirlenmiştir (OIML R46-1/-2, 2012).

$$e_c = 2 * \sqrt{\frac{e_{base}^2}{3} + \frac{e_{gerilim}^2}{3} + \frac{e_{frekans}^2}{3} + \frac{e_{kararsizlik}^2}{3} + \frac{e_{harmonik}^2}{3} + \frac{e_{sicaklik}^2}{3}} \quad (3.4)$$

Eş. (3.4)'te gösterilen; e_{base}^2 terimi, ölçüm belirsizliği dikkate alınarak yapılan maksimum baz hatası testinde ölçülen maksimum hata farkını, $e_{gerilim}^2$ terimi, ölçüm belirsizliği dikkate alınarak yapılan gerilim değişimi testinde ölçülen maksimum hata farkını, $e_{frekans}^2$ terimi, ölçüm belirsizliği dikkate alınarak yapılan frekans değişimi testinde ölçülen maksimum hata farkını, $e_{kararsizlik}^2$ terimi, ölçüm belirsizliği dikkate alınarak yapılan kararsızlık değişim testinde ölçülen maksimum hata farkını, $e_{harmonik}^2$ terimi, ölçüm belirsizliği dikkate alınarak yapılan harmonik değişim testinde ölçülen maksimum hata farkını ve $e_{sicaklik}^2$ terimi, ölçüm belirsizliği dikkate alınarak yapılan sıcaklık değişim testinde ölçülen maksimum hata farkını göstermektedir.

Bu bağlamda, aktif elektrik sayacı, yükten dolayı akımının farklılaştığı devrelerde, bileşik (kompozit) maksimum hata (BMH) miktarının Çizelge 3.9'da belirtilen MİH değerini geçmemesi gerekir.

Çizelge 3.9. Nominal çalışma şartlarında yüzde olarak MİH değerleri (ÖAY, 2016: Ek V)

		Çalışma sıcaklıkları											
		+5 ⁰ C'den +30 ⁰ C'ye			- 10 ⁰ C'den +5 ⁰ C'ye			-25 ⁰ C'den -10 ⁰ C'ye			-40 ⁰ C'den -25 ⁰ C'ye		
		veya			veya			veya			veya		
		+30 ⁰ C'den +40 ⁰ C'ye			+40 ⁰ C'den +55 ⁰ C'ye			+55 ⁰ C'den +70 ⁰ C'ye					
Sınıf		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Dengeli yükte çalıştırılıyorsa çok fazlı sayaç veya tek fazlı sayaç;													
$I_{tr} \geq I \geq I_{min}$		3,5	2	1	5	2,5	1,3	7	3,5	1,7	9	4	2
$I_{max} \geq I \geq I_{tr}$		3,5	2	0,7	4,5	2,5	1	7	3,5	1,3	9	4	1,5
Çok fazlı sayacın tek fazlı yükte çalıştırılması durumunda,													
$I_{max} \geq I \geq I_{tr}$		4	2,5	1	5	3	1,3	7	4	1,7	9	4,5	2
Çok fazlı elektromekanik sayacın tek fazlı yükteki akım aralığı $I_{max} \geq I \geq 5 \cdot I_{tr}$ şeklinde belirlenir.													

Diğer taraftan, her bir sıcaklık değerlerinde elektrik sayacı belirtilen MİH miktarını karşılamalıdır. Ayrıca, sayaç, sistemli olarak sadece bir tarafın menfaatine göre çalışmamalı yahut MİH değerlerini kötüye kullanacak bir şekilde olmamalıdır (ÖAY, 2016: Ek V). Dolayısıyla, imalatçıların piyasaya arz aşamasında yasal olarak izin verilen hata limitlerini dikkate alarak tasarım ve üretim yapması gerekmektedir.

3.2. İstatistiksel Analiz Yöntemleri

İkinci dünya savaşından sonra, teknolojinin gelişimi ile birlikte hemen hemen her alanda veriler üzerinden stratejik bilgi ve enformasyon oluşturulmasını sağlamıştır. Bu verilerle trend analizinin gerçekleştirilmesi, müşteri tercihlerinin incelenmesi ve farklı pazarlama stratejilerinin geliştirilmesi gibi faaliyetlerin artması ise işlem kapasitesi yüksek

bilgisayarların yaygın olarak kullanımını sağlamış ve bu durum yapılan çalışmalarda etkinlik ve verimliliği yükseltmek amacıyla çok değişkenli istatistik yöntemlerinin kullanımını oldukça artmış durumdadır.

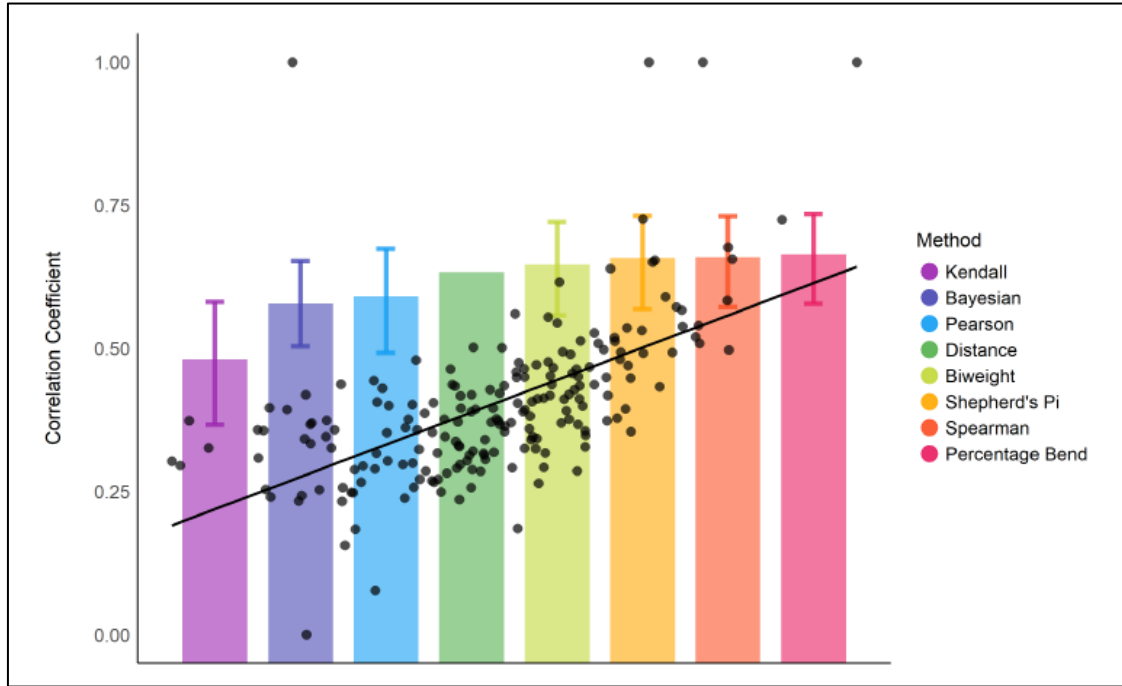
Bilindiği üzere, istatistikte, iki ve ikiden fazla bağımlı değişken içeren veriler çok değişkenli olarak tanımlanmaktadır (Grimm ve Yarnold, 2000). Bu veriler arasındaki ilişki durumu çok değişkenli istatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edilmekte olup kanonik korelasyon analizi de bu yöntemlerden bir tanesidir. Kanonik korelasyon analizi, 1935 yılında Hotelling tarafından geliştirilmiş çok değişkenli bir analiz yöntemi olup basit korelasyon analizinden farklı olarak iki değişken kümesi arasındaki ilişkiyi tanımlamak ve ölçmek için kullanılan bir tekniktir (Bayyurt, 2004). Dolayısıyla, bazı istatistiksel analiz yöntemleri bu analizin özelleştirilmiş halleri olarak düşünülebilir. Bu bağlamda, basit korelasyon analizi ve çoklu korelasyon analizi gibi farklı uygulamaları da bulunmaktadır. Tezin bu bölümünde, korelasyon ve regresyon analizinin temel özelliklerinden özet olarak bahsedilmiştir.

3.2.1. Korelasyon analizi

Korelasyon, bir grubun her bir üyesinde ölçülen iki niceliksel değişkenin ilişki derecesini değerlendirmek için kullanılan istatistiksel bir araçtır (Aggarwal ve Ranganathan, 2016). Genel bir yöntem olarak, “-1” ve “+1” aralığında farklı sonuç değerleri alan bir analiz yöntemidir. Korelasyon katsayısı “-1” ise iki değişken arasında kuvvetli negatif bir ilişkili olduğu, “0” ise doğrusal bir ilişki olmadığı ve “+1” ise kuvvetli pozitif bir ilişki yani doğrusal bir bağıllık olduğu değerlendirilmektedir (Gogtay ve Thatte, 2017). Ancak, istatistiksel bir ölçü olarak hesaplanan bu korelasyon katsayıları bir nedensellik bağlantısı çıkarımı için doğrudan kullanılması pek uygun görülmemektedir, çünkü aynı istatistiksel sonucu olan farklı dağılımlar olabilmekte ve ayrıca dış kaynaklı faktörlerin etkilerinin de dikkate alınmasında fayda olduğu değerlendirilmektedir (Asuero, Sayago ve Gonzalez, 2006). İki den fazla niceliksel değişken arasındaki ilişki veya birliktelik incelenecek ise çoklu korelasyon katsayısı gibi diğer yöntemler kullanılarak korelasyon katsayıları hesaplanabilir (Gogtay ve Thatte, 2017).

Korelasyon katsayıları hesaplandıktan sonra, bu değerlerin popülasyonun doğru değerlerine ne kadar yakınsadığının incelenmesi gerekir. Bu amaçla, elde edilen sonuçlar anlamlılık testi ile değerlendirilir. Bu çerçevede, yapılan çalışmalarda hesaplanan “p” değerinin 0,05

değerinden küçük veya büyük olup olmadığı incelenerek bir değerlendirme yapılır. Eğer, 0,05 değerinden büyük bir “p” değerine ulaşırsa, onayın uygulanması amacıyla geçen zaman ile toplam değer arasında anlamlılık açısından yeterlilik olmadığı anlaşılır. Hesaplamalarda yeteri kadar büyüklüğe sahip örneklem gerçekleştirildiyse ve ayrıca klinik bir durum oluşmadıysa, istatistiksel açıdan bu katsayıların anlamlı bir sonuç üreteceği değerlendirilmektedir. Bu amaçla, R kare olarak bilinen karar katsayısı hesaplanarak sonuç üzerindeki değişim değerinin etkisine bakılması uygun olacaktır (Gogtay ve Thatte, 2017).



Şekil 3.3. Farklı korelasyon yöntemlerinin aynı verilerle tahmin derecesi (Makowski, Ben-Shackar, Patil ve Lüdecke, 2020)

Literatür incelendiğinde, korelasyon analizi için sunulmuş birçok yöntem bulunduğu görülmektedir. Bunlardan en yaygın kullanılanları genellikle Karl Pearson ve Charles Spearman yöntemleri olarak bilinmektedir. Bu yöntemlerin etkinliğini görmek amacıyla aynı veriler kullanıldığında tahmin etkisini içeren sonuçlar Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

3.2.2. Karl Pearson yöntemi

Karl Pearson yöntemi, istatistikte kullanılan en yaygın korelasyon yöntemi olarak bilinmektedir. Bu yöntemde, hesaplanan değer genellikle “r” ile gösterilir ve standart

sapmalarının çarpımı ile normalize edilen iki değişkenin kovaryansına karşılık gelmektedir. Bu yönteme ait formülizasyon Eş. (3.5)'te sunulmaktadır.

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x,y)}{SD_x \cdot SD_y} \quad (3.5)$$

Burada; “ r_{xy} ” ifadesi Pearson korelasyon katsayısını, “ $\text{cov}(x,y)$ ” ifadesi, x ve y değişkenlerinin kovaryansını, “ SD_x ” ifadesi x değişkeninin standart sapmasını, “ SD_y ” ifadesi ise y değişkeninin standart sapmasını göstermektedir (Makowski ve diğerleri, 2020).

Belirlenen hipotezin doğruluğunu gösterebilecek en uygun inceleme yönteminin seçilmesi ve örneklem sayısının tespit edilmesi hususları çalışma sonucunda hatasız bir raporlama yapılabilmesi açısından çalışmalarda karşılaşılan en önemli sorunları oluşturmaktadır. Bu sorunların ortadan kaldırılabilmesi için yeterli seviyede tecrübe ve bilgiye sahip olmak gerekmektedir. Bu amaçla, istatistikte birçok farklı analiz yöntemi bulunmakta olup örneklem alma sayıları ise farklılık göstermektedir (Akbulut ve Çapık, 2022).

3.2.3. Charles Spearman rank yöntemi

Charles Spearman rank yöntemi, sıra korelasyonu parametrik olmayan bir korelasyon analizi yöntemidir. Bu yöntemde hesaplanan değer genellikle “ ρ ” ile gösterilmektedir. Pearson korelasyonu doğrusal ilişkileri değerlendirirken, Spearman korelasyonu doğrusal olsun veya olmasın monotonik ilişkileri değerlendirmektedir (Makowski ve diğerleri, 2020). Bu yönteme ait formülizasyon Eş. (3.6)'da sunulmaktadır.

$$r_{s_{xy}} = \frac{\text{cov}(\text{rank}_x, \text{rank}_y)}{SD(\text{rank}_x) \cdot SD(\text{rank}_y)} \quad (3.6)$$

Burada; “ $r_{s_{xy}}$ ” ifadesi Spearman korelasyon katsayısını, “ $\text{cov}(\text{rank}_x, \text{rank}_y)$ ” ifadesi x ve y değişkenlerinin rankının kovaryansını, “ $SD(\text{rank}_x)$ ” ifadesi x değişkeninin rankının standart sapmasını, “ $SD(\text{rank}_y)$ ” ifadesi ise y değişkeninin rankının standart sapmasını göstermektedir (Bishara ve Hittner, 2017).

Genellikle, Spearman yöntemi doğrusal olsun ya da olmasın değişkenler arasındaki monotonik ilişkileri araştırır. Spearman katsayısı, iki değişken arasındaki doğrudan bir ölçüt değildir ve genellikle, sıralı değişkenler de dahil olmak üzere hem kalıcı hem de ayrık faktörler için kullanımı uygundur (Thirumalai, Chandhini ve Vaishnavi, 2017).

3.2.4. Regresyon analizi

Regresyon analizi, istatistiki olarak bir veya birden fazla bağımsız değişken ile bir bağımlı değişken arasındaki bağlantının durumunu ve gücünü gösteren bir kavramdır (Uyanık ve Güler, 2013). Legendre tarafından 1805 yılında başarılı öğrenme metodu olarak doğrusal regresyon yönteminin olduğu belirlenmiştir. Bu yöntem, değişkenler arasındaki ilişki durumunu belirlemek üzere en küçük kareler yöntemi esasına göre kurgulanmış olup değişken sayısına göre tek değişkenli veya çok değişkenli regresyon olarak isimlendirmeleri mevcuttur (Gülağız ve Ekinci, 2017). Regresyon analizinde amaç, en az hata ile karar almak olup kıyas ve kestirim yapmak için tercih edilmektedir. Regresyon analizinin doğrusal olmayan, doğrusal ve çoklu gibi değişik türleri vardır (Yiğit, 2011). Bunlar ayrıca doğrusal, çoklu doğrusal, basit doğrusal, Lasso, Ridge, polinom ve lojistik regresyon gibi farklı alt türlere ayrılmaktadır (Dizmenler, 2023).

Bu bağlamda, regresyon analizi değişken sayısına göre tek değişkenli veya çok değişkenli olarak isimlendirilir. Basit regresyon modeli $Y = \alpha + \beta X + \varepsilon$ şeklinde gösterilir ve birer adet bağımsız ve bağımlı değişkenden oluşur. Bu modelde “x” ifadesi bağımsız değişkeni, “y” ifadesi bağımlı değişkeni yani sonucu gösterir. Genellikle, bağımlı değişkenin sabit bir hatası olduğu, bağımsız değişkenin ise hatası olmadığı kabul edilir. “ ε ”; ortalama değeri 0 olan tesadüfi hata terimidir ve “ σ^2 ” varyansına sahip normal dağılım ifade ettiği kabul edilir. “ β ” ifadesi regresyon katsayısıdır. Bu ifade, bağımsız değişkenin birimiyle 1 birimlik farklılığa tekabül eden bağımlı değişken üzerindeki farklılaşma değerini gösterir. “ α ” ifadesi ise sabit bir değer olup bağımsız değişkenin sıfır olduğu durumda sonucun aldığı değerdir (Gültekin, 2013).

Öte yandan, en küçük kareler yöntemi çok değişkenli regresyon analizi için de kullanılır (Gujarati, 2008). Bu yöntemde, taslak olarak modellenen regresyonun anlamlılığı doğrulamak için varyans analizi, katsayıların doğruluğunu belirlemek içinse “t” testi tercih edilir. Fakat bu yöntemin, belirlenen değişkenler arasındaki ilişki için uydurulmuş en iyi

model olduğu söylenemez. Zira, modelden daha ziyade katsayılar ve regresyon daha önemlidir. Değişkenler açısından bir sorun bulunmuyorsa genellikle R^2 değeri dikkate alınabilecek seviyede önemli bir ölçme parametresidir (Şahinler, 2000). Buna rağmen, R^2 değeri büyük modellerin tahmin çalışmalarında kullanılan en başarılı modeller olduğu söylenemez (Montgomery ve Peck, 1992).

Diğer taraftan, regresyon analizinde dikkate alınması önem arz eden değişkenlerin genellikle yöntemdeki değişkenler ile benzer doğrultuda ve büyüklükte farklılaştığı bilinmektedir. Böyle bir durum, model üzerinde değişen varyans sorunu oluşturabilmektedir (Albayrak, 2008). Bu sorun, regresyon analizi çalışmasının neticesini olumsuz olarak etkilemektedir. Değişen varyans oluşması halinde, en küçük kareler yönteminin tahminleri tutarlılık ve yansızlık açısından etkilenmezken etkinlik ve en az varyans değeri açısından olumsuz etkilenebilmektedir. Dolayısıyla, söz konusu durum istatistik testlerde güvenilirlik açısından sorun oluşturmaktadır. Diğer bir ifadeyle, en küçük kareler yöntemi kullanan araştırmacıların kısmi “t” ve genel F testleri tahminleri güvenilirlik özelliklerini yitirmektedir (Yamak ve Köseoğlu, 2006). Bu sebeple, söz konusu hususlar dikkate alınarak yapılacak çalışmaların anlamlılık düzeyleri irdelenmeli ve verilere göre uygun yöntemler belirlenmelidir.

Korelasyon analizi ve regresyon analizinin kullanılış amaçlarına bakıldığında temel anlamda belirgin farkların olduğu görülecektir. Korelasyon analizi, iki değişken arasındaki ilişkileri veya ilişkileri tanımlamaya yardımcı olurken, regresyon tekniği veya regresyon analizi, gerçek dünya ortamında ne olacağını tahmin edebilmek amacıyla bu ilişkiyi "modellemek" için kullanılmaktadır. Çünkü, korelasyon analizinde üretilen katsayılar, herhangi bir değişkenin öteki değişkene yönelik tepki verip vermediğine ilişkin bilgi oluşturmaz. Değişkenlerden birini “bağımlı”, ötekini ise “bağımsız” olarak nitelendirmeye ilişkin herhangi bir girişim bulunmamaktadır (Gogtay ve Thatte, 2017).

Öte yandan, regresyon analizi çalışmalarında dikkat edilecek bazı hususlar bulunmaktadır. Öncelikle, bağımlı değişken kesikli veya sürekli sayısal veri tipinde olmalıdır. Diğer bir ifadeyle, bu değişken kategorik tipte tanımlanmamalıdır. Bağımsız değişkenler ise bu tipte tanımlanabilir. Burada, seçilecek modelin performans başarısını yükseltmek amacıyla en az sayıda bağımsız değişkenin belirlenmesi için farklı yöntemlerin kullanılması önemli bir husustur. Bu doğrultuda, ileriye doğru seçim, geriye doğru çıkarma ve adım adım regresyon

yöntemler kullanılabilir. İdeal olarak, gözlem sayısının bağımsız değişken sayısının yirmi katı kadar olması tavsiye edilmektedir. Ancak, çalışmalarda, en azından beş katı kadar gözlem sayısının belirlenmesinin uygun olacağı düşünülmektedir (Kılıç, 2013).

İkinci olarak, bağımsız değişkenler arasında “çoklu bağıntı” oluşmamalıdır. Çoklu bağıntı, bu değişkenler arasında bir ilişki olabileceğini işaret etmektedir (Tacq, 1997). Böyle bir durumda, söz konusu değişkenler arasından birisinin, çalışmaya ilave bir katkı sunmadığı anlaşılır. Bu hususun varlığı, bahse konu bağımsız değişkenler için belirlenen korelasyon katsayılarının mutlak değer sonucunun 0,80 değerinden fazla olarak hesaplanmasıyla tespit edilebilir. Bir diğer yöntem ise VIF sonucunun incelenmesi suretiyle yapılabilir (Alpar, 2001).

Bir başka durum ise, regresyon analizi çalışmalarında aykırı veri olup olmadığının araştırılması hususudur. Bu durum, normallik ve doğrusallık varsayımlarının kontrollerini zorlaştırmaktadır. Bunun için Mahalanobis uzaklık değerlerine bakılabilir veya atık değere sahip veriler açısından grafikler analiz edilebilir (Büyüköztürk, 2004).

3.2.5. Performans başarısının hesaplanması

İstatistiksel analiz çalışmalarında genel olarak elde edilen anlamlılık sonuçlarına ait performansın yüksek, hata oranının ve dolayısıyla standart sapmanın ve varyansın ise minimum olması beklenir. Bu amaçla, istatistiksel olarak veriler kullanılarak yapılacak çalışmaların sonucunun performans başarısını hesaplamak amacıyla geliştirilmiş R Kare, MAPE, RMSE ve MSE gibi bazı yöntemler bulunmaktadır. Tezin bu bölümde söz konusu yöntemlere kısaca değinilmiştir.

3.2.6. R kare

R Kare yöntemi, regresyon analizlerinde elde edilen sonuçların başarımlı derecesini belirlemek amacıyla kullanılan temel ölçütlerden birisidir. İki rastgele değişken arasında doğrusal ilişkiyi analiz etmektedir (Zou, Tuncali ve Silverman, 2003).

Analize dahil edilen bağımsız değişkenlere göre bağımlı değişkenin oranı korelasyon katsayısını (R) vermektedir. Korelasyon katsayısı 0 ve 1 arasında değişen bir değer olup

değişkenler arasındaki ilişki analiz edildiğinde “r” değeri “+1” olduğunda artan, “r” değeri “-1” olduğunda ise azalan bir ilişki vardır (Akgül, 2023).

Diğer taraftan, “ R^2 ” ifadesi belirlilik katsayısı olarak da ifade edilir ve korelasyon katsayısının karesidir. Genel olarak, regresyon analizinde çok fazla bağımsız değişken olması, geliştirilen modelin eğitim verilerinde uyumluluk gösterdiğini belirtir. Fakat, bu durum testin başarılı olacağı anlamına gelmemektedir. Esasen, kullanılan verinin sayısının fazla olması R kare yönteminin güvenilirliğini artırmaktadır. “1” değerine eşit olması başarımlı ölçütünün verilerle kusursuz eşleştiğini ve “1”e yaklaşması ise bağımlı değişkenlerin bağımsız değişkenlerle açıklanabilir olduğunu göstermektedir. Bu yöntemde kullanılan R^2 aşağıdaki formül ile hesaplanır. Bu formülde; y_i gerçek değeri, x_i tahmin edilen değeri, \bar{y} ise ortalama gerçek değeri ifade etmektedir (Chicco, Warrens ve Jurman, 2021).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^m (\bar{y} - y_i)^2} \quad (3.7)$$

3.2.7. Ortalama mutlak hata

Ortalama mutlak hata literatürde kısaca MAE olarak da bilinmekte olup hedef ve değer değişkenleri arasındaki mutlak farkın hesaplanmasıyla bulunur. Denklemde x ve y yöntemde kullanılan tahmin edilecek ve ölçülen değerler olarak belirlenmiş farklı değişkenlerdir. Bu yöntemde kullanılan MAE aşağıdaki formül ile hesaplanır. Bu formülde; y_i gerçek değeri, x_i tahmin edilen değeri; bu iki değer arasındaki mutlak farkı ise hata sonucunu göstermektedir (Akgül, 2023).

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{n} \quad (3.8)$$

3.2.8. Ortalama kare hatası

Performans ölçüt yöntemleri arasında sık kullanılan bir yöntem olup literatürde MSE (mean squared error) olarak da kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan MSE aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.9)$$

Bu eşitlikte; y_i gerçek değeri, \hat{y}_i tahmin edilen değeri ifade etmektedir. Hesaplanan MSE değerinin küçük çıkması tahmin işleminin gerçek değerlere yakın olduğunu; değer in yüksek çıkması ise gerçeklikten uzaklaştığını göstermektedir. Ayrıca, Kök Ortalama Karekök Hatası (RMSE), ortalama kare hatası değerinin karekökünün alınmasıyla hesaplanmaktadır. Genellikle, sonuçları yorumlamayı kolaylaştırmak için RMSE hesaplanmaktadır (Akgül, 2023).

RMSE değeri, gerçek değerlerin ortalamasının mutlak değerine bölündükten sonra 100 ile çarpılarak varyasyon katsayısı (cov) hesaplanır (Can ve Şahin, 2021). Gerçek değer ile tahmin değeri arasında yüksek seviyede doğrusal bir bağıntının varlığı, yüksek değere sahip R^2 ve düşük değere sahip RMSE ve “cov” ölçümleriyle kendini göstermektedir (Mohammadi ve diğerleri, 2015; Köksal, 2011).

3.2.9. Ortalama mutlak yüzde hatası

Performans ölçüt yöntemleri arasında sık kullanılan yöntemlerden birisi de ortalama mutlak yüzde hata ölçütüdür. Bu yöntem, literatürde MAPE (mean absolute percentage error) olarak da kullanılmaktadır. MAPE'yi bir adım öteye taşıyan en önemli özelliklerden biri, ağ tasarımcısı dışında veri setinin özellikleri hakkında ön bilgisi olmayan herkesin bu sonucu ilk bakışta rasyonel olarak yorumlayabilmesidir (Makridakis, 1993).

Bu yöntemde kullanılan MAPE değeri Eş. (3.10)'daki formül ile hesaplanır:

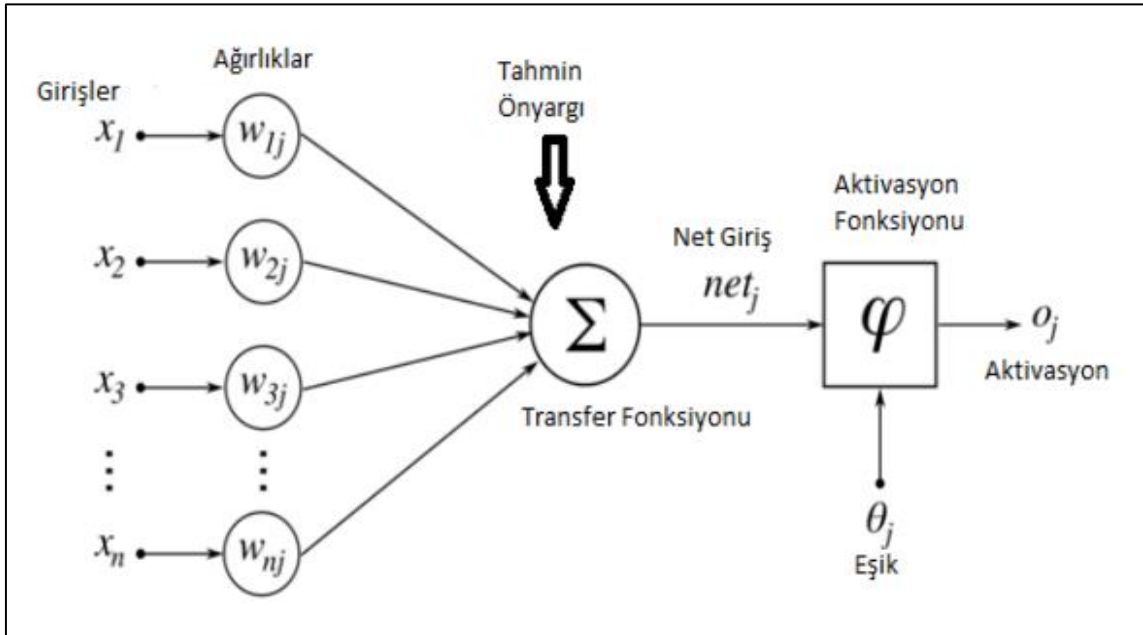
$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t} \quad (3.10)$$

Bu eşitlikte; A_t gerçek değeri, F_t tahmin değerini, n ise veri sayısını göstermektedir (Görür, 2022).

3.3. Yapay Sinir Ağı

Yapay sinir ağı (YSA), canlı varlıkların sinir sisteminde önemli rol oynayan sinir hücrelerinin yapısından ve çalışma mantığından esinlenerek oluşturulmuş bir modeldir (Graupe, 1997). Bir başka çalışmada ise daha karışık sorunların üstesinden gelebilmek amacıyla sinir hücresine benzetilerek modellenmiş bir yapı olarak tanımlandığı görülmektedir. (Liptak, 1995).

YSA, insan beyninin çalışma mantığıyla öğrenme işlemini yapan yazılımsal sistemler olup öğrenme işlemlerini benzer durumdaki emsallerinin sonuçlarını kullanarak yaparlar. Bu ağlar, yapay sinir hücrelerinden meydana gelen ağlarla birbirlerine bağlıdır. Her bağlantının bir ağırlık değeri mevcuttur ve ağa dağılmış bir şekilde saklanan bilgi bu veride kaydedilmektedir (Öztemel, 2020).



Şekil 3.4. Yapay sinir ağı örnek modeli (Öztürk ve Şahin, 2018)

Yapay sinir ağlarının tarihi gelişimine bakıldığında, bu çalışmaların özellikle 1969 yılı sonrasında XOR probleminin çözümünün bulunmasına müteakip hızlandığı görülmektedir. Günümüzde, yapay sinir ağlarının ulaşımdan sağlığa, ilaç sanayisinden borsaya kadar geniş bir alanda kullanıldığı bilinmektedir. Örnek bir YSA yapısı Şekil 3.4'te gösterilmektedir.

Öğrenme yönteminin olumlu özellikleri sebebiyle YSA modeli hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. YSA, gerek doğrusal olmayan gerekse de karışık sorunların üstesinden gelebilecek şekilde çözümler sunabilmektedir. Öte yandan, deneyimleri doğrultusunda önceden karşılaşılmamış durumlar için ilişkiler kurmak suretiyle anlamlı ve başarılı sonuçlar oluşturabilmektedir. Bu açıdan çalışmalar incelendiğinde farklı amaçlara yönelik birçok farklı YSA modellerinin kullanıldığı görülmektedir. Temel anlamda benzer özelliklere sahip olsa da çalışma prosedürü ve yapı açısından değişik kriterler taşıdıkları bilinmektedir (Ayvaz, 2012).

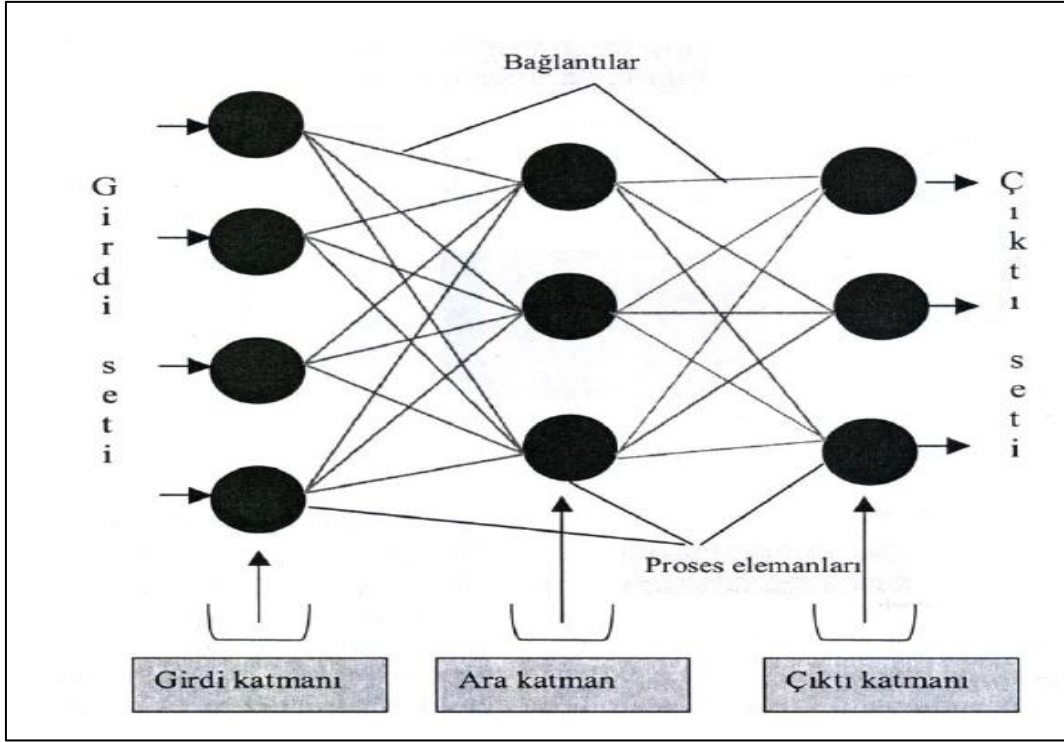
3.3.1. Yapısı ve özellikleri

Yapay sinir ağı, derin öğrenme temelinde olan yapay zekâ modellerinden birisidir. Diğer bir ifadeyle, matematiksel olarak sinir hücresinin işlem yapma özelliği esas alınarak hazırlanmış bir model olduğu söylenebilir. Bu modelde, zorlu problemler için çözüm üretmek amacıyla derin ve kuvvetli düşünme kriterleri esas alınarak kabiliyetlerin oluşturulması amaçlanmıştır (Kaftan, 2010).

Yapay sinir ağı modeli, giriş, çıkış ve gizli tabakadan oluşan bütünleşik bir yapıdır. YSA modelinde, çıkışa katmanına iletilecek veriler girdi katmanında belirli kriterler kapsamında işlenmektedir (Can ve Şahin, 2021). Katmanları daha iyi kavrayabilmek amacıyla detaylı bir YSA yapısı Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

YSA modelinde gizli katman genellikle ağın yapısına göre farklılık oluşturmaktadır. Bu katman, modelin sonucuna etki edecek temel fonksiyonel işlemlerinin gerçekleştirildiği esas tabakadır. Gizli katmandan gelen bilgiler çıkış katmanına ulaştıktan sonra işlenir ve sonrasında güncel verilerle yeniden derlenmesi amacıyla tekrar giriş katmanına gönderilir. Genellikle, kullanılan veri kadar çıkış tabakasında nöron yer almaktadır. Çıkış değerleri, YSA modelinin duruma yönelik olarak oluşturduğu veriler olup çıkış tabakasında bulunmaktadır (Şahan ve Okur, 2016).

YSA yapısında her katmanda o katmana ait bağımsız nöronlar bulunur ve bu nöronların tümü bir sonraki katmandaki tüm nöronlara bağlıdır. Nöronlar arasındaki bağlantılar, sinaptik ağırlıklar olarak adlandırılan farklı ağırlık değerleriyle sağlanır (Hagan, Demuth ve Beale, 2014; Heaton, 2015).



Şekil 3.5.Yapay sinir ağı katmanları (Öztemel, 2020)

Bir YSA hücresi; toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu, ağırlıklar, girişler ve çıktıdan olmak üzere beş adet alt düzeydeki temel yapının birleşiminden oluşmaktadır (Aslay ve Özen, 2013).

Kullanılacak modelde tercih edilecek fonksiyonlar genellikle deneme yanılma yöntemi ile belirlenmekte olup çalışmalar üzerinde yapılan incelemelerde en sık tercih edilen fonksiyonun sigmoid fonksiyonu olduğu görülmektedir. Tez çalışmasında Eş. (3.11) ile gösterilmiştir (Öztemel, 2020).

$$F(\text{NET}) = \frac{1}{1+e^{-\text{NET}}} \quad (3.11)$$

Bu formülde kullanılan “NET” ifadesi işlem yapan birime ulaşan NET girdi miktarını ifade etmektedir. Söz konusu fonksiyon, kendinden önce yer alan tabaka tarafından iletilen bilgileri birleştirerek kendi sonucunu oluşturur ve bu sonucu sıfır ve bir arasında olacak şekilde düzenleyerek sonraki kısımlara iletir (Hagan ve diğerleri, 2014). Çalışmalarda sıkça kullanılan diğer aktivasyon fonksiyonları Çizelge 3.10’da gösterilmektedir.

Çizelge 3.10. Aktivasyon fonksiyonu örnekleri (Öztemel, 2020)

Aktivasyon Fonksiyonu	Açıklama
Lineer fonksiyon $F(NET) = NET$	Gelen veriler aynı biçimde çıktı olarak değerlendirilir.
Step fonksiyonu $F(NET) = \begin{cases} 1, & \text{if } NET > eşik_değer \\ 0, & \text{if } NET \leq eşik_değer \end{cases}$	Eşik değere göre çıktı sıfır yahut bir değerine atanır.
Sinüs fonksiyonu $F(NET) = Sin(NET)$	Öğrenilmesi değerlendirilen durumların sinüs fonksiyonuna uygun dağılım gösterdiği durumlarda kullanılır.
Eşik değer fonksiyonu $F(NET) = \begin{cases} 0, & \text{if } NET \leq 0 \\ NET, & \text{if } 0 < NET < 1 \\ 1, & \text{if } NET \geq 1 \end{cases}$	Gelen verilerin sıfır yahut birden azlığına veya çokluğuna göre değer alır.
Hiperbolik tanjant fonksiyonu $F(NET) = \frac{(e^{NET} + e^{-NET})}{e^{NET} - e^{-NET}}$	Gelen NET girdi verisi tanjant fonksiyonu kullanılarak hesaplanır.

Diğer taraftan, literatürde yapay sinir ağları radyal tabanlı, tek veya çok katmanlı sinir ağları olarak kategorize edilebilmektedir. Ayrıca, yapay sinir ağlarında hızlı yayılım algoritması (Quick propagation-QP), esnek yayılım algoritması (Resilient Propagation-RP) ve geri yayılım algoritması (Back Propagation-BP) gibi öğrenme algoritma tipleri mevcuttur (Yavuz ve Polat, 2020).

3.3.2. Geri yayılım algoritması

Geri yayılım algoritması, yapılan çalışmalarda en sık ve yaygın bir biçimde tercih edilen bir öğrenme algoritmasıdır. Çünkü, matematiksel açıdan rahatlıkla kanıtlanabilmekte ve kolay bir şekilde anlaşılabilen olup çıkış katmanından giriş katmanına doğru geri olarak ilerlendiği için bu isimle tanımlanmıştır (Rumelhart ve McClelland, 1986).

3.3.3. Esnek yayılım algoritması

Esnek yayılım algoritması, Riedmiller ve Barun isimli araştırmacılar tarafından 1993 yılında bulunmuştur. Bu algorithmada, ara tabakalarda genellikle sigmoid transfer fonksiyonları tercih edilmektedir. Bu fonksiyon, sıkıştırıcı fonksiyon olarak da bilinmektedir. Çünkü, sınırsız bir genişliğe sahip girdi verileri sınırlı bir kısımda sıkışıp kalmıştır. Burada temel hedef, kısmi türev sonucunun negatif etkilerini öğrenme aşamalarından uzak tutmaktır (Sesveren, 2008).

3.3.4. Hızlı yayılım algoritması

Fahlman tarafından belirlenen bu algoritma Newton yöntemini esas almakta olup çok tabakalı işlemlerin eğitilmesi amacıyla tercih edilmektedir (Falhmann, 1989). Eğitilmiş tahmine ve tecrübeye odaklı kuralları bulunmaktadır. Bu yöntemde, en uygun çözümden ziyade başarılı kabul edilebilecek seviyedeki diğer yaklaşık çözümler belirlenmektedir (Sesveren, 2008). Bu algoritmanın başarılı sonuçları diğer testlere kıyasla daha iyi durumdadır. Gürültü değeri düşük olan verilere ait durumlar için daha başarılı sonuçlar ürettiği bilinmektedir (Neuralware Handbook, 1996).

3.3.5. Sınıflandırılması

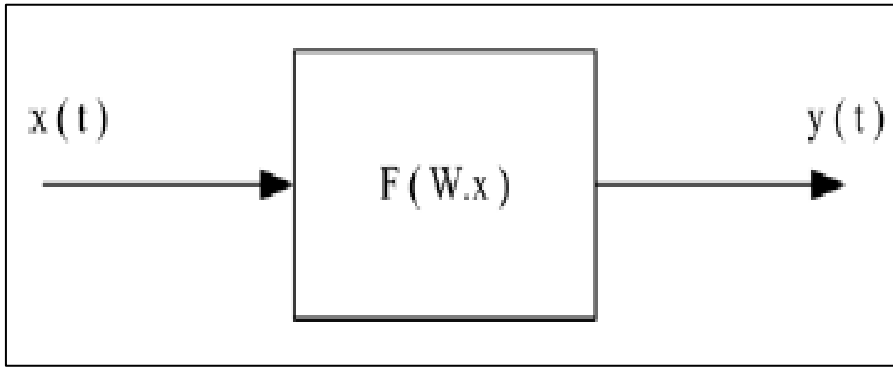
Öğrenme algoritmaları ile yapılarına göre YSA Çizelge 3.11'deki kategorize edilebilir.

Çizelge 3.11. YSA sınıflandırması (Öztemel, 2020)

Mimari Yapılarına göre	Öğrenme Yaklaşımlarına göre
Geri Beslemeli	Danışmanlı Öğrenme
İleri Beslemeli	Destekleyici Öğrenme
	Danışmansız Öğrenme

3.3.6. İleri beslemeli yapay sinir ağı

İleri beslemeli ağda genellikle proses birimleri tabakalara bölünmüş bir durumdadır. Bilgiler tek bir doğrultuda giriş tabakasından çıkış tabakasına doğru gönderilir. İşlemi gerçekleştiren birim bulunduğu tabakada bağlantı kurmaksızın diğer tabakalarla ilişki içerisinde yer alır. Linear Vector Quantization (LVQ) ve Multi Layer Perceptron (MLP) ağları bu kategoride yer alan ağlardır. En sık kullanılanı MLP ağıdır (Göktepe, Açar ve Lav, 2005). İleri beslemeli bir YSA örneği Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

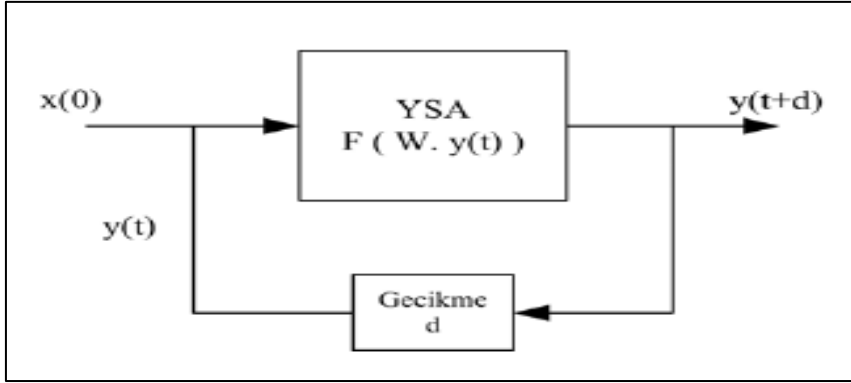


Şekil 3.6.İleri beslemeli YSA blok diyagramı (Sesveren, 2008)

Bu tip bir YSA modelinde hücreler tabakalar halinde tasarlanmış olup ağırlık verileri kullanılmak suretiyle tabakalar arasında iletişim gerçekleştirilir. Bu yapıda, giriş verileri doğrudan ara tabakaya gönderilir ve söz konusu bilgiler ara ve çıkış tabakalarında kullanılarak işlemler gerçekleştirilir (Ayvaz, 2012).

3.3.7. Geri beslemeli yapay sinir ağı

YSA modeline dinamik bir özellik kazandırılarak daha karmaşık problemleri çözebilmesi için bir hücrenin ürettiği çıkış bilgisinin bir başka hücreye yahut kendisine tekrar iletilerek işlemlerin etkinliğinin artırılması amaçlanmaktadır (Dizmenler, 2023). Dinamik hafızaya sahip olan bu modelde, ileri ve geri olarak giriş verilerinin aktarımı sağlanır. Böylelikle, bir noktadaki çıkış değeri hem o andaki hem de bir önceki giriş değerlerinin etkilerini gösterebilecek özelliğe sahip olur (Göktepe ve diğerleri, 2005). Geri beslemeli bir YSA örneği Şekil 3.7'de gösterilmektedir.

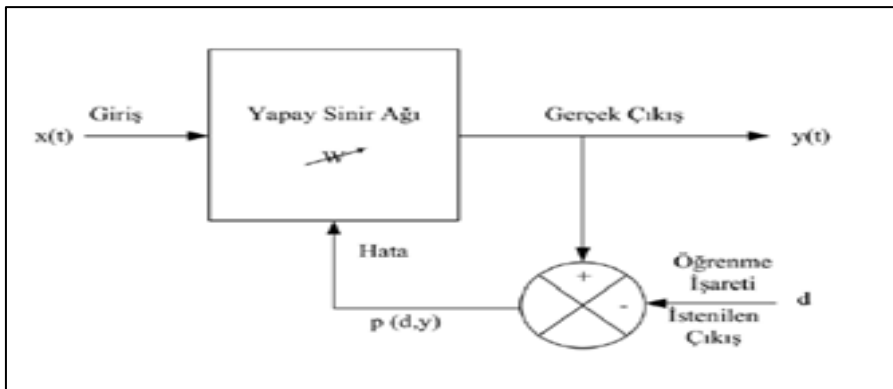


Şekil 3.7. Geri beslemeli YSA blok diyagramı (Sesveren, 2008)

Geri beslemeli YSA modeli tercih edilen araştırma sonuçlarına göre, bu modelin özellikle farklı tipteki zaman serilerinin belirlenmesinde anlamlı sonuçlar ürettiği anlaşılmıştır. Elman ve Jordan ağları, SOM (Self Organizing Map) ve Hopfield isimli ağlar bu model sınıfında değerlendirilmektedir (Sesveren, 2008).

Genel olarak, yapay sinir ağları destekleyici, danışmanlı ve danışmansız öğrenme olarak üç farklı alt başlıkta incelenmektedir. Danışmanlı öğrenme modelinde, kurgulanan ağa eldeki veri kümesinde yer alan doğru olduğu bilinen örnek bir çıkış verisi sunulur. Bu modelde, hedef çıktılar ile ağ tarafından oluşturulan çıktılar karşılaştırılır.

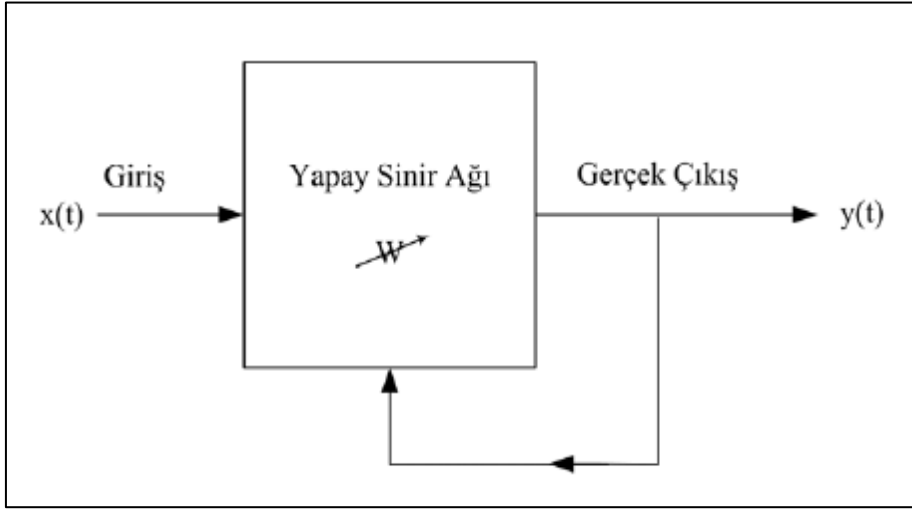
Bu karşılaştırma işlemi sonucunda ortaya çıkan fark değeri hata olarak kabul edilir. Temel amaç, bu hata değerini minimum seviyeye kadar azaltmaktır. Bu amaca ulaşabilmek için ağdaki bağlantıların ağırlıkları optimum çıkışı üretecek minvalde kesintisiz olarak farklılaştırılır (Ayvaz, 2012). Bu öğrenme yöntemine ilişkin yapı Şekil 3.8'de sunulmaktadır.



Şekil 3.8. Danışmanlı öğrenme yapısı (Sesveren, 2008)

Danışmansız öğrenme yapısında, model kendi kurallarını kendisi oluşturmaktadır. Bu amaçla, ağın girişine sunulan veriler kullanılarak üretilen çıkış verileri dikkate alınmak suretiyle kurallar belirlenir.

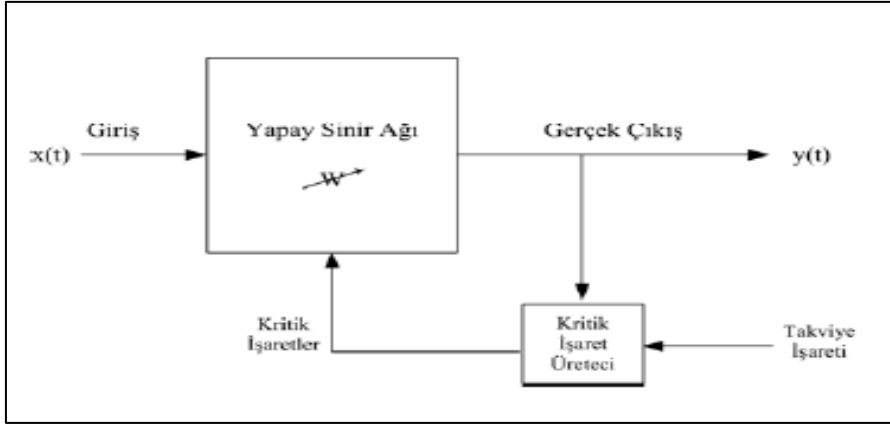
Bu algoritmada giriş verileri YSA modeline verilerek sonuç üretildiği için ulaşılması beklenen çıkış verisini bilinmesine ihtiyaç bulunmamaktadır (Sesveren, 2008). Bu bakımdan, Kohonen tarafından hazırlanan SOM modeli ile Grossberg tarafından geliştirilen Adaptif Rezonans Teori (ART) modelleri bu kategoride yer almaktadır (Ayvaz, 2012). Bu öğrenme yöntemine ilişkin yapı Şekil 3.9’da sunulmaktadır.



Şekil 3.9. Danışmansız öğrenme yapısı (Sesveren, 2008)

Bir diğer öğrenme yapısı ise destekleyici öğrenme yapısıdır. Bu yapı, denetimsiz öğrenme algoritması esasına dayanmakta olup optimizasyon sorunlarını giderebilmek amacıyla tercih edilmektedir.

Denetimsiz öğrenme algoritmasında istenen çıkış değerinin önceden bilinmesine ihtiyaç bulunmamaktadır. Bu modelde ağa çıkış verisi sunulmamaktadır. Üretilen çıktı verisinin giriş verisine kıyasla iyilik seviyesi belirlenir ve temel ölçüt olarak işlemlerde kullanılır. Genetik algoritmalar ile birlikte Hinton ve Sejnowski'nin geliştirdiği Boltzmann kuralı bu modele örnek oluşturmaktadır (Sesveren, 2008). Bu öğrenme yöntemine ilişkin yapı Şekil 3.10’da sunulmaktadır.



Şekil 3.10. Destekleyici öğrenme yapısı (Sesveren, 2008)

Diğer taraftan; uygulama açısından YSA modeli çevrimiçi ve çevrim dışı olarak iki başlık altında toplanabilir. Çalışmada ele alınan soruna yönelik olarak en uygun yöntem seçilmek suretiyle yapay sinir ağı modelinin geliştirilmesi uygun olacaktır (Görür, 2022).

3.3.8. Eğitilmesi, test edilmesi ve problem çözümü

Katmanlar halinde birbirine bağlı olarak tasarlanan yapay sinir hücreleri için tıpkı bir insan beyninin çalışma mantığına benzer şekilde tepki, öğrenme ve karar verme kabiliyetlerinin kazandırılması amaçlanmaktadır (Dizmenler, 2023). Dışarıdan sağlanan bir olgu ile kontrol edilen denetimli eğitimde, olay için hazırlanmış girdi ve çıktı verileri modele sunulur. Diğer bir ifadeyle, her bir örnek durum için giriş ve çıkış verileri ağa gösterilmektedir. (Görür, 2022).

YSA, dış ortamdan aldığı bilgileri birleştirerek aktivasyon fonksiyonuna iletir. Bu fonksiyon, kendisine iletilen bilgiler çerçevesinde bir tepki oluşturur ve çıktı değeri olarak ağa iletir. Beklenen değer ile üretilen bu değer arasındaki farklılık değeri hata olarak tanımlanır. Bu hatanın en az seviyede olması için ağırlık değerleri değiştirilerek optimum sonuca ulaşılmaya çalışır. Bu süreç, yapay sinir ağları için eğitim olarak tanımlanmaktadır (Ayvaz, 2012).

Öncelikle, bu amaçla çalışma yapılacak eğitim kümesinin veri sayısı yeterince büyük olacak şekilde belirlenmesi dikkat edilmesi gereken hususlardan birisidir. YSA modelinin başarı performansının etkinlik seviyesini arttırmak için belirlenecek verilerin çeşitliliği gözetilecek

şekilde birbirinden bağımsız ve farklı olarak belirlenmesi önem arz etmektedir (Sırdaş, Şen ve Sönmez, 2001).

Bu doğrultuda, genellikle, oluşturulan örneklem kümesindeki verilerin 80%'lik kısmı eğitim çalışmaları, 20%'lik kısmı ise ağın test düzeyinin belirlenmesi çalışmaları için kullanılmaktadır (Koca, 2016). Anlamlılık düzeyi yüksek olan daha kararlı ve daha iyi yakınsama değerlerine ulaşmak amacıyla ağın özellikle giriş verilerinin normalleştirilmesinde fayda bulunmaktadır. Bu işlemde, her bir fiziksel değer x_i , sırasıyla minimum ve maksimum değerler olan x_{imin} ve x_{imax} kullanılarak birleşik değerlere yol açan normalleştirilmiş değerlere çevrilir. Bu çerçevede düzenlenen Eş. (3.12)'de minimum ve maksimum normalizasyon formülü gösterilmektedir (Yavuz ve Polat, 2020).

$$x_{norm} = 0,1 + 0,8 \cdot \left(\frac{x_i - x_{imin}}{x_{imax} - x_{imin}} \right) \quad (3.12)$$

LOGSIG fonksiyonu için normalizasyon formülü Eş. (3.13)'te TANSIG fonksiyonu için normalizasyon formülü ise Eş. (3.14)'te gösterilmektedir (Şahin, Bilgili ve Vardar, 2020).

$$x_{norm} = \left(\frac{x_i - x_{imin}}{x_{imax} - x_{imin}} \right) \quad (3.13)$$

$$x_{norm} = 2 * \left(\frac{x_i - x_{imin}}{x_{imax} - x_{imin}} \right) - 1 \quad (3.14)$$

Diğer taraftan, herhangi bir optimizasyon yaklaşımı kullanmayan ağ mimarilerinde gizli nöronların sayısını belirlemek için birçok yöntem önerilmiştir. Bunlardan bazıları, giriş ve çıkış katmanlarının boyutları arasındaki nöron sayısını kullanmak, giriş nöronunun 2/3'üne çıkış nöronunun büyüklüğü kadar sayıda nöron eklemek ve nöron sayısını giriş sayısının iki katından az kullanmak şeklindedir (Heaton, 2007).

Yapay sinir ağlarının önceden belirlenmiş yöntem, parametre ve hata oranları içerisinde kalarak probleme yönelik çözüm ürettikleri için bu model ile elde edilen sonuçların her zaman en optimum çözüm olduğunu söylemek doğru olmayacaktır. Zira, farklı bir yöntem kullanılarak farklı parametrelerle daha başarılı çözümlere ulaşılabilir (Ayvaz, 2012).

Yapay sinir ağırları ile gerçekleştirilen çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için esas alınan bazı istatistiksel ölçütler bulunmaktadır. Ağlar arasındaki performans başarısının kalitesini minimum hata oranına bakarak kestirmek mümkündür. Bu amaçla, Ortalama Karekök Hatası (RMSE) yöntemi bir ölçüt olarak kullanılması tavsiye edilmektedir (Xu, Fenerci, Oiseth ve Moan, 2020). Bazı durumlarda, veri kümesindeki örneklerde normalleştirilmiş bir özellik bulunmadığında farklı çıktı kriterlerini karşılaştırmak için RMSE yerine normalleştirilmiş kök ortalama kare hatası olarak bilinen NRMSE değerinin seçilmesi daha uygun olacaktır (Iseli ve Schiffmann, 2021).

Çizelge 3.12. Performans ölçüt formülleri (Görür, 2022)

ÖLÇÜT	FORMÜL
Error (E)	$A_t - F_t$
Absolute Error (AE)	$|A_t - F_t|$
Mean Squared Error (MSE)	$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n E^2$
Root Mean Squared Error (RMSE)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n E^2}$
Sum of Squared Error (SSE)	$\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2$
Sum of Squared Total (SST)	$\sum_{t=1}^n (A_t - \bar{A})^2$
Sum of Squared Regression (SSR)	$\sum_{t=1}^n (F_t - \bar{A})^2$
R ²	$1 - \frac{SSR}{SST}$
Mean Absolute Deviation (MAD)	$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n AE_t$
Mean Absolute Percentage Error (MAPE)	$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t}$
Tracking Signals (TS)	$bias_t / MAD_t$

MAPE değeri, farklı birim değerlerine ait modelleri karşılaştırırken oluşabilecek negatif etkileri ortadan kaldırır. Bu tip modellerde performans ölçümleri arasında MAPE yönteminin kullanımı daha popüler olduğu bilinmektedir. Çünkü, bu modelde tahmin edilen hata değerleri tek başına bir anlam ifade edecek şekilde yüzde biçiminde belirtilmektedir (Görür, 2022). Bu bağlamda, başarı performanslarını ölçmek için kullanılacak istatistik formüller Çizelge 3.12’de özet bir şekilde toplu olarak gösterilmektedir.

Tezin bu bölümünde, aktif elektrik sayacının tip testlerinde yer alan temel ölçüm hatasına etki eden gerilim, akım, sıcaklık ve frekans değişim testleri, bileşik maksimum hatanın tanımı ve bu hatanın hesaplanmasına ilişkin literatürde yer alan formülleri ile etki seviyesi, korelasyon ve regresyon analizinin temel kullanım alanları ve birbirinden farklılıkları ile uygulamada dikkat edilmesi gereken hususları, istatistiksel başarı ölçütleri, yapay sinir ağlarının temel yapısı, öğrenme yöntemleri ve eğitilmesi sırasında dikkat edilecek hususları hakkında bilgilendirme yapılmıştır.

4. ANALİZ VE MODELLEME

Tezin üçüncü bölümünde de ifade edildiği üzere, elektronik elektrik sayacının doğruluğu hem EN 50470 standardı hem de OIML R46-1/-2 tavsiyesine göre gerilim, frekans, güç faktörü ve sıcaklık gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu nedenle, bir elektronik elektrik sayacının bileşik maksimum hata (BMH) miktarının ilgili faktörler dikkate alınarak değerlendirilmesi önemlidir.

Bu amaçla, ulusal tip onayı alarak piyasaya arz edilen kombi tip elektrik sayacının tip testlerine ilişkin deney raporları Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının veri tabanından temin edilmiştir (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı [STB] Ulusal Tip Onay Belgesi, 2023).

Bu çerçevede, kombi tip elektrik sayacının aktif enerji ölçümü yapan sayaç dikkate alınarak, 3 fazlı 4 kablolu, minimum akımı 0,25 A, maksimum akımı 100A, referans akımı 5 A, 3*230V/400V gerilim ve 50 Hz. frekans çalışma değerlerine sahip 3 adet B sınıfı aktif elektrik sayacının tip testlerinde yer alan gerçek veriler esas alınarak bir inceleme yapılmıştır.

Bu inceleme sonuçlarının değerlendirilmesinde, elektrik sayacının hata değişiklikleri ilgili standardın gereklerini karşılamakla birlikte, gerçek çalışma koşullarında ölçülen karakteristiklerinin genellikle anormal davranışlar sergileyebildiği hususuna da ayrıca dikkat etmekte fayda vardır (Zhang ve diğerleri, 2018). Bu nedenle; daha doğru bir değerlendirme yapabilmek için akım, gerilim, sıcaklık ve frekans değişimlerinin yanı sıra DC, tek, çift ve alt harmonik bozulma oranları, ortalama güç tüketim oranı ve kısa süreli aşırı akım oranı gibi diğer önemli faktörlerin de elektrik sayacının BMH ölçüm hatasına etkisini incelemek uygun olacaktır.

Bu sebeple, gerçek test verilerinin incelenmesine müteakip tezin bu bölümünde tüm bu değişken parametreler Excel Solver analiz programı kullanılarak korelasyon ve regresyon analizine tabi tutularak bir değerlendirme yapılmıştır. Akabinde, BMH hatasına etkisi olduğu düşünülen parametreler kullanılarak yapay sinir ağı modeli geliştirilerek hata tahmini yapılmıştır.

4.1. Gerçek Test Verileri Üzerinden İnceleme ve Değerlendirme

Gerçek test verileri üzerinden bir inceleme yapmak amacıyla 3 fazlı 4 kablolu, minimum akımı 0,25 A, maksimum akımı 100A, referans akımı 5 A, 3*230V/400V gerilim ve 50 Hz frekans çalışma değerlerine sahip 3 adet B sınıfı aktif elektrik sayacının tip testleri esas alınmıştır. İmalatçı firmaların ticari haklarını korumak ve ilgili mevzuatlarda yer alan gizliliğe ilişkin hususlara riayet etmek amacıyla her bir farklı marka ve modele ait bu üç elektrik sayacı tezde A, B ve C marka olarak tanımlanarak çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle; A, B ve C marka elektrik sayacının teknik bilgileri Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’de sırasıyla sunulmaktadır.

Çizelge 4.1. A marka elektrik sayacı temel bilgileri (STB, 2017)

Marka-Model:	A marka model	THD	0,06/0,8
Faz:	3 Fazlı	Çift harmonik	0,12/3
Sınıf:	B	Tek harmonik	0,07/3
İmin	0,25 A	Sub harmonik	0,26/3
Itr	0,5 A	Kısa süreli Aşırı Akım	0,27/1,5
Iref	5A	Güç Kaybı	1,341/2W; 14,365/10VA
İmax	100A	Kendi kendine ısınma	0,16/0,7 0,19/1,0
Gerilim	3*230/400V		
Sayaç Sabiti:	20000imp/kWh		
Referans frekans	50 Hz		

Çizelge 4.2. B marka elektrik sayacı temel bilgileri (STB, 2017)

Marka-Model:	B marka model	THD	0,07/0,8
Faz:	3 Fazlı	Çift harmonik	0,15/3
Sınıf:	B	Tek harmonik	0,14/3
İmin	0,25 A	Sub harmonik	0,10/3
Itr	0,5 A	Kısa süreli Aşırı Akım	0,14/1,5
Iref	5A	Güç Kaybı	0,96995/2W; 3,29089/10VA
İmax	100A	Kendi kendine ısınma	0,10/0,7 0,18/1,0
Gerilim	3*230/400V		
Sayaç Sabiti:	20000imp/kWh		
Referans frekans	50 Hz		

Çizelge 4.3. C marka elektrik sayacı temel bilgileri (STB, 2017)

Marka-Model:	C Marka model	THD	0,07/0,8
Faz:	3 Fazlı	Çift harmonik	0,11/3
Sınıf:	B	Tek harmonik	0,27/3
I _{min}	0,25 A	Sub harmonik	0,19/3
I _{tr}	0,5 A	Kısa süreli Aşırı Akım	0,26/1,5
I _{ref}	5A	Güç Kaybı	0,70498/2W; 3,93208/10VA
I _{max}	100A	Kendi kendine ısınma	0,44/0,7; 0,7/1,0
Gerilim	3*230/400V		
Sayaç Sabiti:	20000imp/kWh		
Referans frekans	50 Hz		

Bu sayaçların farklı akım, gerilim, sıcaklık ve güç faktörlerinde elde edilen bileşik maksimum hata (BMH) değerlerini ve belirlenen şartlarda ilgili mevzuatın müsaade ettiği maksimum izin verilebilir hata (MİH) değerleri ise sırasıyla Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da sırasıyla sunulmaktadır. Bazı test raporlarının yayımlandığı tarihin ilgili standardın güncel versiyonunun yayımlandığı tarihten önce olabileceği için bu çizelgelerde yer alan MİH değerleri, güncel standardın MİH değerlerinden farklılık gösterebilir.

Çizelge 4.4. A marka elektrik sayacına ait bileşik maksimum hata değerleri (STB, 2017)

Sıcaklık Değişimi (°C)	Akım Değeri (A)	Bileşik Maksimum Hata (BMH)			Maksimum İzin Verilen Hata (MİH)	
		PF=1	PF=0,5	PF=0,8	PF=1	PF=0,5 veya 0,8
-40	I _{min} =0,25A	0,44	0,00	0,00	4,00	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,35	0,46	0,61	4,00	4,00
	I _{ref} =5A	0,26	0,31	0,45	4,00	4,00
	I _{max} =100A	0,41	0,43	0,60	4,00	4,00
-25	I _{min} =0,25A	0,41	0,00	0,00	3,50	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,25	0,42	0,58	3,50	3,50
	I _{ref} =5A	0,28	0,25	0,43	3,50	3,50
	I _{max} =100A	0,37	0,37	0,56	3,50	3,50

Çizelge 4.4. (devam) A marka elektrik sayacına ait bileşik maksimum hata değerleri (STB, 2017)

-10	I _{min} =0,25A	0,38	0,00	0,00	2,50	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,28	0,32	0,54	2,50	2,50
	I _{ref} =5A	0,16	0,26	0,38	2,50	2,50
	I _{max} =100A	0,31	0,29	0,46	2,50	2,50
5	I _{min} =0,25A	0,35	0,00	0,00	2,00	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,27	0,31	0,47	2,00	2,00
	I _{ref} =5A	0,13	0,19	0,41	2,00	2,00
	I _{max} =100A	0,24	0,27	0,51	2,00	2,00
30	I _{min} =0,25A	0,31	0,00	0,00	2,00	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,20	0,25	0,45	2,00	2,00
	I _{ref} =5A	0,17	0,17	0,36	2,00	2,00
	I _{max} =100A	0,22	0,21	0,47	2,00	2,00
40	I _{min} =0,25A	0,34	0,00	0,00	2,50	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,25	0,33	0,46	2,50	2,50
	I _{ref} =5A	0,15	0,20	0,38	2,50	2,50
	I _{max} =100A	0,22	0,24	0,49	2,50	2,50
55	I _{min} =0,25A	0,36	0,00	0,00	3,50	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,27	0,32	0,49	3,50	3,50
	I _{ref} =5A	0,20	0,25	0,37	3,50	3,50
	I _{max} =100A	0,26	0,27	0,51	3,50	3,50
70	I _{min} =0,25A	0,43	0,00	0,00	4,00	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,34	0,40	0,49	4,00	4,00
	I _{ref} =5A	0,25	0,33	0,39	4,00	4,00
	I _{max} =100A	0,31	0,31	0,51	4,00	4,00

Çizelge 4.5. B marka elektrik sayacına ait bileşik maksimum hata değerleri (STB, 2017)

Sıcaklık Değişimi (°C)	Akım Değeri (A)	Bileşik Maksimum Hata (BMH)			Maksimum İzin Verilen Hata (MİH)	
		PF=1	PF=0,5	PF=0,8	PF=1	PF=0,5 veya 0,8
-40	I _{min} =0,25A	1,00	0,00	0,00	4,00	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,97	0,95	1,05	4,00	4,00
	I _{ref} =5A	1,17	1,11	1,30	4,00	4,00

Çizelge 4.5. (devam) B marka elektrik sayacına ait bileşik maksimum hata değerleri (STB, 2017)

-40	I _{max} =100A	1,00	1,09	1,16	4,00	4,00
-25	I _{min} =0,25A	0,95	0,00	0,00	3,50	0,00
	I _{tr} =0,5A	1,22	1,39	1,31	3,50	3,50
	I _{ref} =5A	1,31	1,33	1,35	3,50	3,50
	I _{max} =100A	1,27	1,16	1,17	3,50	3,50
-10	I _{min} =0,25A	0,37	0,00	0,00	2,50	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,28	0,67	0,64	2,50	2,50
	I _{ref} =5A	0,30	0,60	0,55	2,50	2,50
	I _{max} =100A	0,55	0,79	0,78	2,50	2,50
5	I _{min} =0,25A	0,26	0,00	0,00	2,00	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,19	0,59	0,31	2,00	2,00
	I _{ref} =5A	0,24	0,54	0,26	2,00	2,00
	I _{max} =100A	0,39	0,65	0,55	2,00	2,00
30	I _{min} =0,25A	0,33	0,00	0,00	2,00	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,24	0,58	0,27	2,00	2,00
	I _{ref} =5A	0,26	0,54	0,23	2,00	2,00
	I _{max} =100A	0,50	0,68	0,44	2,00	2,00
40	I _{min} =0,25A	0,44	0,00	0,00	2,50	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,38	0,60	0,26	2,50	2,50
	I _{ref} =5A	0,29	0,54	0,25	2,50	2,50
	I _{max} =100A	0,59	0,92	0,88	2,50	2,50
55	I _{min} =0,25A	0,87	0,00	0,00	3,50	0,00
	I _{tr} =0,5A	0,81	0,80	0,64	3,50	3,50
	I _{ref} =5A	0,43	0,74	0,56	3,50	3,50
	I _{max} =100A	0,88	1,09	0,99	3,50	3,50
70	I _{min} =0,25A	1,76	0,00	0,00	4,00	0,00
	I _{tr} =0,5A	1,64	1,53	1,56	4,00	4,00
	I _{ref} =5A	1,56	1,53	1,55	4,00	4,00
	I _{max} =100A	1,55	1,41	1,43	4,00	4,00

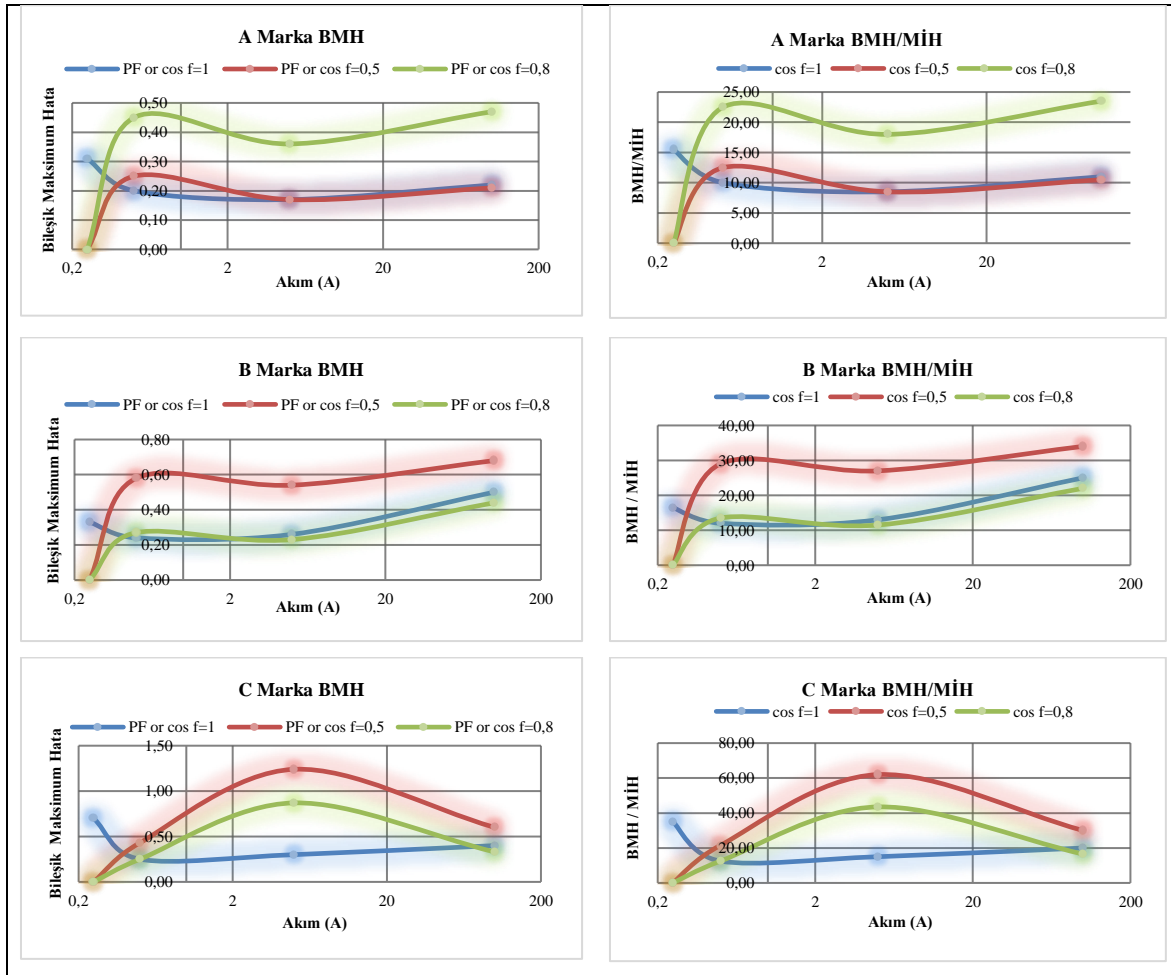
Çizelge 4.6. C marka elektrik sayacına ait bileşik maksimum hata değerleri (STB, 2017)

Sıcaklık Değişimi(°C)	Akım Değeri(A)	Bileşik Maksimum Hata (BMH)			Maksimum İzin Verilen Hata (MİH)	
		PF=1	PF=0,5	PF=0,8	PF=1	PF=05 veya 0,8
-40	Imin=0,25A	1,43	0,00	0,00	4,00	0,00
	Itr=0,5A	1,55	1,80	1,72	4,00	4,00
	Iref=5A	1,77	1,88	1,70	4,00	4,00
	Imax=100A	1,73	1,86	1,73	4,00	4,00
-25	Imin=0,25A	1,08	0,00	0,00	3,50	0,00
	Itr=0,5A	1,32	1,25	1,39	3,50	3,50
	Iref=5A	1,32	1,46	1,43	3,50	3,50
	Imax=100A	1,45	1,59	1,45	3,50	3,50
-10	Imin=0,25A	0,94	0,00	0,00	2,50	0,00
	Itr=0,5A	0,82	0,93	1,11	2,50	2,50
	Iref=5A	0,99	0,86	1,09	2,50	2,50
	Imax=100A	1,02	0,92	1,09	2,50	2,50
5	Imin=0,25A	0,73	0,00	0,00	2,00	0,00
	Itr=0,5A	0,74	1,06	0,86	2,00	2,00
	Iref=5A	0,73	1,09	0,93	2,00	2,00
	Imax=100A	0,92	1,10	0,92	2,00	2,00
30	Imin=0,25A	0,70	0,00	0,00	2,00	0,00
	Itr=0,5A	0,25	0,43	0,25	2,00	2,00
	Iref=5A	0,30	1,24	0,87	2,00	2,00
	Imax=100A	0,40	0,60	0,33	2,00	2,00
40	Imin=0,25A	1,09	0,00	0,00	2,50	0,00
	Itr=0,5A	0,58	0,90	0,52	2,50	2,50
	Iref=5A	0,60	0,69	0,52	2,50	2,50
	Imax=100A	0,53	0,47	0,45	2,50	2,50
55	Imin=0,25A	1,41	0,00	0,00	3,50	0,00
	Itr=0,5A	0,87	1,14	0,85	3,50	3,50
	Iref=5A	0,77	1,00	0,82	3,50	3,50
	Imax=100A	0,86	0,88	0,82	3,50	3,50
70	Imin=0,25A	1,86	0,00	0,00	4,00	0,00
	Itr=0,5A	1,56	1,72	1,34	4,00	4,00
	Iref=5A	1,26	1,46	1,52	4,00	4,00
	Imax=100A	1,32	1,29	1,33	4,00	4,00

Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da sunulan değerler, TS EN 50470-3:2007 standardının 8.4 maddesinde yer alan Maximum Permissible Error (MPE) (Maksimum İzin Verilebilir Hata) başlıklı deneye ait gerçek test verilerini göstermektedir.

4.1.1. Belirli bir sıcaklıktaki ölçüm hatasının incelenmesi

A, B ve C marka elektrik sayacının gerçek bileşik maksimum hata (BMH) değerleri 30°C sıcaklık değerinde, sırasıyla 1.0, 0.5 ve 0.8 güç faktörü için minimum akımdan maksimum akıma kadar değerlerde ve ayrıca bu hata değerinin maksimum izin verilebilir hataya (MİH) oranı incelenmiş olup değişim etkisi Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Bu gösterimde akım eksenini logaritmik olarak düzenlenmiştir.



Şekil 4.1. A, B ve C marka elektrik sayacının 30°C sıcaklıkta ve farklı güç faktörlerinde değişken akımlara göre gerçek BMH hatası ve BMH/MİH oranı (Tasci ve Düzkaya, 2023)

Şekil 4.1'den görüleceği üzere, B ve C marka sayaçlar için en fazla ölçüm hatasının genellikle 0,5 güç faktöründe maksimum ve minimum akım değerlerinde ortaya çıktığı görülmektedir. Ayrıca, B ve C marka sayaçlarda minimum ölçüm hatasının 1,0 güç faktöründe ve 5A referans akım değerinde meydana geldiği anlaşılmaktadır. C marka sayaç için en fazla ölçüm hatasının 5 A referans akım değerinde B ve C marka sayaçların hatasının yaklaşık 2 katı seviyesinde olduğu görülmektedir. C marka sayacın en az ölçüm hatasının ise minimum ve maksimum akım değerlerinde olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.1'deki BMH/MİH oranı grafikleri incelendiğinde, 0,5-0,8 ve 1,0 güç faktörlerinde gerçek bileşik maksimum hatanın yasal olarak izin verilen hataya oranının A ve B sayaçları için 35% seviyesinin, C marka sayaç için ise 61% seviyesinin altında kaldığı görülmektedir.

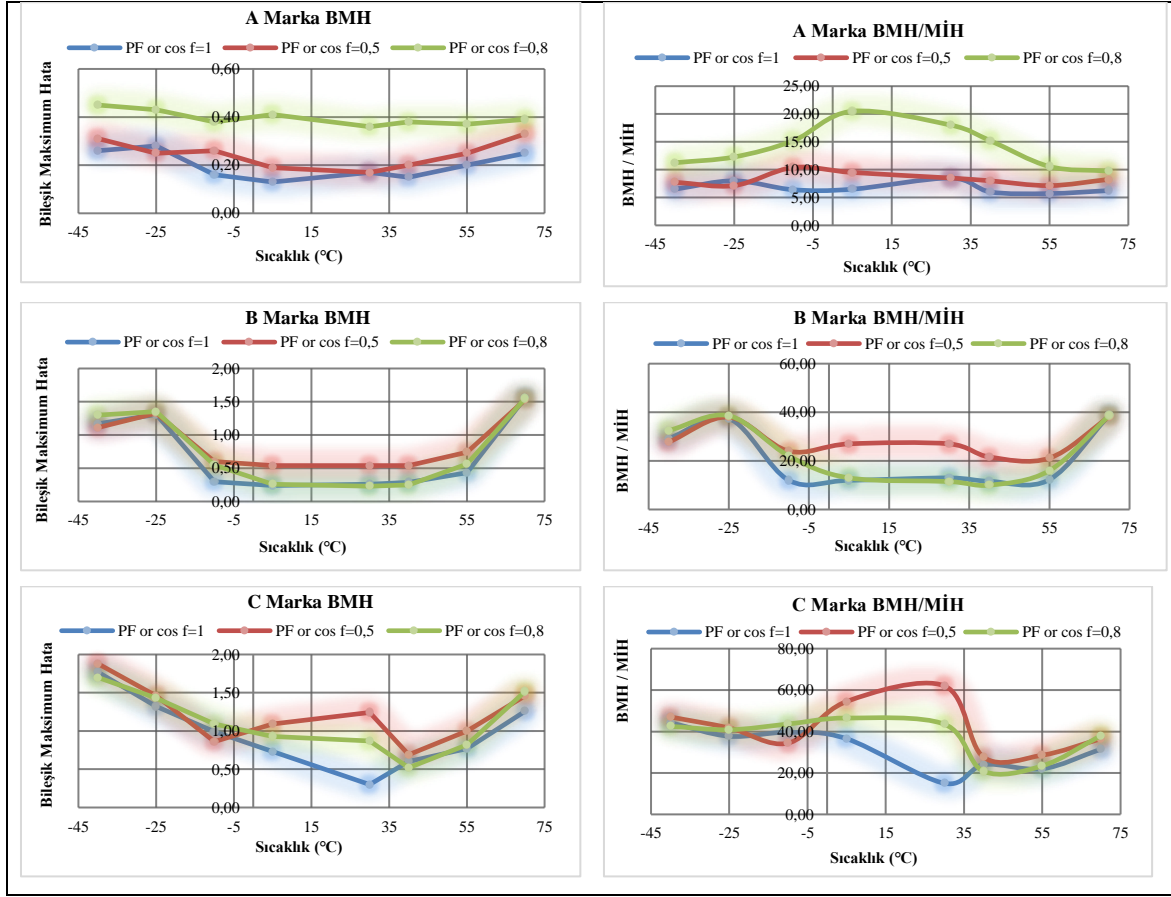
Bu nedenle, A, B ve C marka sayaçlar için BMH/MİH oranının kabul edilebilir bir sınır olan 70% seviyesinin altında kaldığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, imalatçıların yasal sınırlar içerisinde elektrik sayacının normal çalışma şartlarındaki hata miktarlarını minimum seviyede tutmaya odaklanarak tasarım ve üretim yaptığı düşünülmektedir.

4.1.2. Belirli bir akımdaki ölçüm hatasının incelenmesi

A, B ve C marka elektrik sayacının gerçek bileşik maksimum hata (BMH) değerleri 5A referans akım değerinde, sırasıyla 1.0, 0.5 ve 0.8 güç faktörü için minimum sıcaklıktan (-30°C) maksimum sıcaklığa (+70°C) kadar olan değerlerde ve bu hata değerinin maksimum izin verilebilir hataya (MİH) oranı incelenmiş olup Şekil 4.2'de gösterilmektedir.

Şekil 4.2'den görüleceği üzere; A, B ve C marka sayaçlar için maksimum ve minimum sıcaklık bölgelerine yaklaşıldığında 0,5-0,8 ve 1,0 güç faktörlerinde gerçek bileşik maksimum hatanın en yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir.

Benzer şekilde, söz konusu sayaçların tamamında, referans sıcaklığına yakın sıcaklık (25°C civarı) değerlerinde ise ölçüm hatasının minimum seviyelerde seyrettiği anlaşılmaktadır. Tüm sıcaklık değerlerinde, A ve B marka sayaçların BMH oranlarının C marka sayacının BMH oranına göre daha az olduğu ve C marka sayacın daha yüksek ölçüm hatası ile daha kararsız bir çalışma sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.2. A, B ve C marka elektrik sayacının 5 A referans akımda ve farklı güç faktörlerinde değişken sıcaklık değerlerine göre gerçek BMH hatası ve BMH/MİH oranı (Tasci ve Düzkaya, 2023)

Bu verilere göre, özellikle C marka sayacın ölçüm hatasının hızlı değişkenliği nedeniyle çok sıcak ve çok soğuk iklime sahip bölgelerde kullanılmasının pek uygun olmayacağı söylenebilir. Dolayısıyla, elektrik dağıtım şirketlerinin aboneleri için kullanıma sundukları elektrik sayacının bu davranışını dikkate alarak bölgesel sayaç tercihi yapmasında fayda olduğu düşünülmektedir.

Aynı şekilde yer alan BMH/MİH oranı grafikleri incelendiğinde, 0,5-0,8 ve 1,0 güç faktörlerinde gerçek bileşik maksimum hatanın yasal olarak izin verilen hataya oranının A ve B sayaçları için 35% seviyesinin, C marka sayaç için ise 61% seviyesinin altında kaldığı görülmektedir. Bu nedenle, A, B ve C marka sayaçlar için BMH/MİH oranının kabul edilebilir bir sınır olan 70% seviyesinin altında kaldığı anlaşılmakta olup en kötü durumun 0,5 güç faktöründeki çalışma şartlarında C marka sayaç verilerinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, bu sayacın ölçüm hatası açısından kararsız çalışmasına yönelik iyileştirmelerin yapılabileceği değerlendirilmektedir.

4.1.3. Bütüncül bir bakışla ölçüm hatasının incelenmesi

A, B ve C marka elektrik sayacının gerçek bileşik maksimum hata (BMH) değerleri ve ayrıca gerçek bütünleşik hata değerinin maksimum izin verilebilir hataya (MİH) oranı değişken sıcaklık ve akım değerlerinde tüm güç faktörleri için incelenmiş olup değişim etkisi Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. A, B ve C marka elektrik sayacının farklı sıcaklık ve akım değerlerinde tüm güç faktörlerinde göre gerçek BMH hatası ve BMH/MİH oranı (Tasci ve Düzkaya, 2023)

Şekil 4.3'den görüleceği üzere, A, B ve C marka sayaçlar için tüm güç faktörlerinde maksimum ve minimum sıcaklık bölgelerine doğru gidildikçe ölçüm hatasının hızlı bir şekilde arttığı, nominal çalışma sıcaklığına ve nominal akımlara doğru yaklaşıldığında ise ölçüm hatasının minimum seviyelere indiği görülmektedir. Ayrıca, A, B ve C marka sayaçlar için genel olarak en kararlı çalışma durumlarının sırasıyla 1,0; 0,8 ve 0,5 güç faktörlerinde oluştuğu ve minimum ölçüm hatasının ise referans akım değerinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

Diğer taraftan; A, B ve C marka sayaçların ölçüm hatalarının yasal olarak izin verilen hata değerlerinin içinde kaldığı görülmektedir. Bu nedenle, düzenleyici kamu otoriteleri tarafından, ilgili mevzuatta yer alan MİH değerlerini daha alt seviyelere çekecek şekilde güncelleme çalışması yapmasında fayda olduğu değerlendirilmektedir.

4.2. İstatistiksel Analiz Çalışması Sonuçları

Tezin üçüncü bölümünde, ilgili standardında yer alan formülde aktif elektrik sayacının bileşik maksimum hata değerinin hesaplanmasında özellikle akım, gerilim, sıcaklık ve frekans değişimlerinden kaynaklanan hataların dikkate alındığından ve ayrıca OIML R46 rehber dokümanı ve literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde bu değişken faktörlerin haricinde tek, çift ve alt harmonik bozulma oranları, aktif ve reaktif güç tüketim miktarları, sayaç sabitesi, kısa süreli aşırı akım hatası ve şiddetli gerilim değişkenliği hatası gibi faktörlerin de bu ölçüm hatasına etkisinin varlığından bahsedilmiştir.

Bu çerçevede, söz konusu değişkenlerin etkisini gözlemleyebilmek amacıyla A, B ve C marka B sınıfı aktif elektrik sayacının tip testlerinde elde edilen temel hata değerleri kullanılarak korelasyon ve regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Akabinde 9 adet farklı sınıf ve teknik verilere sahip aktif elektrik sayacı verileri ile modelleme çalışması yapılmıştır.

4.2.1. Korelasyon analizi sonuçları

Bu çalışmada, A, B ve C marka aktif elektrik sayacına ait verilerde 30°C sıcaklık, 5 A referans akım değeri, 220 V AC gerilim ve 50 Hz. çalışma frekansındaki bileşik maksimum ölçüm hatası esas alınmıştır. İlgili standardında referans sıcaklık 23°C olarak belirlenmiş,

ancak tip testlerindeki ilgili aralıktaki sıcaklık değerinin 30°C olarak düzenlendiği ve testlerin de bu doğrultuda gerçekleştirildiği görülmüştür.

Bu bağlamda, doğru bir değerlendirme yapılabilmesi için referans sıcaklık değeri olarak 30°C'deki bileşik maksimum hata değeri dikkate alınarak çalışmalar yürütülmüştür. Söz konusu veriler Çizelge 4.7'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.7. A, B ve C marka elektrik sayacı korelasyon analizi için girdi verileri

Marka	Sabite	Akım ve Gerilim Devresi Harmonik Bileşen	AC Akım Devresi DC ve Çift Harmonik	AC Akım Devresi Tek Harmonik	AC Akım Devresi Alt Harmonik	Kısa Süreli Aşırı Akım Hatası	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketim (W)	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketim (VA)	Akım Devresi Ortalama Güç Tüketim (VA)	BMH PF=1	BMH PF=0,5	BMH PF=0,8
A	1000	0,06000	0,12000	0,07000	0,26000	0,27000	0,84333	8,29333	0,01333	0,17000	0,17000	0,36000
B	1000	0,07000	0,15000	0,14000	0,10000	0,14000	0,56000	1,90000	0,02000	0,26000	0,54000	0,23000
C	5000	0,07000	0,11000	0,27000	0,19000	0,26000	0,40666	2,27000	0,01130	0,30000	1,24000	0,87000

Çizelge 4.7'de sunulan veriler Microsoft Office Professional Plus 2019 sürümünde yer alan Excel Solver analiz programı eklentisi ile analiz edilmiş olup her bir güç faktörü için hesaplanan sonuçlar Çizelge 4.8, Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da sırasıyla gösterilmektedir.

Çizelge 4.8. A, B ve C marka elektrik sayacı PF=1 için korelasyon analizi sonucu

	Sayaç Sabitesi	Akım ve Gerilim Devresi Harmonik Bileşen	AC Akım Devresi DC ve Çift Harmonik	AC Akım Devresi Tek Harmonik	AC Akım Devresi Alt Harmonik	Kısa Süreli Aşırı Akım Hatası	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketim (W)	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketim (VA)	Akım Devresi Ortalama Güç Tüketim (VA)	BMH (PF=1)
Sayaç Sabitesi	1									
Akım ve Gerilim Devresi Harmonik Bileşen	0,5	1								
AC Akım Devresi DC ve Çift Harmonik	-0,6933	0,2774	1							
AC Akım Devresi Tek Harmonik	0,9386	0,7680	-0,4023	1						
AC Akım Devresi Alt Harmonik	0,0720	-0,8278	-0,7686	-0,2764	1					
Kısa Süreli Aşırı Akım Hatası	0,4390	-0,5587	-0,9518	0,1022	0,9278	1				

Çizelge 4.8. (devam) A, B ve C marka elektrik sayacı PF=1 için korelasyon analizi sonucu

Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketimi (W)	-0,7688	-0,9382	0,0723	-0,9422	0,5825	0,2371	1			
Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketimi (VA)	-0,4547	-0,9987	-0,3265	-0,7340	0,8556	0,6007	0,9191	1		
Akım Devresi Ortalama Güç Tüketimi (VA)	-0,6805	0,2943	0,9998	-0,3861	-0,7798	-0,9571	0,0547	-0,3432	1	
BMH (PF=1)	0,7370	0,9538	-0,0241	0,9250	-0,6210	-0,2837	-0,9988	-0,9371	-0,0064	1

Çizelge 4.8’de yer alan korelasyon analizi sonuçları incelendiğinde; PF= 1.0 için BMH ile sayaç sabitesi, akım ve gerilim devrelerindeki harmonik bileşenler ve ayrıca AC akım devresindeki tek harmonikler arasında pozitif yönde güçlü bir ilişkinin olduğu, ancak AC akım devresindeki alt harmonikler, gerilim devresindeki (W) ölçüm birimi cinsinden ortalama güç tüketimi ve gerilim devresindeki (VA) ölçüm birimi cinsinden ortalama güç tüketimi arasında negatif güçlü bir ilişkinin var olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.9. A, B ve C marka elektrik sayacı PF=0,5 için korelasyon analizi sonucu

	Sayaç Sabitesi	Akım ve Gerilim Devresi Harmonik Bileşen	AC Akım Devresi DC ve Çift Harmonik	AC Akım Devresi Tek Harmonik	AC Akım Devresi Alt Harmonik	Kısa Süreli Aşırı Akım Hatası	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketim (W)	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketim (VA)	Akım Devresi Ortalama Güç Tüketim (VA)	BMH (PF=1)
Sayaç Sabitesi	1									
Akım ve Gerilim Devresi Harmonik Bileşen	0,5	1								
AC Akım Devresi DC ve Çift Harmonik	-0,6934	0,2774	1							
AC Akım Devresi Tek Harmonik	0,9387	0,7680	-0,4023	1						
AC Akım Devresi Alt Harmonik	0,0720	-0,8278	-0,7686	-0,2764	1					
Kısa Süreli Aşırı Akım Hatası	0,4390	-0,5587	-0,9518	0,1022	0,9278	1				
Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketimi (W)	-0,7688	-0,9382	0,0723	-0,9422	0,5825	0,2371	1			
Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketimi (VA)	-0,4547	-0,9987	-0,3265	-0,7340	0,8556	0,6001	0,9191	1		

Çizelge 4.9. (devam) A, B ve C marka elektrik sayacı PF=0,5 için korelasyon analizi sonucu

Akım Devresi Ortalama Güç Tüketimi (VA)	-0,6805	0,2943	0,9998	-0,3861	-0,7798	-0,9571	0,0547	-0,3432	1	
BMH (PF=0,5)	0,9403	0,7650	-0,4066	0,9999	-0,2719	0,1068	-0,9406	-0,7308	-0,3904	1

Çizelge 4.9’da yer alan korelasyon analizi sonuçları incelendiğinde; PF= 0,5 için BMH ile sayaç sabitesi, akım ve gerilim devrelerindeki harmonik bileşenler ve ayrıca AC akım devresindeki tek harmonikler arasında pozitif yönde güçlü bir ilişkinin olduğu, ancak gerilim devresindeki (W) ölçüm birimi cinsinden ortalama güç tüketimi ve gerilim devresindeki (VA) ölçüm birimi cinsinden ortalama güç tüketimi arasında negatif ve güçlü bir ilişkinin var olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.10. A, B ve C marka elektrik sayacı PF=0,8 için korelasyon analizi sonucu

	Sayaç Sabitesi	Akım ve Gerilim Devresi Harmonik Bileşen	AC Akım Devresi DC ve Çift Harmonik	AC Akım Devresi Tek Harmonik	AC Akım Devresi Alt Harmonik	Kısa Süreli Aşırı Akım Hatası	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketim (W)	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketim (VA)	Akım Devresi Ortalama Güç Tüketim (VA)	BMH (PF=1)
Sayaç Sabitesi	1									
Akım ve Gerilim Devresi Harmonik Bileşen	0,5	1								
AC Akım Devresi DC ve Çift Harmonik	-0,6934	0,2774	1							
AC Akım Devresi Tek Harmonik	0,9387	0,7680	-0,4023	1						
AC Akım Devresi Alt Harmonik	0,07198	-0,8279	-0,7686	-0,2764	1					
Kısa Süreli Aşırı Akım Hatası	0,4390	-0,5587	-0,9518	0,1022	0,9278	1				
Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketimi (W)	-0,7688	-0,9382	0,07223	-0,9422	0,5825	0,2371	1			
Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketimi (VA)	-0,4547	-0,9987	-0,3265	-0,7340	0,8556	0,6007	0,9191	1		

Çizelge 4.10. (devam) A, B ve C marka elektrik sayacı PF=0,8 için korelasyon analizi sonucu

Akım Devresi Ortalama Güç Tüketimi (VA)	-0,6805	0,2943	0,9998	-0,3861	-0,7798	-0,9571	0,0547	-0,3432	1	
BMH (PF=0,8)	0,9814	0,3243	-0,8189	0,8549	0,2623	0,6034	-0,6316	-0,2751	-0,8087	1

Çizelge 4.10'da yer alan korelasyon analizi sonuçları incelendiğinde, PF= 0,8 için; BMH ile sayaç sabitesi, AC akım devresindeki tek harmonikler ve kısa süreli aşırı akım oranlarının etkisi arasında pozitif yönde güçlü bir ilişkinin olduğu, ancak AC Akım Devresinde DC ve Çift Harmonik, gerilim devresindeki (W) ölçüm birimi cinsinden ortalama güç tüketimi ve akım devresindeki (VA) ölçüm birimi cinsinden ortalama güç tüketimi arasında negatif güçlü bir ilişkinin var olduğu söylenebilir. Farklı güç faktörleri için hesaplanan bu korelasyon analizi sonuçlarının kümülatif icmali ise Çizelge 4.11'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.11. Kümülatif korelasyon analizi sonuçları (Tasci ve Düzkaaya, 2023)

	Sayaç Sabite	Akım ve Gerilim Devresi Harmonik Bileşen	AC Akım Devresi DC ve Çift Harmonik	AC Akım Devresi Tek Harmonik	AC Akım Devresi Alt Harmonik	Kısa Süreli Aşırı Akım Hatası	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketimi (W)	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketimi (VA)	Akım Devresi Ortalama Güç Tüketimi (VA)
Hata (PF=1)	0,7370	0,9538	-0,0241	0,9249	-0,6210	-0,2837	-0,9988	-0,9371	-0,0064
Hata (PF=0,5)	0,9403	0,7650	-0,4066	0,9999	-0,2719	0,1068	-0,9406	-0,7308	-0,3904
Hata (PF=0,8)	0,9814	0,3243	-0,8189	0,8549	0,2623	0,6034	-0,6316	-0,2751	-0,8086

Sonuç olarak, bu korelasyon analizi sonuçları birlikte dikkate alındığında değişken akım, gerilim, sıcaklık, frekans ve güç faktörlerinin elektrik sayacının bileşik maksimum hataya etkisi dışında, özellikle sayaç sabitesi, harmonik hatası, kısa süreli aşırı akım hatası ve aktif ve reaktif güç tüketim oranlarının da BMH değerine etkisinin olduğu görülmektedir.

4.2.2. Regresyon analizi sonuçları

Korelasyon analizi sonucunda değişken parametrelerin bileşik maksimum hataya olan etkisi dikkate alınarak regresyon analizi yapmak amacıyla Çizelge 4.4, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve

Çizelge 4.7’de yer alan sayaç verileri bir araya getirilerek Çizelge 4.12’de yer alan formatta bir derleme veri tablosu oluşturulmuştur.

Çizelge 4.12. A, B ve C marka elektrik sayacı regresyon analizi girdi veri formatı

Marka	Sabite	Akım ve Gerilim Devresi Harmonik Bileşen	AC Akım Devresi DC ve Çift Harmonik	AC Akım Devresi Tek Harmonik	AC Akım Devresi Alt Harmonik	Kısa Süreli Aşırı Akım Hata	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketim (W)	Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketim (VA)	Akım Devresi Ortalama Güç Tüketim (VA)	Sıcaklık (°C)	Akım (A)	PF	BMH
	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8	Var9	Var10	Var11	Var12	Bağımlı D.
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	0,25	1	0,44
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	0,25	0,5	0
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	0,25	0,8	0
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	0,5	1	0,35
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	0,5	0,5	0,46
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	0,5	0,8	0,61
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	5	1	0,26
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	5	0,5	0,31
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	5	0,8	0,45
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	100	1	0,41
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	100	0,5	0,43
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-40	100	0,8	0,6
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-25	0,25	1	0,41
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-25	0,25	0,5	0
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-25	0,25	0,8	0
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-25	0,5	1	0,25
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-25	0,5	0,5	0,42
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-25	0,5	0,8	0,58
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-25	5	1	0,28
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,293	0,013	-25	5	0,5	0,25
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,29333	0,01333	-25	5	0,8	0,43
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,29333	0,01333	-25	100	1	0,37
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,29333	0,01333	-25	100	0,5	0,37
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,29333	0,01333	-25	100	0,8	0,56
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,29333	0,01333	-10	0,25	1	0,38
1	1000	0,060	0,120	0,070	0,260	0,270	0,843	8,29333	0,01333	-10	0,25	0,5	0
2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

A, B ve C marka B sınıfı elektrik sayacına ait ilgili tüm veriler derlendikten sonra Excel Solver Analiz programı kullanılarak regresyon analizi yapılmış ve Çizelge 4.13’te yer alan sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.13. A, B ve C marka elektrik sayacına ait Solver regresyon analizi sonuçları

Regresyon İstatistik	Değer							
Çoklu R	0,5379							
R Kare	0,2893							
Ayarlı R Kare	0,2519							
Standart Hata	0,4327							
Gözlem	288							
ANOVA								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Anlamlılık F</i>			
Regresyon	12	21,4979	1,7915	22,9626	5,2539E-35			
Fark	282	52,8026	0,1872					
Toplam	294	74,3006						
	<i>Katsayılar</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-değeri</i>	<i>Düşük %95</i>	<i>Yüksek %95</i>	<i>Düşük 95,0%</i>	<i>Yüksek 95,0%</i>
Kesişim	0,5619	0,1195	4,7024	4,030E-06	0,3267	0,7971	0,3267	0,7971
Sayaç Sabitesi	5,8378E-05	1,5183E-05	3,8451	0,00015	2,8492E-05	8,8264E-05	2,85E-05	8,83E-05
Akım ve Gerilim Devresi Harmonik Bileşen	0	0	65535	#SAYI!	0	0	0	0
AC Akım Devresi DC ve Çift Harmonik	0	0	65535	#SAYI!	0	0	0	0
AC Akım Devresi Tek Harmonik	0	0	65535	#SAYI!	0	0	0	0
AC Akım Devresi Alt Harmonik	0	0	65535	#SAYI!	0	0	0	0
Kısa Süreli Aşırı Akım Hatası	0	0	65535	#SAYI!	0	0	0	0
Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketimi (W)	0	0	65535	#SAYI!	0	0	0	0
Gerilim Devresi Ortalama Güç Tüketimi (VA)	-0,0613	0,0098	-6,2743	#SAYI!	-0,0806	-0,0421	-0,0805	-0,0421
Akım Devresi Ortalama Güç Tüketimi (VA)	0	0	65535	#SAYI!	0	0	0	0
Sıcaklık(C)	-0,0013	0,0007	-1,7987	#SAYI!	-0,0026	0,0001	-0,0026	0,0001
Akım(A)	0,0022	0,0006	3,6826	0,0003	0,0010	0,0034	0,0010	0,0034
Güç Faktörü	0,1796	0,1241	1,4472	0,1490	-0,0647	0,4239	-0,0647	0,4239

Çizelge 4.13'te yer alan sonuçlar incelendiğinde, 9 farklı bağımsız değişkene ait “P” değerinin hesaplanması sırasında hata ile karşılaşıldığı ve R-Kare anlamlılık sonucunun ise 0,2893 seviyesinde oldukça başarısız olduğu görülmektedir. Bu çizelgede yer alan #SAYI! ifadesi, bazı bağımsız değişkenlerin BMH isimli bağımlı değişken üzerindeki korelasyon durumuna göre incelenirken lineer olmayan ilişki sebebiyle hesaplanamadığına ilişkin olarak üretilmiş bir değerdir.

Sonuçları üretilen diğer 3 bağımsız değişkenin “p” değerinin 0,05'den küçük olması nedeniyle aralarındaki ilişkinin anlamlı olabileceği ancak hem R-Kare anlamlılık sonucunun (0,2893) çok düşük olması hem de diğer 9 bağımsız değişken için sonuç üretilmemesi nedeniyle sadece bu sonuçlar üzerinden bu yöntem ile bir analiz yapılmasının doğru olmayacağı değerlendirilmiş olup “F” sınıma sonuçları dikkate alınmamıştır.

Bu nedenle, söz konusu hatanın kaynağını tespit etmek için girdi verileri daha detaylı bir inceleme yapmak üzere Stata Programı ile tekrar analiz edilmiş, ancak bu program kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda da Çizelge 4.14'te yer alan benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Stata, Texas College Station'da bulunan StataCorp LP şirketi tarafından geliştirilen ve satılan genel amaçlı bir istatistiksel yazılımdır. 2009 yılında faaliyetine başlayan bu program geniş yelpazedeki istatistiksel rutinleri, veri yönetimi kolaylığı ve özel yayın kalitesinde grafikleriyle tanınmaktadır. Windows, Macintosh ve Unix/Linux dahil neredeyse tüm bilgisayar platformlarında mevcut olup tüm bilgisayar platformlarında aynı şekilde çalışacak şekilde tasarlanmıştır (Gutierrez, 2010).

Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'te yer alan sonuçlar ve sonuçların dağılım tablosu incelendiğinde, bazı bağımsız değişkenlerin değerlerinin üretilmediği, bazı değişkenler arasındaki korelasyon katsayılarının ise sıfır yahut sıfıra yakınlığı görülmekte olup bu durumun çoklu doğrusal bağlantı durumunu oluşturduğu değerlendirilmektedir (Orhunbilge, 2002). Bu nedenle, söz konusu veriler arasında doğrusal bir ilişkinin olmayabileceği ve aynı zamanda bu şekilde derlenen bir veri kümesinde değişen varyans probleminin olabileceği ve sadece 3 adet sayaç verisinin (96 adet) her bir sıcaklık, akım ve güç faktörleri dikkate alınarak elde edilmiş kırılımlı 288 adet (3*96) veri üzerinden bir regresyon analizinin anlamlı sonuçlar üretmeyebileceği anlaşılmıştır.

Çizelge 4.14. A, B ve C marka elektrik sayacına ait Stata regresyon analizi sonuçları

Source	SS	df	MS	Number of obs =	288
				F(5, 282)	= 22.96
Model	21.4979743	5	4.29959485	Prob > F	= 0.0000
Residual	52.8026239	282	.187243347	R-squared	= 0.2893
				Adj R-squared	= 0.2767
Total	74.3005982	287	.258887102	Root MSE	= .43272

bağımlı	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf. Interval]
var1	.0000584	.0000152	3.85	0.000	.0000285 .0000883
var2	0 (omitted)				
var3	0 (omitted)				
var4	0 (omitted)				
var5	0 (omitted)				
var6	0 (omitted)				
var7	0 (omitted)				
var8	-.0612943	.0097691	-6.27	0.000	-.080524 -.0420647
var9	0 (omitted)				
var10	-.001247	.0006933	-1.80	0.073	-.0026116 .0001176
var11	.0022087	.0005998	3.68	0.000	.0010281 .0033893
var12	.1795778	.1240899	1.45	0.149	-.0646822 .4238379
_cons	.5619139	.1194964	4.70	0.000	.3266958 .7971319

Tezin üçüncü bölümünde de belirtildiği üzere, regresyon analizi çalışmalarında değişen varyans durumunun dezavantajları olabilmektedir. EKK yönteminde böyle bir durumla karşılaşılması halinde analiz sonuçları tutarlılık ve yansızlık açısından daha iyi durumda olmasına rağmen etkinlik açısından özelliği kaybolmaktadır (Yamak ve Köseoğlu, 2006).

Değişen varyans sorununun üstesinden gelebilmek için varsayımların sağlanmasında analizin normalleştirilerek doğrusallaştırılması amacıyla değişkenlerin dönüştürülmesi yöntemi tercih edilmektedir. Bu amaçla; karekök dönüşümü, arcsin dönüşümü, logaritmik dönüşüm, kare dönüşümü ve hiperbolik dönüşüm yöntemleri kullanılmaktadır (Albayrak, 2008).

Bu sebeple, değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri de modelleyebilmek amacıyla daha fazla veri kullanılarak yapay sinir ağı ile modelleme yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu çerçevede, elde edilen tüm veriler uygun bir transfer fonksiyonu kullanılarak normalize edilmiş ve Matlab platformunda yapay sinir ağı modeli oluşturularak hata tahmini yapılmıştır.

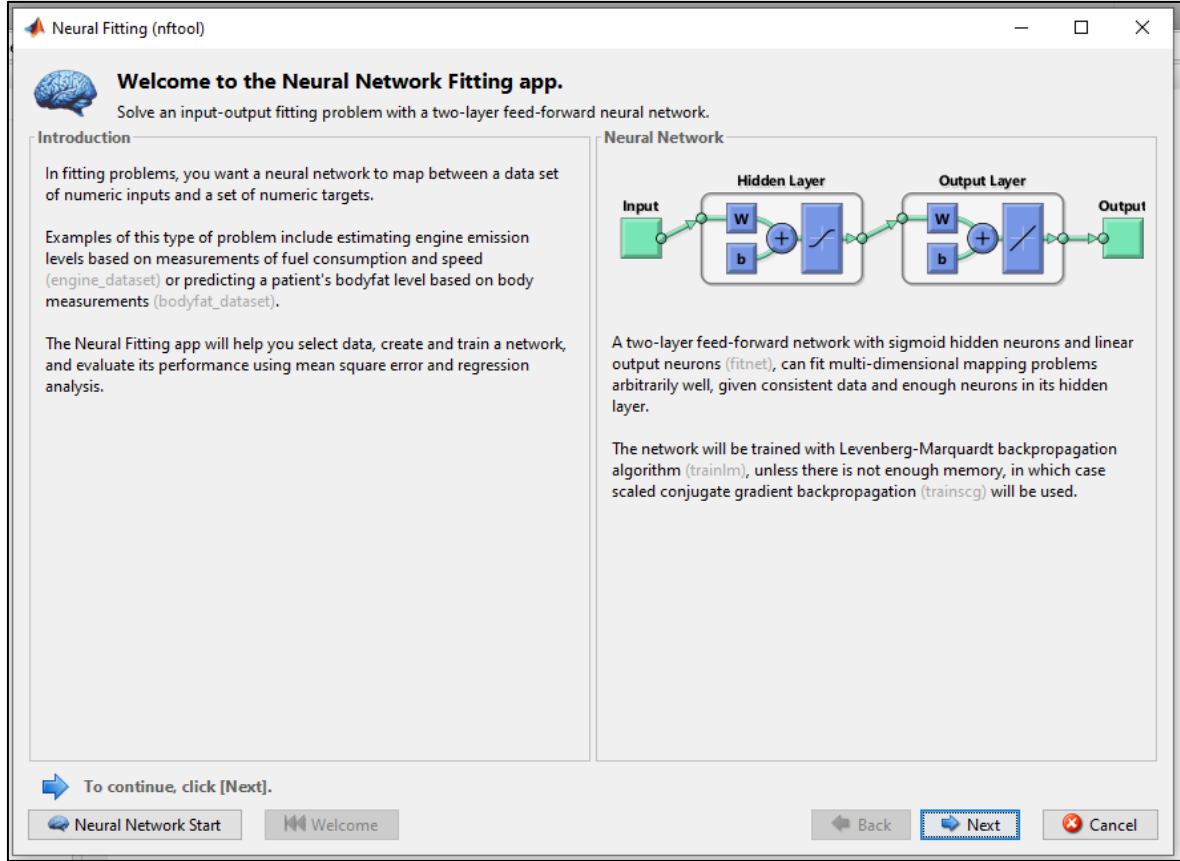
4.3. Yapay Sinir Ağı Modellemesi ve Hata Tahmini

Yapay sinir ağları bilindiği üzere hücrelerden meydana gelmektedir. Bu hücrelerin özellikleri incelendiğinde doğrusal bir yapıda olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, ağa yayılmış olarak işlevini gerçekleştiren doğrusal olmayan sinir hücreleri yapay sinir ağının da doğrusal olmayan bir özellik kazanmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla, YSA kazandığı bu kabiliyeti sebebiyle doğrusal olmayan karışık haldeki problemlere de başarılı çözümler sunabilmektedir (Sesveren, 2008).

Bu husus doğrultusunda, elektrik sayacının bileşik maksimum hatasına etki eden değişken faktörlerin etki durumu ve miktarı korelasyon analizi ile belirlenmiş, regresyon analizi sonucunda ise bu değişkenler arasında doğrusal olmayan bir ilişkinin olabileceği görülmüştür.

Bu bağlamda, daha doğru bir tahmin modeli geliştirebilmek için toplamda 9 adet olmak üzere B ve C sınıfı elektrik sayacına ait tip test sonuçlarından oluşan veriler kullanılarak yapay sinir ağı modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla; tez çalışmasında, YSA modelinin oluşturulması için Matlab R2018b versiyonu kullanılmıştır.

Matlab, 1984 yılında Cleve Moler tarafından öğrencilerinin matematiksel hesaplama problemlerini çözmelerine yardımcı olmak amacıyla geliştirilmiştir. Programın ismi, MATrix LABoratory (Matris Laboratuvarı) kelimelerinden türetilmiştir. Matlab'ın en önemli özelliklerinden biri, matris işlemleri için optimize edilmiş olmasıdır. Bu nedenle, büyük boyutlu matris işlemleri gibi hesaplama yoğunluğu yüksek işlemleri hızlı bir şekilde yapabilmektedir (Kaya, 2023).



Şekil 4.4. Matlab Nftool arayüzü görseli

Matlab programında, komut penceresi üzerinden kodlama yapılabileceği gibi yapay sinir ağı kurulumu ve uygulaması için geliştirilmiş Neural Fitting Application (NFTOOL) ara yüzü yer almaktadır. Bu ara yüz kullanılarak verilerin sınıflandırılması, modelin geliştirilmesi ve eğitilmesi gibi işlemler rahat bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu ara yüze ilişkin görsel Şekil 4.4'te sunulmaktadır.

4.3.1. Parametrelerin belirlenmesi

İlk olarak, çalışmanın bu aşamasında YSA ile uygun bir model geliştirebilmek için 5 adet C sınıfı, 4 adet ise B sınıfı olmak üzere toplam 9 farklı modele ait elektrik sayacına ait uygun tip test raporları Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı veri tabanından temin edilmiştir (STB, 2023).

Sonrasında, belirli bir yükteki bileşik maksimum hatanın hesaplanması için gerek OIML R46 gerekse de TS EN 50470-3:2022 standardında belirtilen yöntemlerde yer alan değişken faktörler ile birlikte literatürde yer alan çalışmalarda etkili olduğu değerlendirilen diğer

değişken faktörler korelasyon çalışması sonuçları dikkate alınarak yapay sinir ağı modeli geliştirilirken kullanılmak amacıyla yeniden belirlenmiştir.

Bu çerçevede; sayaç için “model”, “sınıf”, “minimum akım”, “transient akımı”, “referans akımı”, “maksimum akım”, “THD harmonik”, “Tek harmonik”, “Güç tüketimi (W)”, “Güç tüketimi (VA)”, “Sıcaklık”, “Çalışma akımı”, “Güç faktörü (cos f)” ve “MİH” değişkenleri girdi parametresi olarak, “bileşik maksimum hata” miktarı ise çıkış parametresi olarak belirlenmiştir. Bu aşamada, “THD harmonik” değişkeni test raporunda yer alan tüm harmonik bileşenlerin bileşke büyüklüğü olarak; “Güç tüketimi (W)” değişkeni ise akım ve gerilim devrelerindeki aktif güç tüketiminin bileşke büyüklüğü olarak düzenlenmiştir.

4.3.2. Eğitim, test ve uygulama için hazırlık

Bu doğrultuda, 9 farklı elektrik sayacına ait ilgili değişken değerleri sıcaklık, güç faktörü, akım ve MİH değerlerine göre kırılımlı bir şekilde düzenlenerek 864 adet veriden meydana gelecek şekilde veri seti oluşturulmuştur. Bu veri setinde bulunan ilk 8 sayaca ait 768*14 adet veri uygun bir YSA modeli geliştirebilmek amacıyla eğitim amaçlı olarak, diğer 1 sayaca ait 96*14 adet veri ise oluşturulan YSA modelinin başarısını test etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu veri setinde, YSA modelini sayısal veriler üzerinden eğitebilmek için A sınıfı sayaç için model verisi “1”, B sınıfı sayaç için “2” ve C sınıfı sayaç için “3” olarak kullanılan veri formatı uygun hale getirilmiştir. Akabinde, söz konusu tüm veriler kullanılmadan önce logaritmik sigmoid fonksiyonu esas alınarak Eş. (3.13)’te yer alan formül ile normalize edilmiştir.

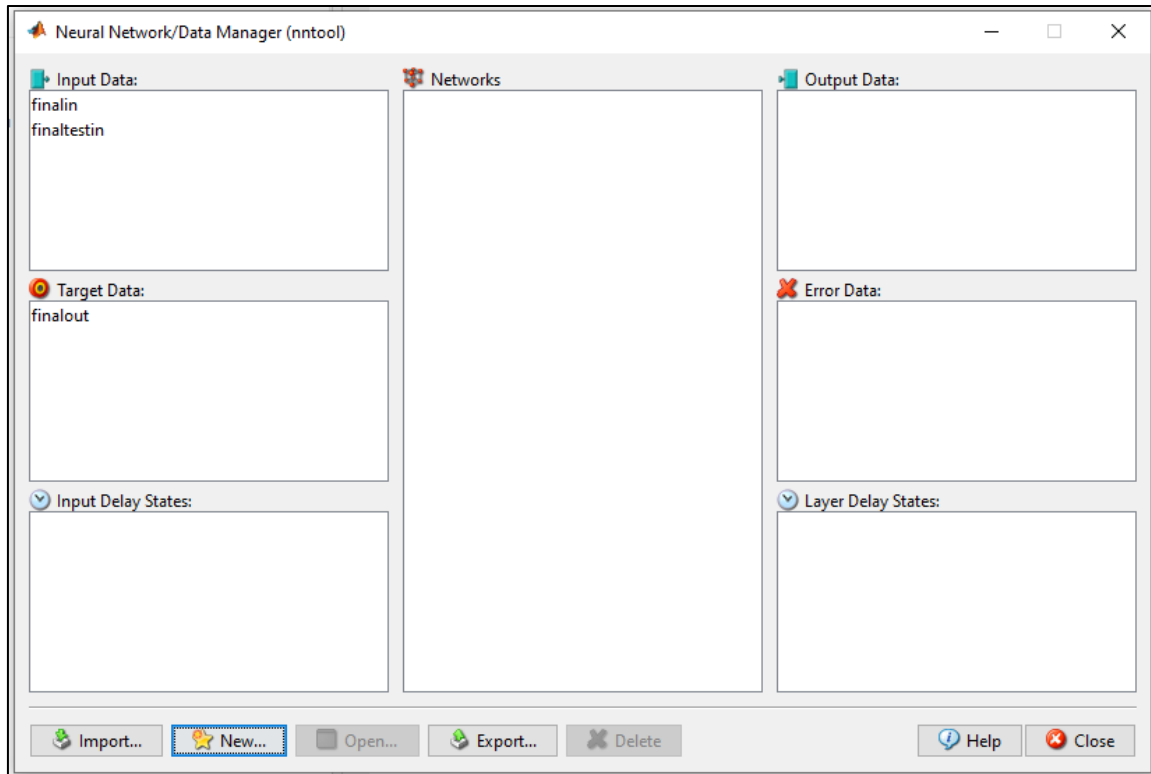
Çizelge 4.15. YSA modeli için veri dağılımı

Türü	Adet
Eğitim	768*14
Test	96*14
Toplam	864*14

Tahmin yapmak için belirlenen, düzenlenen ve 0-1 değerleri arasında normalize edilen veriler Çizelge 4.15’de yer alan veri dağılımı esas alınarak Matlab platformuna aktarılmıştır. Matlab platformunda söz konusu veriler transpoze edilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.

4.3.3. Ağ modelinin seçimi

YSA modelinin seçilebilmesi amacıyla ilk olarak ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. Bunun için Matlab komut satırında “nntool” yazılarak ara yüz çalıştırılır. Bu ara yüzün başlangıç görseli Şekil 4.5’te sunulmaktadır. Uygulamada kullanmak üzere eğitim girdi ve çıktı verileri ile geliştirilen YSA için test girdi verileri hazırlanarak model oluşturulur. Bu çalışmada, modellenen yapay sinir ağı modelinin eğitiminde “finalin” isimli 14*768 boyutlu matris girdi verilerini, “finalout” isimli 1*768 boyutlu matris çıktı verilerini, “finaltestin” isimli 14*96 boyutlu matris ise YSA testi için girdi verilerini barındırmaktadır.



Şekil 4.5. Matlab Nntool ara yüzü değişkenlerin sınıflandırılması

İleri Beslemeli Geri Yayılmalı Çok Katmanlı Algılayıcı modeli esas alınarak geliştirilmiş YSA yapısının özellikle mühendislik gibi çalışma alanlarındaki tahmin uygulamalarında

yaygın bir şekilde tercih edildiği bilinmektedir (Şencan ve Kalogirou, 2005). Bu modelin doğrusal olmayan modellerdeki tahmin başarısının oldukça yüksek olması nedeniyle tahmin çalışmalarında oldukça sık bir şekilde kullanılmaktadır (Türk ve Kiani, 2019). Bu nedenle, kullanılabilirliğinin daha kolay olması ve performans açısından daha başarılı sonuçlara ulaşılabilmesi amacıyla çalışmada bu modelin kullanılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir.

4.3.4. Öğrenme modelinin seçimi

Matlab platformunda YSA eğitimi için birçok eğitim ve öğrenme fonksiyonu bulunmaktadır. Genellikle, YSA çalışmalarında geriye yayılım algoritmasının yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Fakat, yakınsama hızının istenen seviyede iyi olmaması ve daha küçük değerlerdeki verimliliğinin olması gibi olumsuz özelliklerinin bulunması nedeniyle bu algoritma tatbik edilmesi kolay olan günlük uygulamalar için önerilmemektedir. Çünkü, bu algorithmada birinci dereceden türev bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır ve bu durum öğrenme hızını yavaşlatmaktadır (Wilamowski ve Yu, 2010).

Diğer taraftan, Newton, Levenberg-Marquardt (LM) öğrenme algoritmasında ise ikinci dereceden türev bilgisi kullanılmaktadır ve bu durum LM algoritmasının hızını yükseltmektedir. Bu nedenle, LM algoritması yapay sinir ağının eğitim çalışmalarında sık olarak tercih edilmektedir. Zira, LM algoritması, dik iniş yönteminin kararlılık özelliği ile Newton algoritmasının etkili hız özelliğini kendi yapısında birleştirmiştir (Dohnal, 2004; Khosravi ve Barghinia, 2006).

Diğer bir ifadeyle, sağladığı etkin kararlılık ve hız özelliği dikkate alınarak yapay sinir ağlarının eğitim çalışmalarında LM algoritması yaygın olarak kullanılmaktadır (Çavuşlu, Becerekli ve Karakuzu, 2012).

Bu nedenle, söz konusu çalışmada öğrenme modeli olarak ileri beslemeli ağ tipinde Levenberg-Marquardt Öğrenme Algoritması (LMÖA) tercih edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, bu algoritma en küçük kareler tahmin metodu olarak da bilinmekte olup en büyük komşuluk mantığı esas alınarak kurgulanmış bir yöntemdir (Doğan, 2010).

4.3.5. Diğer parametrelerin belirlenmesi

YSA öğrenme modelinin geliştirilebilmesi için, değişkenler düzenlendikten sonra kullanılacak algoritma, aktivasyon fonksiyonu, katman sayısı, gizli hücre sayısı, performans fonksiyonu ve nöron sayısının belirlenmesi gerekmektedir.

Bu amaçla, çalışmada, girdi parametresi olarak 14 bağımsız değişken ve 1 bağımlı değişken olduğunu düşünerek, kullanacağımız en etkili katman sayısı ve katmandaki nöron sayısını bulmak için literatürde kullanılan bazı varsayımlar dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır.

Bu doğrultuda, Heaton (2007) tarafından yapılan çalışmadaki yöntem çerçevesinde; öncelikle girdi nöron sayısının 14 nöron olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım dikkate alınarak giriş nöron sayısına yani 14 nörona kadar veya girdi nöronunun iki katına kadar yani 28 nörona kadar veya giriş nöronunun 2/3'üne çıkış nöronunun büyüklük sayısının ilavesine kadar sayıya yani 7 nörona kadar testler yapılması gerektiği değerlendirilmiştir. Bu kapsamda yapılan testlerin performans ölçüm sonuçları Çizelge 4.16'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.16. Nöron sayısına göre performans ölçüm sonuçları

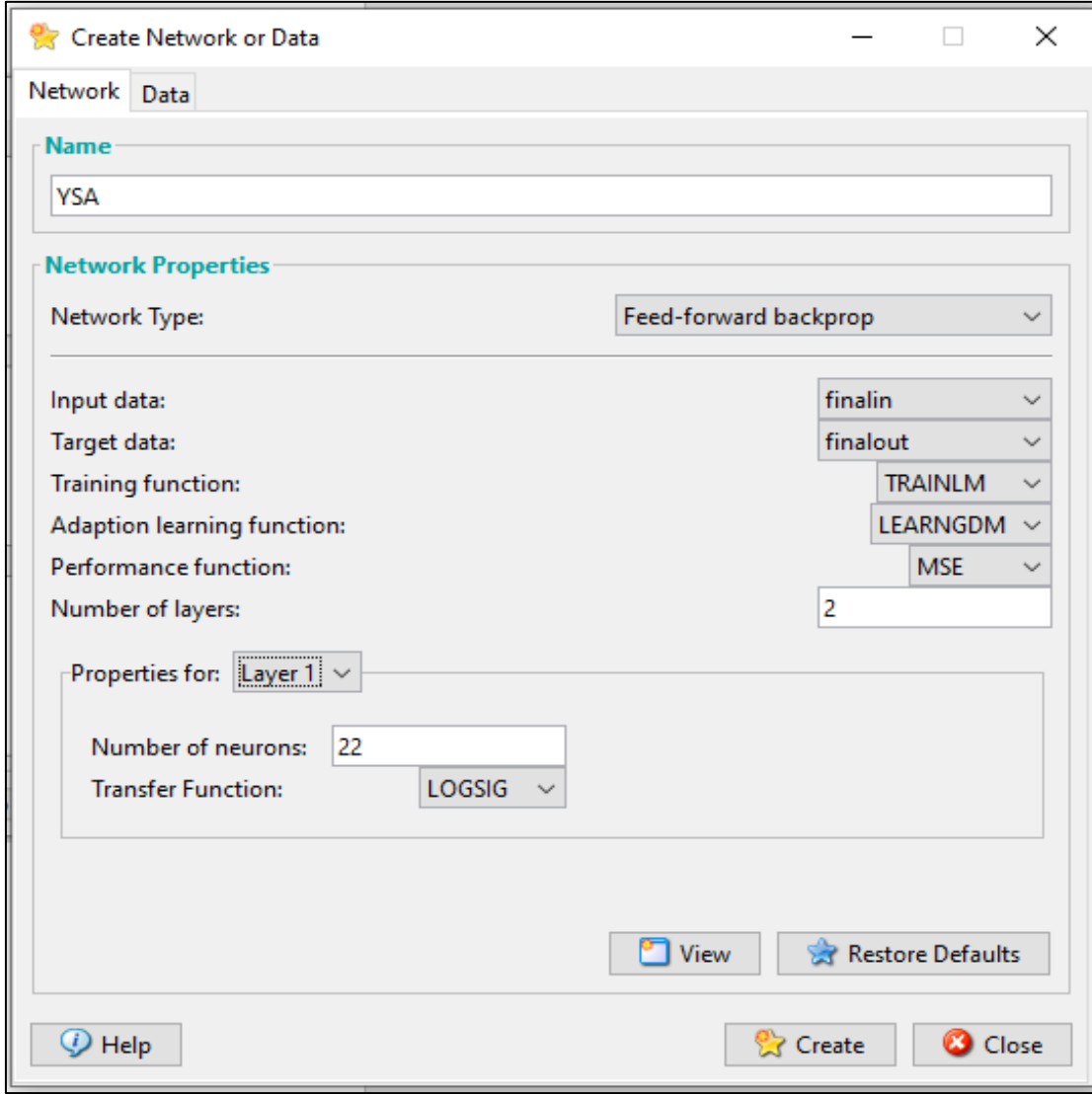
Nöron Sayısı	R2	RMSE	cov	MAPE
1	0,7953	0,1341	28,2884	0,2313
2	-0,0077	0,2976	62,7696	0,3562
3	0,3333	0,2420	51,0577	0,2826
4	-0,0077	0,2976	62,7696	0,3562
5	0,3500	0,2390	50,4123	0,2647
6	-0,0077	0,2976	62,7696	0,3562
7	0,3422	0,2404	50,7157	0,2797
8	0,3636	0,2365	49,8825	0,2599
9	0,3469	0,2396	50,5325	0,2698
10	0,3551	0,2381	50,2168	0,2606
11	0,3587	0,2374	50,0738	0,2607
12	0,3509	0,2388	50,3801	0,2692

Çizelge 4.16. (devam) Nöron sayısına göre performans ölçüm sonuçları

13	0,3607	0,2370	49,9980	0,2606
14	0,3572	0,2377	50,1343	0,2624
15	0,3498	0,2390	50,4225	0,2715
16	0,1347	0,2758	58,1667	0,3895
17	0,3566	0,2378	50,1592	0,2642
18	-0,0077	0,2976	62,7696	0,3562
19	-0,0077	0,2976	62,7696	0,3562
20	0,3602	0,2371	50,0150	0,2628
21	0,3451	0,2399	50,6032	0,2666
22	0,3619	0,2368	49,9485	0,2563
23	0,3473	0,2395	50,5192	0,2740
24	0,3590	0,2373	50,0621	0,2630
25	0,3694	0,2354	49,6540	0,2564
26	0,3571	0,2377	50,1361	0,2628
27	0,3583	0,2375	50,0928	0,2623
28	0,3590	0,2373	50,0656	0,2611

Bu çerçevede, Çizelge 4.16 incelendiğinde, en büyük R^2 değerinin ve en düşük RMSE, cov ve MAPE değerinin 1 ve 22 nöronlarında olduğu görülmektedir. YSA modeli üzerindeki gizli katmanda hem 1 hem de 22 nöronla yapılan eğitim testlerinde, 22 nöronlu gizli katmanı ve 1 nöronlu çıkış katmanı olan bir modelin daha etkili sonuçlar ürettiği görülerek bu doğrultuda diğer parametrelerin uygunluğu performans açısından test edilerek belirlenmiştir.

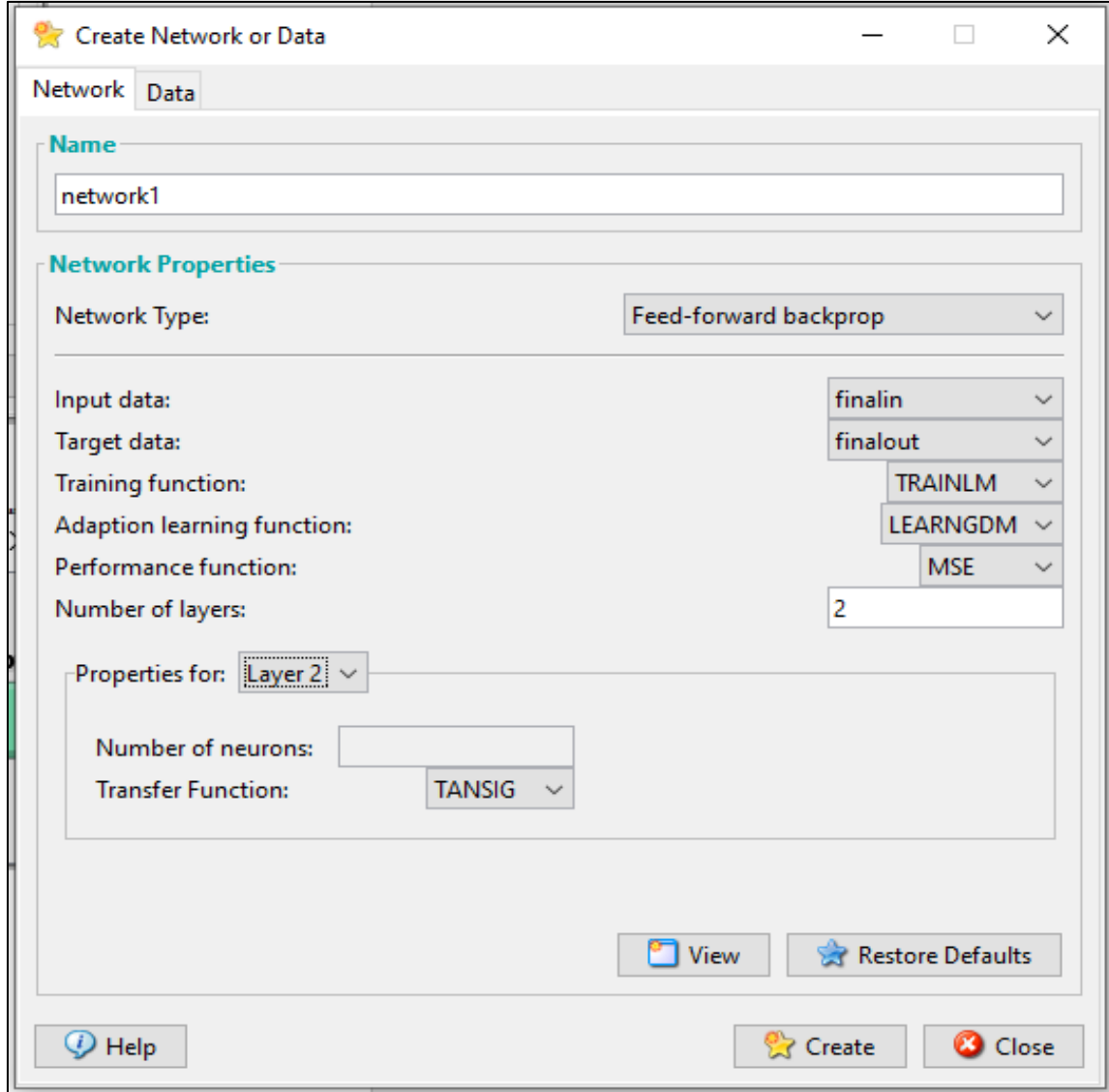
Tahmin yapılırken, çalışmalarda en iyi sonucu verdiği anlaşıldığı için gizli katmanda transfer fonksiyonu olarak “logsig” fonksiyonu, ileri beslemeleri geri yayılım modelinde yaygın olarak kullanıldığı için eğitim fonksiyonu olarak “trainlm” fonksiyonu, uyarlama öğrenme fonksiyonu olarak “LearnGDM” fonksiyonu tercih edilmiştir. Bu teknik bilgileri içeren gizli yapıya ait özellikler Şekil 4.6’da sunulmaktadır.



Şekil 4.6. Gizli katmanın özellikleri

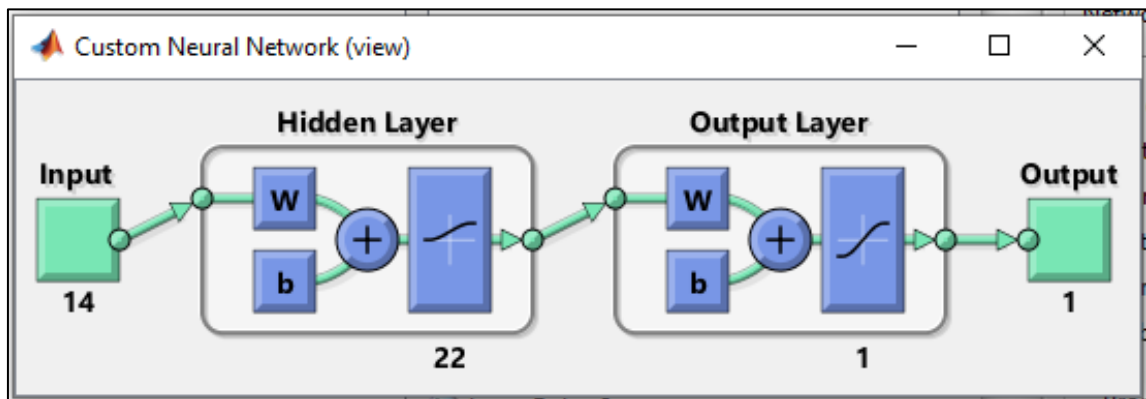
Çıkış katmanında ise çalışmalarda en iyi sonucu verdiği anlaşıldığı için transfer fonksiyonu olarak “tansig” fonksiyonu, eğitim fonksiyonu olarak “trainlm” fonksiyonu, uyarlama öğrenme fonksiyonu olarak “LearnGDM” fonksiyonu tercih edilmiştir.

Her iki katmanda da ağın performansının değerlendirilmesi için “MSE (Ortalama Kare Hatası)” fonksiyonu esas alınmıştır. Geliştirilen YSA yapısının çıkış katmanının özellikleri Şekil 4.7’de belirtilmektedir.



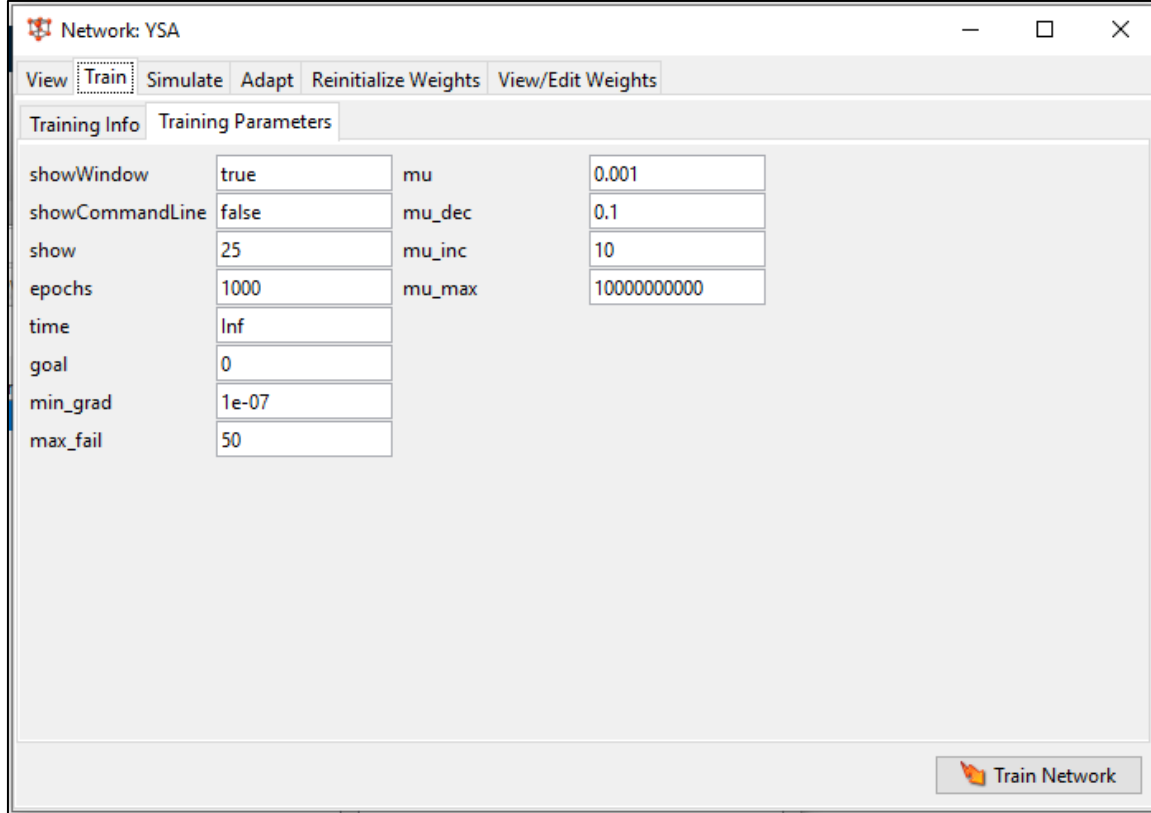
Şekil 4.7. Çıkış katmanının özellikleri

YSA modelinin çok katmanlı bütünlük yapısı ise Şekil 4.8’de sunulmaktadır.



Şekil 4.8. YSA blok diyagramı

Her bir örnek ağı 50 kez gösterilecek şekilde iterasyon sayısı belirlenmiş, eğitimin durdurulması için ihtiyaç duyulan hata oranı katsayısı 0.001 olarak kabul edilmiştir. Öğrenme katsayısını belirleyebilmek için belirli bir yöntem olmadığı için bu çalışmada öğrenme katsayısı seçiminde 0.5-0.9 aralığında denemeler yapılmıştır.

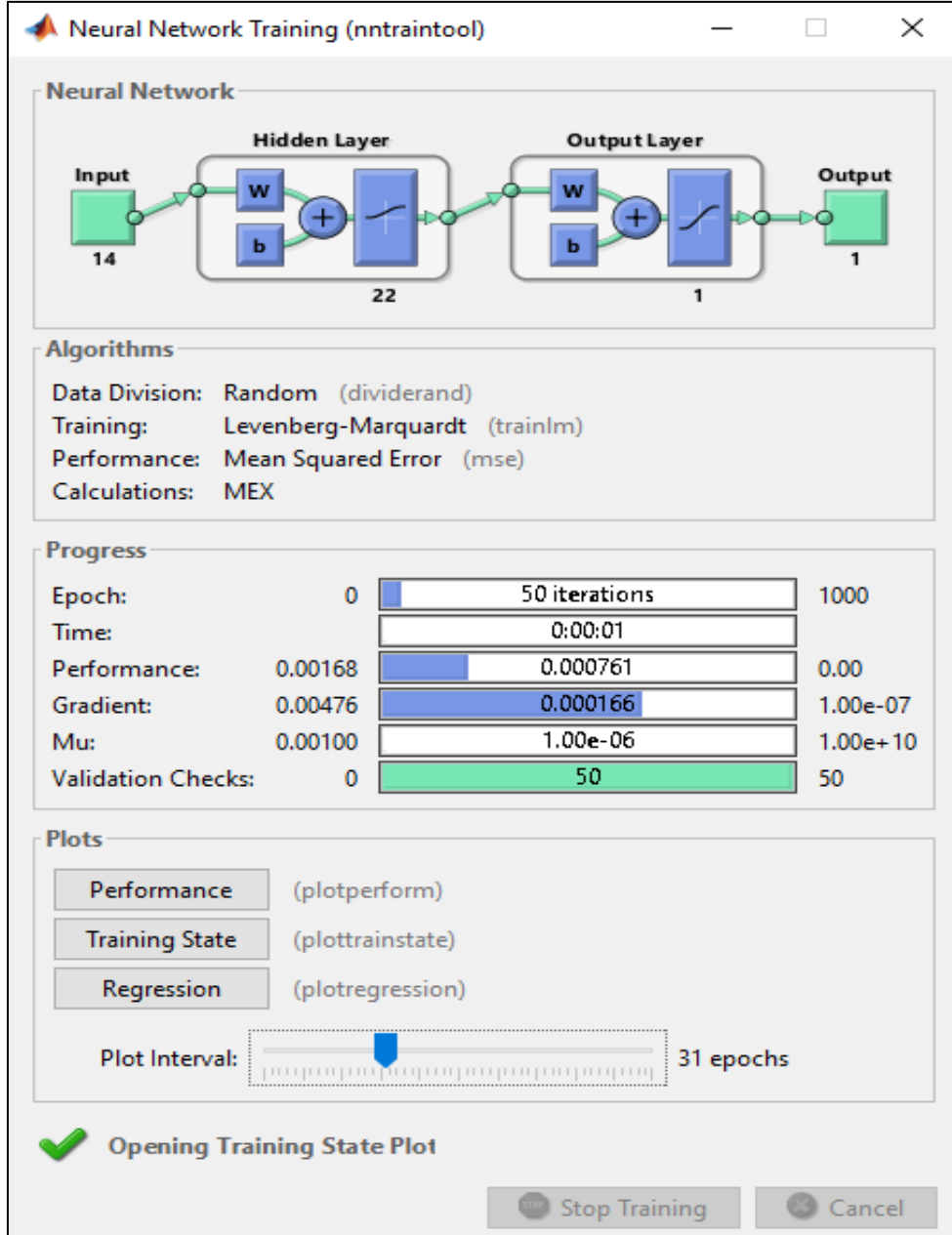


Şekil 4.9. YSA eğitim parametreleri

YSA modelinde maksimum performans değerlerine ulaşmak için deneme yanılma yoluyla belirlenen parametreler Şekil 4.9'da gösterilmektedir.

4.3.6. Eğitim, test ve uygulama

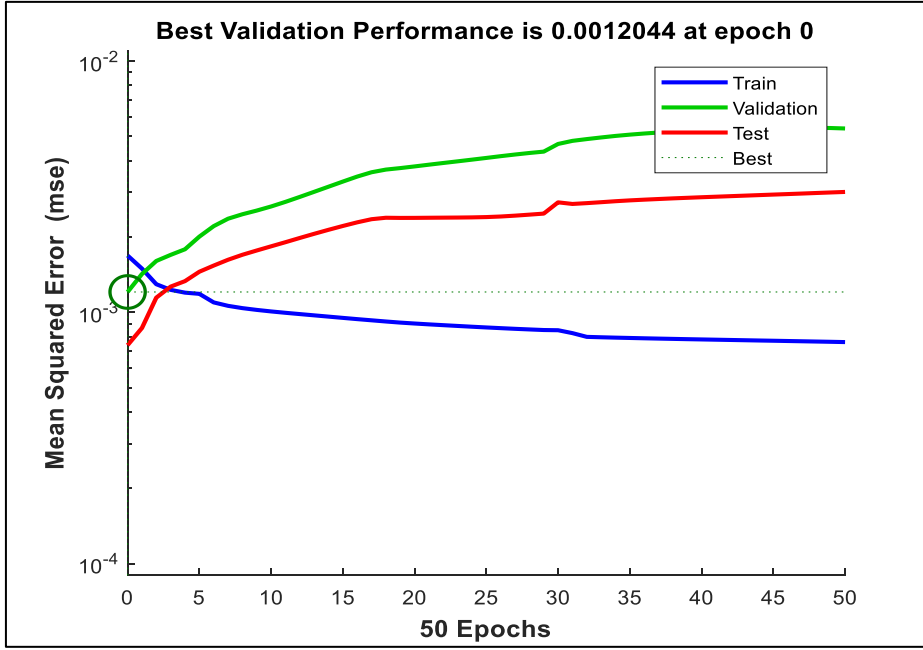
Belirlenen özellikler çerçevesinde YSA modeli oluşturularak en başarılı performansının elde edildiği durum için YSA modeli eğitilerek optimize edilmiştir. YSA eğitim aşamasının tamamlanmasının akabinde ağın öğrenme performansı için testler gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, ağın daha önce hiç görmediği veriler kullanılmış olup testlerin genel durumunu gösteren özellikle Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



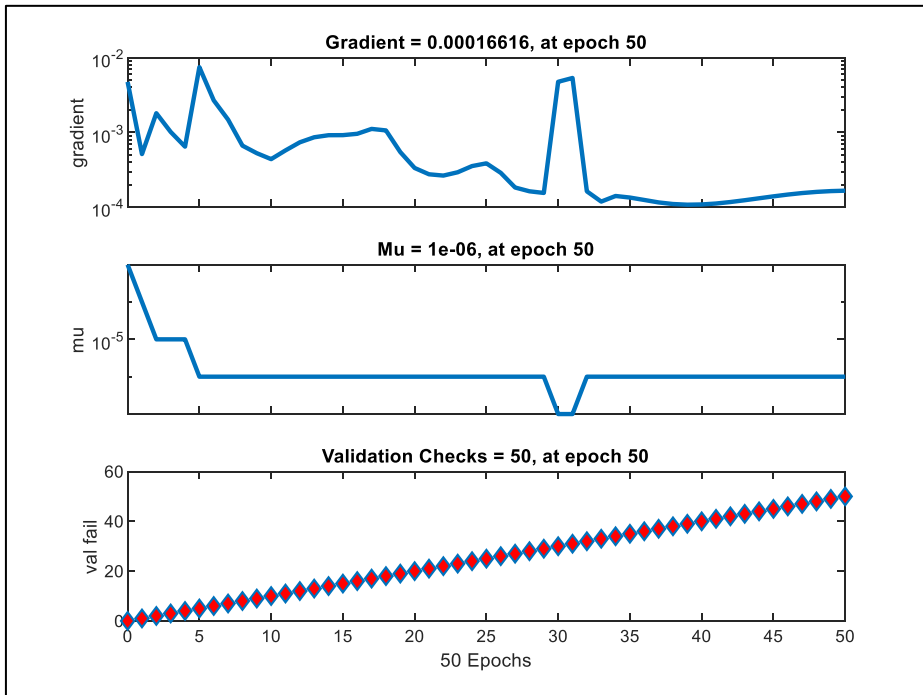
Şekil 4.10. YSA eğitim testi

4.3.7. Bulgular

Bu çalışma sonucunda oluşturulan YSA modelinin başarılı olduğu değerlendirilen durumuna ilişkin ulaşılan sonuçlar Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te sırasıyla gösterilmektedir.



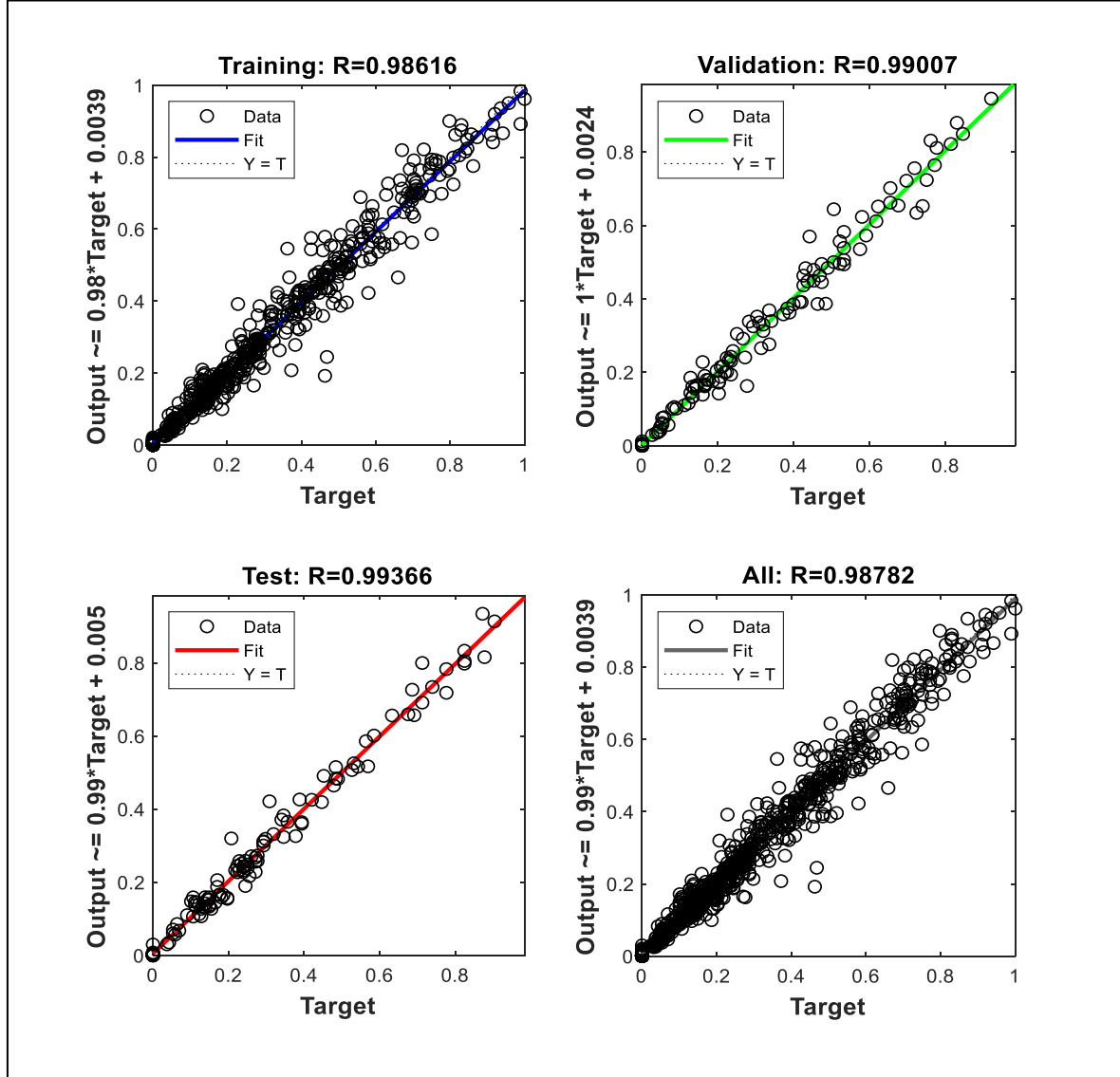
Şekil 4.11. YSA eğitim sonrası performans grafiği



Şekil 4.12. YSA eğitim sonrası performans ölçütlerine göre analiz

Şekil 4.11’de, YSA modelinde kullanılan eğitim, doğrulama ve test verilerinin 50 iterasyon süresince kazandıkları ortalama hata değerleri görülmektedir. Bu sonuçlara göre, YSA’nın eğitim çalışmalarında en iyi seviyeye çok yakın düzeyde başarı sağlanırken test ve doğrulama çalışmalarında bu değerden daha yüksek seviyede başarılar elde edildiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışma sonucunda, mevcut veriler ve esas alınan yöntem, fonksiyonlar, yapı ve parametreler çerçevesinde, modelin eğitim çalışmalarında 0,98616% oranında, test çalışmalarında 0,99366% oranında, tüm çalışmalarda 0,98782% oranında ve validasyonda ise 0,99007% oranında başarı sağlanmıştır.



Şekil 4.13. YSA eğitim regresyon sonuçları

Bu sonuçların elde edilmesinden sonra, gerçek test verileri ile YSA modelinin ürettiği sonuçlar karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmada hata miktarının müsaade edilen limitler dahilinde kalıp kalmadığı irdelenmiştir. Bu doğrultuda oluşturulan çalışmada gerçek test değerlerini, tahmin sonuçlarını ve hata farkını gösteren veriler Çizelge 4.17’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.17. YSA modeli tahmin sonuçları ve hata miktarları

Normalize Edilmiş Gerçek Hata	Tahmin	Gerçek Hata Farkı	Gerçek Hata Farkı (%)
0,7606	0,8309	-0,0703	-9,24
0,0000	0,0063	-0,0063	0,00
0,0000	0,0004	-0,0004	0,00
0,8245	0,833	-0,0085	-1,03
0,9574	0,9503	0,0071	0,75
0,9149	0,8902	0,0247	2,70
0,9415	0,8665	0,0750	7,96
1,0000	0,9618	0,0382	3,82
0,9043	0,9132	-0,0089	-0,99
0,9202	0,9203	-0,0001	-0,01
0,9894	0,9836	0,0058	0,58
0,9202	0,9451	-0,0249	-2,70
0,5745	0,631	-0,0565	-9,84
0,0000	0,0031	-0,0031	0,00
0,0000	0,0001	-0,0001	0,00
0,7021	0,6346	0,0675	9,62
0,6649	0,736	-0,0711	-10,69
0,7394	0,7339	0,0055	0,74
0,7021	0,6937	0,0084	1,20
0,7766	0,7827	-0,0061	-0,79
0,7606	0,7812	-0,0206	-2,70
0,7713	0,7503	0,0210	2,72
0,8457	0,8489	-0,0032	-0,37
0,7713	0,7879	-0,0166	-2,16
0,5000	0,4684	0,0316	6,32
0,0000	0,0008	-0,0008	0,00
0,0000	0	0,0000	0,00
0,4362	0,47	-0,0338	-7,76
0,4947	0,4444	0,0503	10,16
0,5904	0,5657	0,0247	4,19
0,5266	0,4958	0,0308	5,85
0,4574	0,4646	-0,0072	-1,56
0,5798	0,5886	-0,0088	-1,52
0,5426	0,534	0,0086	1,58
0,4894	0,4826	0,0068	1,38
0,5798	0,5501	0,0297	5,12
0,3883	0,3897	-0,0014	-0,36
0,0000	0,0001	-0,0001	0,00
0,0000	0	0,0000	0,00
0,3936	0,3918	0,0018	0,46

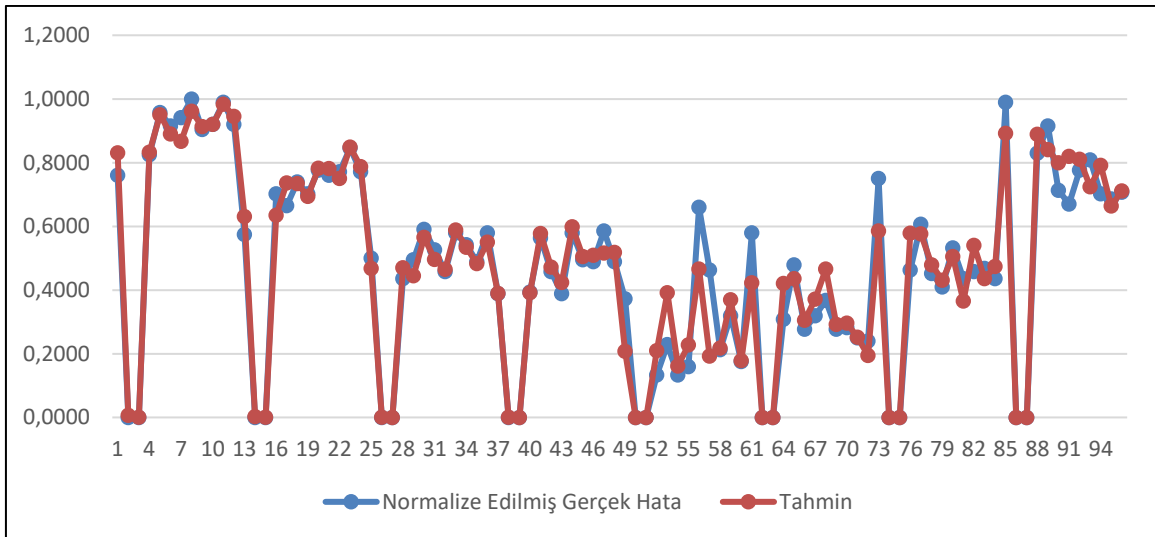
Çizelge 4.17. (devam) YSA modeli tahmin sonuçları ve hata miktarları

0,5638	0,5773	-0,0135	-2,39
0,4574	0,4718	-0,0144	-3,14
0,3883	0,4233	-0,0350	-9,01
0,5798	0,5981	-0,0183	-3,16
0,4947	0,5047	-0,0100	-2,03
0,4894	0,5095	-0,0201	-4,12
0,5851	0,516	0,0691	11,81
0,4894	0,5183	-0,0289	-5,91
0,3723	0,2076	0,1647	44,24
0,0000	0	0,0000	0,00
0,0000	0	0,0000	0,00
0,1330	0,2095	-0,0765	-57,54
0,2287	0,3918	-0,1631	-71,30
0,1330	0,1612	-0,0282	-21,22
0,1596	0,2279	-0,0683	-42,82
0,6596	0,4656	0,1940	29,41
0,4628	0,1922	0,2706	58,47
0,2128	0,2174	-0,0046	-2,18
0,3191	0,3698	-0,0507	-15,87
0,1755	0,1789	-0,0034	-1,92
0,5798	0,4225	0,1573	27,13
0,0000	0	0,0000	0,00
0,0000	0	0,0000	0,00
0,3085	0,4212	-0,1127	-36,53
0,4787	0,4355	0,0432	9,03
0,2766	0,3056	-0,0290	-10,49
0,3191	0,3716	-0,0525	-16,43
0,3670	0,4659	-0,0989	-26,94
0,2766	0,2918	-0,0152	-5,50
0,2819	0,2959	-0,0140	-4,96
0,2500	0,2523	-0,0023	-0,92
0,2394	0,1948	0,0446	18,62
0,7500	0,5859	0,1641	21,88
0,0000	0	0,0000	0,00
0,0000	0	0,0000	0,00
0,4628	0,5788	-0,1160	-25,07
0,6064	0,5762	0,0302	4,98
0,4521	0,4789	-0,0268	-5,92
0,4096	0,4306	-0,0210	-5,13
0,5319	0,5055	0,0264	4,97
0,4362	0,3656	0,0706	16,18
0,4574	0,5408	-0,0834	-18,22
0,4681	0,4358	0,0323	6,90

Çizelge 4.17. (devam) YSA modeli tahmin sonuçları ve hata miktarları

0,4362	0,4738	-0,0376	-8,63
0,9894	0,8923	0,0971	9,81
0,0000	0	0,0000	0,00
0,0000	0	0,0000	0,00
0,8298	0,8895	-0,0597	-7,20
0,9149	0,8412	0,0737	8,05
0,7128	0,7995	-0,0867	-12,17
0,6702	0,8196	-0,1494	-22,29
0,7766	0,811	-0,0344	-4,43
0,8085	0,7244	0,0841	10,40
0,7021	0,7913	-0,0892	-12,70
0,6862	0,6637	0,0225	3,27
0,7074	0,7109	-0,0035	-0,49

Bu verilerin bir grafik üzerinden incelenebilmesi için gerçek ve tahmin değerlerinin uyumu Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Bu grafik incelendiğinde, YSA tarafından yapılan hata tahminlerinin genel başarı durumunun oldukça iyi olduğu anlaşılmaya rağmen bazı durumlar için elde edilen tahminlerin tutarlılığının daha zayıf olduğu görülmektedir. Bu durumun, YSA eğitilmesi için kullanılan 8 adet sayaca ait verinin azlığından ve ayrıca sayaç çeşitliliğinin tam olarak sağlanamamasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 4.14. YSA gerçek test verileri ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

Sonuç olarak; Çizelge 4.17'de sunulan veriler MAPE, R^2 , RMSE ve cov performans ölçüm yöntemlerine göre irdelenmiş olup hesaplanan değerler Çizelge 4.18'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.18. YSA performans ölçüm sonuçları

	12 gizli nöronlu, logsig ve tansig fonksiyonlu model sonuçları	22 gizli nöronlu, logsig ve purelin fonksiyonlu model sonuçları	22 gizli nöronlu, logsig ve tansig fonksiyonlu model sonuçları	25 gizli nöronlu, logsig ve purelin fonksiyonlu model sonuçları
R2:	0,926119272	0,921556157	0,9526827	0,915302136
RMSE:	0,080575228	0,083026244	0,064483104	0,086272461
cov:	16,99651368	17,51353019	13,60204609	18,19828632
MAPE:	0,125829036	0,136487062	0,090484174	0,139312023

Test sonuçlarının başarılı sayılabilmesi için R^2 değerinin büyük, RMSE, cov ve MAPE değerinin ise oldukça küçük olması beklenir (Can ve Şahin, 2021). Bu çerçevede, ölçüm hatası tahmini yapmak üzere geliştirilen YSA modeli için en uygun nöron sayısını bulabilmek amacıyla girdi nöron sayısının (14 adet) iki katına kadar (28 nöron) olacak şekilde YSA eğitilerek hata tahminleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar R^2 , RMSE, cov ve MAPE performans ölçütleri üzerinden değerlendirilmiştir (Bkz. Çizelge 4.16). Bu değerlendirme neticesinde, 1 ve 22 nöronlu tek katmanlı bir YSA modelinin en başarılı sonuçları üretebileceği anlaşılmış ve bu nedenle çalışmalar 22 nöronlu bir model üzerinde yoğunlaştırılmıştır.

Daha sonra, tek katmanlı bir modelden ziyade gizli katmanı olan bir YSA modelinin daha başarılı sonuçlar üretebileceği düşünülerek mevcut YSA modeli 22 nöronlu en başarılı sonuca yakın R^2 , RMSE, cov ve MAPE değerleri olan 12 ve 25 nöronlu yapıları da kapsayacak şekilde farklı öğrenme fonksiyonlarıyla birlikte genişletilmiştir. Bu genişletme çalışması sonuçları Çizelge 4.18’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.18’deki performans ölçüm sonuçları incelendiğinde, en büyük R^2 değerinin (0,9526827) ve en küçük RMSE (0,064483104), cov (13,60204609) ve MAPE (0,090484174) değerinin bir bütün olarak 22 nöronlu, birinci katmanında logsig fonksiyonu, ikinci katmanında ise tansig aktivasyon fonksiyonu kullanılarak yapılan eğitimler ve testlerde elde edildiği görülmektedir.

Bu nedenle, YSA modelimiz 14 girdisi, 22 gizli nöronu ve 1 adet çıktısı olacak şekilde birinci katmanında logsig fonksiyonu, ikinci katmanında ise tansig aktivasyon fonksiyonu kullanılarak LM öğrenme aktivasyonu ile eğitilmiştir. Her iki katmandaki belirlenen ağların performansının değerlendirilmesi çalışmasında “MSE (Ortalama Kare Hatası)” fonksiyonu ölçüt olarak esas alınmıştır.

Bu YSA yapısında, iterasyon sayısı 50 kez gösterilecek şekilde ve hata oranı katsayısı 0.001 olarak belirlenmiş olup öğrenme katsayısı 0.5-0.9 aralığında seçilmiştir. Bu seçimler sonrasında gerçekleştirilen YSA eğitiminde 0,98616% tüm çalışmalarda ise 0,98782% oranında başarılı sonuçlar alınmıştır. Tez kapsamında yapılan bu çalışmalarda elde edilen sonuçların kabul edilebilir ve anlamlı sonuçlar olduğu değerlendirilmiş olup bu sebeple, sonuçların kabul edilebilir uygun aralıklarda olduğu düşünülerek çalışma bu aşamada sonlandırılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumunun yayımladığı 2023 yılı eylül ayı elektrik piyasası aylık sektör raporuna göre ülkemizde yaklaşık 50 milyon elektrik sayacı abonesi bulunmaktadır (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2023). Dolayısıyla, sayaç ölçümleri için yasal olarak izin verilen hata miktarları düşük gibi görünse bile milyonları bulan elektrik sayacı dikkate alındığında, etkin olarak kullanılmayan ve sisteme ilave enerji yük talepleri olarak gelen hataların gerek aboneler gerek dağıtım şirketleri ve gerekse de elektrik enerjisi üreticileri ile birlikte denetleyici ve düzenleyici otoritelerin yaptığı işlemler üzerinde büyük etkiye ve öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Bu nedenle, sayaç ölçüm hatasının sayacın piyasaya arz işlemi öncesinde yapılacak birtakım geliştirmelerle minimum seviyelere indirilmesi, sayacın kullanılacak bölgenin iklim koşullarına ve yük durumlarına göre tasarlanması kısıtlı kaynakların verimli kullanılması açısından oldukça elzem bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Zira, yapılan çalışmalara göre, elektrik sayacının ölçüm hatasını etkileyen en temel hususların; küçük değerdeki güç faktörü miktarı, harmonik bozulma oranları, ölçülen parametrelerin düşük oranlarda bulunması ve elektronik elektrik sayacının gücünü belirlemek için kullanılan hesaplama yöntemlerinin ve dizaynındaki değişikliklerin olabileceği değerlendirilmiştir (Günay, 2019).

Bu bağlamda, tez çalışmasında; ilk olarak elektrik sayacının çalışması sırasında oluşan ölçüm hatasına etki eden değişken faktörlerin neler olduğu, bileşik maksimumu hatayı nasıl etkilediği ve hata tahmini için hangi yöntemlerin kullanılabileceğine ilişkin literatür taraması yapılmıştır. Sonrasında; akım, gerilim, frekans, sıcaklık, harmonik bozulma oranı, aktif ve reaktif güç tüketimi ve sayaç sabitesi gibi belirli parametrelerin değişimlerinin elektrik sayacının çalışması sırasında oluşan bileşik maksimum hata miktarına etkilerini incelemek üzere minimum akımı 0,25 A, referans akımı 5 A, geçiş akımı 0,25 A ve maksimum akımı 100 A, sayaç sabitesi 20000imp/kWh, çalışma gerilimi 3*230/400V ve çalışma frekansı 50 Hz olan 3 fazlı 3 adet farklı marka ve modelde yer alan B sınıfı aktif elektrik sayacının(kombi tip elektrik sayacında yer alan aktif enerjiyi ölçen B sınıfı sayaç verileri esas alınmıştır) gerçek verileri incelenmiştir.

Bu tez kapsamında, gerçek tip test verileri esas alınan sayacın sinüzoidal dalga formuna sahip yükler ile beslenen bir devrede diğer bir ifadeyle normal çalışma şartlarını bozan faktörlerin etkisi olmayan bir dağıtım sisteminde kullanıldığı varsayılmıştır.

Söz konusu incelemelerde, ticari haklarının korunması amacıyla tezde 3 adet farklı B sınıfı sayaç, A, B ve C marka olarak tanımlanmıştır. Bu incelemede, kombi tip elektrik sayacının piyasaya arzı için düzenlenmesi gereken Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının kayıtlarındaki ulusal tip onaylarında yer alan deney raporları esas alınmıştır. Sonrasında, tip onaylarına esas teşkil eden metrolojik fonksiyonlar için belirlenmiş tip testleri araştırılmıştır.

Bu araştırma sonucunda, bileşik maksimumu hatanın hesaplanmasına esas teşkil eden testlerin gerek OIML R46-1/-2 rehber dokümanında gerekse de TS EN 50470-3 standardında benzer olarak akım, gerilim, sıcaklık ve frekans değişim testleri olarak yer aldığı görülürken OIML R46 dokümanında önerilen alternatif bir hesaplama yöntemine göre bileşik maksimum hataya bu değişkenlerin haricinde harmonik ve sayaç kararsızlık değişimlerinin de etki ettiğinin belirtildiği anlaşılmıştır.

Bu bilgiler ışığında, hem OIML R46-1/-2 dokümanında hem de TS EN 50470-3, TS EN 50470-1 ve ayrıca TS EN 62052-11 standartlarında yer alan akım, gerilim, frekans ve sıcaklık testlerinin teknik uygulama prosedürleri incelenerek tezin üçüncü bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Daha sonra, A, B ve C marka B sınıfı sayaca ait gerçek ölçüm hata miktarları kullanılarak 1; 0,5 ve 0,8 güç faktörleri için ayrı ayrı olmak üzere 5A referans akımda, 30 °C referans sıcaklıkta ve sonrasında bütüncül bir bakışla tüm sıcaklık ve akım değerlerinde karşılaştırmalı grafikler üzerinden incelemeler yapılmıştır.

Bu bağlamda, öncelikle 30 °C referans sıcaklıktaki ölçüm hataları incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, B ve C marka sayaç için en fazla ölçüm hatasının genellikle 0,5 güç faktöründe maksimum ve minimum akım değerlerinde ortaya çıktığı, minimum ölçüm hatasının ise 1,0 güç faktöründe ve 5A referans akım değerinde meydana geldiği anlaşılmıştır. Ayrıca, C marka sayaç için en fazla ölçüm hatasının 5 A referans akım değerinde B ve C marka sayacının ölçüm hatasının yaklaşık 2 katı seviyesinde olacak şekilde, en az hatanın ise minimum ve maksimum akım değerlerinde olduğu görülmüştür.

30 °C referans sıcaklık için BMH/MİH oranı grafikleri incelendiğinde ise, 0,5 0,8 ve 1,0 güç faktörlerinde gerçek bileşik maksimum hatanın yasal olarak izin verilen hataya oranının A ve B sayacı için yaklaşık 35% seviyesinin, C marka sayaç için ise yaklaşık 61% seviyesinin altında kaldığı görülmüştür. Bu nedenle, A, B ve C marka sayaç için BMH/MİH oranının kabul edilebilir bir sınır olan 70% seviyesinin altında kalarak başarılı bir performans sergilediği anlaşılmıştır.

Bir sonraki aşamada, 5 A referans akımda ölçüm hataları incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda; A, B ve C marka sayaç için maksimum ve minimum sıcaklık bölgelerine yaklaşıldığında 0,5-0,8 ve 1,0 güç faktörlerinde gerçek bileşik maksimum hatanın en yüksek seviyelere ulaştığı görülmüştür. Benzer şekilde, söz konusu sayaçların tamamında, referans sıcaklığına yakın sıcaklık (25°C civarı) değerlerinde ise ölçüm hatasının minimum seviyelerde seyrettiği anlaşılmıştır. Ayrıca, tüm sıcaklık değerlerinde, A ve B marka sayacın BMH miktarının C marka sayacının BMH miktarına göre daha az olduğu, C marka sayacın daha yüksek ölçüm hatası ile daha kararsız bir çalışma sergilediği görülmüştür. Bu verilere göre, özellikle C marka sayacın sıcaklığa göre ölçüm hatasının hızlı değişkenliği nedeniyle çok sıcak ve çok soğuk iklime sahip bölgelerde kullanılmasının pek uygun olmayacağı değerlendirilmiştir. Dolayısıyla, elektrik dağıtım şirketlerinin aboneleri için kullanıma sundukları elektrik sayacının bu davranışını dikkate alarak bölgesel olarak sayaç tercihi yapmasında fayda olduğu düşünülmektedir.

5 A referans akım için BMH/MİH oranı grafikleri incelendiğinde ise; 0,5 0,8 ve 1,0 güç faktörlerinde gerçek bileşik maksimum hatanın yasal olarak izin verilen hataya oranının A ve B sayaç için yaklaşık 35% seviyesinin, C marka sayaç için ise yaklaşık 61% seviyesinin altında kaldığı görülmüştür. Bu nedenle, A, B ve C marka sayaç için BMH/MİH oranının kabul edilebilir bir sınır olan 70% seviyesinin altında kaldığı anlaşılmıştır. Ayrıca, en kötü durumun 0,5 güç faktöründeki çalışma şartlarında C marka sayaç verilerinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

Sıcaklık ve akımın “x” ekseninde birlikte değiştiği grafikler üzerindeki bütüncül inceleme sonucunda ise; A, B ve C marka sayaç için tüm güç faktörlerinde maksimum ve minimum sıcaklık bölgelerine doğru gidildikçe ölçüm hatasının hızlı bir şekilde arttığı, nominal çalışma sıcaklığına ve nominal akımlara doğru yaklaşıldığında ise ölçüm hatasının minimum seviyelere indiği görülmüştür. Ayrıca, A, B ve C marka sayaç için genel olarak en kararlı

çalışma durumlarının sırasıyla 1,0; 0,8 ve 0,5 güç faktörlerinde olduğu belirlenmiştir. Minimum ölçüm hatasının ise referans akım değerinde gerçekleştiği anlaşılmıştır. Dolayısıyla; A, B ve C marka sayacın ölçüm hatalarının yasal olarak izin verilen hata değerlerinin içinde kaldığı görülmüştür.

Tüm bu incelemeler sonucunda, imalatçı firmalar tarafından özellikle minimum ve maksimum akım değerlerine yakın devre akımı kullanılan sistemlerde ve ayrıca minimum ve maksimum sıcaklık bölgelerinde sayacın daha az ölçüm hatası ile daha kararlı bir şekilde çalışmasına yönelik tasarım ve üretim iyileştirmelerinin yapılmasında; düzenleyici kamu otoriteleri tarafından piyasaya arz aşamasındaki ilgili mevzuatta yer alan MİH değerlerinin elektrik sayacının her bir sıcaklık ve akımda daha az ölçüm hatası ile çalışmasına yönelik olarak güncelleme yapılmasında fayda olduğu değerlendirilmektedir.

Diğer taraftan, aktif elektrik sayacının kullanıma sunulmasından sonra her 10 yılda bir periyodik muayenesinin⁴ yaptırılması gerekmektedir (Elektrik, Su ve Gaz Sayaçları Muayene Yönetmeliği [ESGSMY], 2023: Madde 8). Kullanıma sunulmuş elektrik sayacının periyodik muayenesinde piyasaya arz aşamasında belirlenen MİH değeri kadar hata değerine, şikâyet muayenesinde ise bu değer 2 katına kadar hataya müsaade edilmektedir (ESGSMY, 2023: Madde 6). Ayrıca, elektrik sayacının kullanım sırasında bulunduğu bölgenin sıcaklık, basınç, nem gibi iklim şartlarından ve ayrıca enerji sistemindeki dengesiz yüklerden dolayı oluşan harmonik bozulmalardan da etkilendiği hususları birlikte dikkate alındığında elektrik sayacının doğruluk testlerinin yenilenmesi için belirlenen 10 yıllık periyodik muayene süresinin uzun bir aralık olduğu görülmektedir. Zira, elektronik malzemeler için ürün yaşam süresinin uzun bir süre olmadığı hususu göz önünde bulundurulduğunda, 10 yıllık periyodik muayene süresi içerisinde elektrik sayacının ölçüm performansında önemli derecede azalma olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, elektrik sayacının periyodik muayene süresinin daha makul bir aralığa çekilmesinde (örneğin 5 veya 8 yıl gibi) ve/veya dağıtım şirketleri tarafından daha kısa periyotlarla elektrik sayacının kalibrasyonunun yaptırılmasında fayda olduğu değerlendirilmektedir.

⁴ 3516 sayılı Ölçüler ve Ayar Kanunu kapsamında yer alan ölçü aletlerine yönelik olarak belirli zaman aralıklarında gerçekleştirilmesi gereken genel bir muayene türüdür (ÖAK, 1989: Madde 9).

Bu incelemeler sonrasında, literatürde yer alan çalışmalar da incelenerek söz konusu testlerin haricinde elektrik sayacına kararsızlık hatası, harmonik hatası, sayaç sabitesi, kısa süreli aşırı akım hatası ile akım ve gerilim için güç tüketim hatası gibi parametrelerin de etkisinin olduğu belirlenmiştir. Sonrasında ise bu etki seviyelerini ölçmek amacıyla önce korelasyon sonrasında regresyon analizi çalışması yapılarak etkileri seviyeleri irdelenmiştir.

Korelasyon analizi çalışması için Excel Solver ve Stata programları kullanılmıştır. Korelasyon analizi için girdi verileri, BMH hesaplanmasına etki edecek tüm değişkenler açısından incelenecek şekilde derlenmiştir. Bu derleme sonucunda elde edilen veri kümesi Solver programı ile analiz edilmiştir.

Bu analiz sonucunda; akım, gerilim, frekans, sıcaklık ve güç faktörlerinin elektrik sayacının bileşik maksimum hataya etkisi dışında, özellikle sayaç sabitesi, harmonik hatası, kısa süreli aşırı akım hatası ve aktif ve reaktif güç tüketim oranlarının da ölçüm hatasına önemli seviyelerde etkisinin olduğu anlaşılmış ancak, bu değişkenler ile bileşik maksimum hata miktarı arasında doğrusal bir ilişkinin varlığından söz edilemeyeceği kanaatine ulaşılmıştır.

Bu nedenle, BMH'ye etki edebilecek değişken parametreler kullanılmak suretiyle doğrusal olmayan ilişkileri de gözlemleyebilmek ve akabinde belirli sıcaklık, akım ve güç faktörlerinde hata tahmini yapabilmek için Matlab programı kullanılarak uygun bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Bu YSA modelinde, her bir sayaç verisi 1; 05 ve 0,8 güç faktörlerinde, -40°C'den +70°C kadar 8 farklı sıcaklık değerinde, her bir farklı model ve sınıftaki sayaç için minimum akım, maksimum akım, çalışma akımı, geçiş akımı, referans akım, bileşke harmonik hata, tek harmonik hata, (W) cinsinden güç tüketim değeri, (VA) cinsinden güç tüketimi değeri ve MİH değeri değişkenleri girdi parametresi olarak, BMH miktarı ise çıkış parametresi olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, bir sayaç için 96*14 adet veri kümesi oluşturulmuştur.

Bu çerçevede, YSA eğitimi için kullanılacak 8 farklı B ve C sınıf elektrik sayacına ait gerçek veriler 768*14 adet veri kümesinde toplanmış ve YSA modeli bu veri seti ile eğitilmiştir. Eğitim çalışmaları sırasında R^2 , RMSE, cov ve MAPE performans ölçüt değerleri dikkate alınarak gizli katmanlı bir YSA modelinin daha başarılı sonuçlar üretebileceği anlaşılmıştır (Bkz. Çizelge 4.16). Bu çerçevede YSA modeli, 14 girdisi, 22 gizli nöronu ve 1 adet çıktısı

olacak şekilde, birinci katmanında logsig aktivasyon fonksiyonu, ikinci katmanında ise tansig aktivasyon fonksiyonu kullanılarak LM öğrenme aktivasyonu ile eğitilmiştir.

Eğitim çalışmasında elde edilen başarılı sonuçlardan sonra, YSA modeli ile C sınıfı farklı bir sayaç için bileşik maksimum ölçüm hatası tahmini yapılmıştır. Bu çalışma neticesinde üretilen tahmin değerleri üzerinden MAPE, R^2 , RMSE ve cov performans ölçüm yöntemlerine göre minimum hata ve maksimum anlamlılık değerleri dikkate alınarak model optimize edilmiştir. Bu optimizasyon çalışmasında, en büyük R^2 değerine (0,9526827) ve en küçük RMSE (0,064483104), cov (13,60204609) ve MAPE (0,090484174) değerlerine belirlenen parametreler kullanılarak ulaşılmıştır. Bu YSA yapısında, iterasyon sayısı 50 ve hata oranı katsayısı 0.001 olarak belirlenmiş olup öğrenme katsayısı 0.5-0.9 aralığında seçilmiştir.

Bu seçimler sonrasında gerçekleştirilen YSA eğitiminde 0,98616% tüm çalışmalarda ise 0,98782% oranında başarılı sonuçlar alınmıştır. Bu YSA çalışmasında; daha önce gerçek verileri öğretilmemiş C sınıfı bir aktif elektrik sayacı için belirli sıcaklık, akım, frekans ve güç faktörlerindeki durumlarda hata tahmini yapılarak sonuçlar incelenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Daha sonraki çalışmalarda, farklı YSA modelleri ve öğrenme algoritmaları kullanılarak daha başarılı sonuçlara ulaşılabilir. Ayrıca, birçok alanda uygulama imkânı olan Pareto⁵ ilkesi dikkate alınarak, bu doğrultuda daha fazla sayıda farklı veriye ulaşılarak ve ilaveten veri kümesine A ve D sınıfı aktif elektrik sayacı verileri de dahil edilerek YSA çalışmasının etkinliği artırılabilir. Bu çalışmada, veri elde etmedeki zorluklar YSA geliştirme çalışmalarını daha ileri bir seviyeye taşımayı pek mümkün kılmamıştır, ancak mevcut verilerle başarılı sonuçlara ulaşıldığı değerlendirilmektedir.

Öte yandan; bu tez çalışmasının devamı olarak, farklı programların FANN gibi daha zengin yazılım kütüphaneleri kullanılmak suretiyle çalışmalar ilerletilebilir ve ulaşılacak sonuçlar farklı yöntemlerle karşılaştırılarak irdelenebilir. Ayrıca, Genetik Algoritma ve Bulanık

⁵ Literatürde, ilk kez ekonomi uygulamaları için ortaya atılmış bir fikir olup herhangi bir durumun neticesinin 80%’lik kısmının sebeplerin 20%’sinden oluştuğu hipotezini savunmaktadır. Ekonomi dışındaki birçok alanda başarılı bir şekilde uygulama alanı bulduğu belirtilmektedir (Eren, 2021).

Mantık gibi çeşitli yapay zekâ yöntemleri de ayrıca denenebilir ve ulaşılabacak bulgular bu YSA sonuçları ile detaylı olarak kıyaslanabilir.

Diğer taraftan, bu çalışmada elde edilen başarılı YSA sonuçlarının reaktif elektrik sayacının ölçüm hatası üzerinde de etkili olup olmadığı da ayrıca araştırılabilir. Sonrasında kombi tip elektrik sayacının aktif ve reaktif elektrik sayacından gelen toplam ölçüm hatasının analizi ve incelemesi yapılabilir. İlâveten, sayacın imalatı aşamasında oluşan çalışma hatası ile sayacın kullanıldığı ortamındaki basınç, nem ve sıcaklık gibi dışsal diğer faktörlerin ölçüm hatasına etkileri birlikte incelenerek değerlendirilmeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Aggarwal, R. and Ranganathan, P. (2016). Common pitfalls in statistical analysis: The use of correlation techniques. *Perspectives in Clinical Research*, 7(4), 187-190.
- Akbulut, Ö. ve Çapık, C., (2022). Çok Değişkenli İstatistiksel Analizler İçin Örneklem Büyüklüğü. *Journal of Nursology*. 25(2), 111-116.
- Akgül, S. (2023). *Güneş Enerji Santrallerinde İklim Verilerine Göre Performans Tahmini İçin Regresyon Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Amasya.
- Albayrak, A. S. (2008). Değişen Varyans Durumunda En Küçük Kareler Tekniğinin Alternatifi Ağırlıklı Regresyon Analizi ve Bir Uygulama. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(2), 111-134.
- Alpar, R. (2001). *Spor Bilimlerinde Uygulamalı İstatistik*. (2. Baskı). Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 341.
- Aslay, F. ve Özen, Ü. (2013). Meteorolojik parametreler kullanılarak yapay sinir ağları ile toprak sıcaklığının tahmini. *Politeknik Dergisi*, 16(4), 139-145.
- Asuero, A. G., Sayago, A. and Gonzalez, A. G. (2006). The Correlation Coefficient: An Overview. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 36:1, 41-59.
- Ayvaz, E. (2012). *Yapay Sinir Ağları ve Paralel Akışlı Isı Eşanjörlerinde Uygulanması*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bartolomei, L., Cavaliere, D., Mingott, A., Peretto, L. and Tinarelli, R. (2019). *Testing of electrical energy meters in off-nominal frequency conditions*. 10th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Aachen Germany, (1-6).
- Bayyurt, N. (2004). *İşletme Performansı Değerlendirmesinde Kanonik Korelasyon Analizi*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Bernieri, A., Betta, G., Ferrigno, L. and Laracca, M. (2012). *Electrical energy metering in compliance with recent european standards*. 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Graz Austria, 1541-1545.
- Bernieri, A., Ferrigno, L., Laracca, M. and Luongo, C. (2008). *A Discussion about the Effect of the MID Directive on the Calibration of Electrical Energy Meters*. 43rd International Universities Power Engineering Conference, Padua Italy, 1-5.
- Bishara, A. J. and Hittner, J. B. (2017). Confidence intervals for correlations when data are not normal. *Behavior Research Methods(BRM)*. 49(1), 294–309.
- Bureau International des Poids et Mesures. (2021). National Metrology System Developing The Institutional and Legislative Framework, *BIPM*. Paris, France.7-24.

- Büyüköztürk, Ş. (2004). *Sosyal Bilimler İçin Veri Analizi El Kitabı*. (4. Baskı). Ankara: Pegem Yayıncılık, 195.
- Can, N. ve Şahin, A. Ş. (2021). Yapay sinir ağları metodu ile günlük çiğ noktası sıcaklığı tahmini. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11, 1154-1163.
- Cengiz, Ç., Atiç, S., Parlakyıldız, Ş., Palta, O. ve El, E. (2015). *Akıllı Sayaçların Şebeke Entegrasyonu ve Türkiye Uygulaması*. Uluslararası Avrasya Enerji Sorunları Sempozyumu, İzmir, 348-355.
- Cetina, R. Q., Roscoe, A. J. and Wright, P. S. (2017). *A review of electrical metering accuracy standards in the context of dynamic power quality conditions of the grid*. 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Heraklion Greece, 1-5.
- Chicco, D., Warrens, M. J. and Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 5(7), 623.
- Costa, M. M. (2022). *Bidirectional electricity meter metrological evaluation*. 23rd IMEKO TC-4 International Workshop on ADC and DAC Modelling and Testing, Brescia Italy, 12-14.
- Çavuşlu, M. A., Becerikli, Y. ve Karakuzu, C. (2012). Levenberg-Marquardt algoritması ile YSA eğitiminin donanımsal gerçekleşmesi. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 5(1).
- Dizmenler, A. (2023). *Üretim Tesisindeki Günlük Elektrik Enerjisi Tüketiminin Regresyon Analizi ve Yapay Sinir Ağları İle Tahmin Edilmesi ve Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Bakırçay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İzmir.
- Doğan, G. (2010). *Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Türkiye'deki Özel Bir Sigorta Şirketinde Portföy Değerlendirmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Dohnal, J. (2004). *Using of LevenbergMarquardt method in identification by neural networks*. Student EEICT 2004, Brno Czech, 361- 365.
- Duman, H. (2018). *Elektrik Sayaçlarının Kablosuz Algılayıcı Ağ Tabanlı Bir Sistem İle Uzaktan İzlenmesi ve Kontrolü*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Eren, H. (2021). *Pareto Analizi, 80/20 Prensipleri İle Proseslerin İyileştirilmesi ve Azınlığın Çoğunluğa Etkisi Üzerine Bir İşletme Örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Edirne.
- Falhmann, S.E. (1989). An Empirical Study of Learning Speed in Backpropagation Networks. *CMU*, Pennsylvania USA, 126-129.
- Fleming, J.A. (1914). *Magnets and Electric Currents*. New York: Spon & Chamberlain, 335.

- Gogtay, N. J. and Thatte, U. M. (2017). Principles of Correlation analysis. *Journal of the Association of Physicians of India*, 65(3), 78-81.
- Gonçalves, F. A., Canesin, C. A., Pinto, J. O., Galotto, L. and Godoy, R. B. (2009). *Modeling approach based on experimental results for prediction of measurement errors in energy meters*. Brazilian Power Electronics Conference, Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, 1255-1261.
- Göktepe, A.B., Açar, E. ve Lav, A.H. (2005). Esnek Üst Yapılarda Mekanik Özelliklerin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Geri Hesaplanması. *İTÜ Dergisi/D Mühendislik*, 4(2), 31-42.
- Görür, D. (2022). *Demand Forecasting Using Artificial Neural Networks For Power Transformers*. Master of Science, Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University Institute of Graduate School, Adana.
- Graupe, D. (1997). Advanced Series in Circuits and Systems – Vol 3: Principles Of Artificial Neural Networks. *World Scientific Publishing, USA*, 1(2), 235.
- Grimm, L. G., Yarnold, P. R. (2000). *Reading and Understanding More Multivariate Statistics*. (2nd edition). Washington: American Psychological Association, 437.
- Gujarati D. N. and Porter, D. C. (2008). *Temel Ekonometri*. (çev. Ümit Şenesen, Gülay Günlük Şenesen). İstanbul: Literatür Yayınları, 99-9.
- Gutierrez, R. G. (2010). Stata. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(6), 728-733.
- Gülağız, F. K. ve Ekinci, E. (2017). *Farklı Regresyon Analizi Yöntemleri Kullanılarak Ev Fiyatlarının Tahmini*. International Symposium on Industry 4.0 Application, Karabük, 203-207.
- Günay, S. (2019). *Yük Kaynaklı Bozucu Faktörlerin Elektrik Sayaçları Üzerindeki Etkilerinin Tekno-Ekonomik Analizi ve Çözüm Önerileri*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hagan, M. T., Demuth, H. B. and Beale, M. H. (2014). *Neural Network Design*, (2nd Edition). Oklahoma: Martin Hagan, 800.
- Heaton, J. (2007). *Introduction to Neural Networks With Java*. (2nd Edition). Washington: Heaton Research, 308.
- Heaton, J. (2015). *Artificial intelligence for humans, volume 3: Deep learning and neural networks*. North Charleston, SC: Createspace Independent Publishing Platform, 372.
- Iseli E., Schiffmann J. (2021). Prediction Of The Reaction Forces Of Spiral-Groove Gas Journal Bearings By Artificial Neural Network Regression Models. *Journal of Computational Intelligence*, 48, 101-256.

- İnternet: Directive 2014/32/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of measuring instruments (recast). (2014). OJ L96/149.URL:<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0032>, Son Erişim Tarihi: 12.10.2023.
- İnternet: Elektrik, Su ve Gaz Sayaçları Muayene Yönetmeliği. T.C. Resmî Gazete, 32378, (2023). URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2023/11/20231123-2.htm>, Son Erişim Tarihi: 03.01.2024.
- İnternet: Gültekin, F. (2013). Regresyon analizi. Balıkesir Üniversitesi. URL: <http://w3.balikesir.edu.tr/~bsentuna/wp-content/uploads/2013/03/Regresyon-Analizi.pdf>, Son Erişim Tarihi: 30.10.2023.
- İnternet: Ölçü Aletleri Yönetmeliği (2014/32/AB). T.C. Resmî Gazete, 29757, (2016). URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2016/06/20160629-22.htm>, Son Erişim Tarihi: 10.10.2023.
- İnternet: Ölçü ve Ölçü Aletleri Muayene Yönetmeliği. T.C. Resmî Gazete, 22000, (1994). URL:<https://www.resmigazete.gov.tr/arsiv/22000.pdf>, Son Erişim Tarihi: 09.12.2023.
- İnternet: Ölçü ve Ölçü Aletleri Tip Onay Yönetmeliği. T.C. Resmî Gazete, 27027, (2008). URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/10/20081017-14.htm>, Son Erişim Tarihi: 12.10.2023.
- İnternet: Ölçüler ve Ayar Kanunu (Kanun No:3516). T.C. Resmî Gazete, 20056, (1989). URL:<https://www.resmigazete.gov.tr/arsiv/20056.pdf>, Son Erişim Tarihi: 12.10.2023.
- İnternet: Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2017). Ulusal tip onay belgesi. STB, Dijital Bakanlık, Ankara. URL:<https://dijitalbakanlik.sanayi.gov.tr/HizmetDetay?hizmetId=7412AF7D-6459-42E7-8D02-FB221E498724>, Son Erişim Tarihi: 31.10.2023.
- İnternet: Ürün Güvenliği ve Teknik Düzenlemeler Kanunu (Kanun No:7223). T.C. Resmî Gazete, 31066, (2020), URL:<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2020/03/20200312-1.htm>, Son Erişim Tarihi: 12.10.2023.
- J. Zhang, D. Luo, Q. Zhang, B. Zhang, L. and Zhu, H. Wen. (2018). *Evaluation Of Comprehensive Maximum Error of Power Energy Meter Based On OIML Recommendation R46*. 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Changsha, China, 1031-1036.
- Jaiswal, S., Wath, M. G. and Ballal, M. S. (2016). *Modeling the measurement error of energy meter using NARX model*. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Taipei Taiwan, 1-6.
- Kaczmarek, M. (2016). Measurement error of non-sinusoidal electrical power and energy caused by instrument transformers. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(14), 3492-3498.

- Kaftan, İ. (2010). *Batı Türkiye Gravite ve Deprem Katalog Verilerinin Yapay Sinir Ağları İle Değerlendirilmesi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kaya, Ö. (2023). *Bulanık Kümeler İçin Uzaklık ve Benzerlik Ölçülerinin Bazı Matlab Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Khosravi, Z. M. H., Barghinia, S. and Ansarimehr, P. (2006). *New momentum adjustment technique for Levenberg-Marquardt neural network used in short term load forecasting*. 21st International Power System Conference, Tehran Iran, 1782-1788.
- Kılıç, S. (2013). Doğrusal regresyon analizi. *Journal of Mood Disorders*, 3(2), 90-92.
- Koca, Z. (2006). *Üç Fazlı Asenkron Motorların Yapay Sinir Ağları İle Vektör Esaslı Hız Kontrolü*. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Kong, X., Ma, Y., Zhao, X., Li, Y. and Teng, Y. (2019). A recursive least squares method with double-parameter for online estimation of electric meter errors. *Energies*, 12(5), 805.
- Köksal, E. (2011). *Makina Elemanları Konstrüksiyonunda Çentik Faktörünün Yapay Sinir Ağları ile Hesaplanması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Liptak, B.G. (1995). *Instrument Engineers' Handbook: Expert Systems – Neural Networks*. (4th Edition). Boca Raton Florida: CRC Press, 1868.
- Ma, J., Teng, Z., Tang, Q., Qiu, W. and Yang, Y. (2022). Measurement Error Assessment for Smart Electricity Meters Under Extreme Natural Environmental Stresses. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(6), 3905-3914.
- Makowski, D., Ben-Shachar, M. S., Patil, I. and Lüdecke, D. (2020). Methods and algorithms for correlation analysis in R. *The Journal of Open Source Software*, 5(51), 2306.
- Makridakis, S. (1993). Accuracy measures: theoretical and practical concerns. *International Journal of Forecasting*, 9(4), 527–529.
- Mohammadi, K., Shamshirband, S., Motamedi, S., Petković, D., Hashim, R. and Gocic, M. (2015). Extreme learning machine based prediction of daily dew point temperature. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, 214-225.
- Montgomery D. C. and Peck, E. A. (1992). *Introduction to Linear Regression Analysis*. (2nd edition). Canada: John Wiley and Sons Inc, 544.
- Neuralware Handbook. (1996). *Neural Computing: A Technology Handbook for Professional II/PLUS and NeuralWorks Explorer*, (1st edition), Pittsburg, USA, 400.

- Organisation Internationale de Metrologie Legale. (2012). OIML R46-1/-2 Edition 2012(E) Active electrical energy meters. *OIML*. Bucharest Romania, 72.
- Orhunbilge, A. N. (2002). *Uygulamalı Regresyon ve Korelasyon Analizi*. (2. Baskı). İstanbul: İ.Ü. Basım ve Yayınevi Müdürlüğü, 340.
- Öztemel, E. (2020). *Yapay Sinir Ağları, Volume V*. (3. Baskı). İstanbul: Papatya Yayıncılık Eğitim, 232.
- Öztürk, K. ve Şahin, M. E. (2018). Yapay Sinir Ağları ve Yapay Zekâ'ya Genel Bir Bakış. *Takvim-I Vekayi*, 6(2), 25-36.
- Rosa, E. B., Lloyd, M. G. and Reid, C.E. (1905). Influence of Waveform on the Rate of Integrating Induction Watt-meters. *National Bureau of Standarts*, 21(3), 421-434.
- Rumelhart, D.E. and McClelland, J. L. (1986). *Paralel Distributed Prosessing, Explorationsin Microstructure of Cognition*. (2. Edition). Cambridge: MIT Press, 249.
- Sesveren, Ö. (2008). *Yapay Sinir Ağları Temelli Reaktif Güç Kompanzasyonu Eğitim Seti Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sezer, Ö., Daldal, N. ve Yücedağ, İ. (2020). Toplu Konutlarda Reaktif Güç Kompanzasyonunun Uygulanabilirliğinin Analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 702-710.
- Shklyarskiy, Y., Hanzelka, Z. and Skamyin, A. (2020). Experimental study of harmonic influence on electrical energy metering. *Energies*, 13(21), 5536.
- Sırdaş, S., Şen Z. ve Sönmez, İ. (2001). *Sınıflandırma için Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı*. III. Ulusal Hidroloji Kongresi, İzmir, (609-616).
- Şahan, M. ve Okur, Y. (2016). Akdeniz Bölgesine Ait Meteorolojik Veriler Kullanılarak Yapay Sinir Ağları Yardımıyla Güneş Enerjisinin Tahmini. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 11(1), 61-71.
- Şahin, H. (2007). *Elektronik Sayaçlarda Kullanılmak Üzere Uzaktan Gprs Modül İle Elektronik Elektrik Sayacı Okuma Uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Şahin, V., Bilgili, L. ve Vardar, N. (2020). *Yolcu Gemilerinin Atıksularının Denizdeki Seyrelmelerinin Yapay Sinir Ağları İle İncelenmesi*. 5. Ulusal Deniz Turizmi Sempozyumu, İzmir, 8.
- Şahinler, S. (2000). En Küçük Kareler Yöntemi İle Doğrusal Regresyon Modeli Oluşturmanın Temel Prensipleri. *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 5(1-2), 57-73.
- Şencan, A. ve Kalogirou, S. A. (2005). A New Approach Using Artificial Neural Networks For Determination Of The Thermodynamic Properties Of Fluid Couples. *Energy Conversion and Management*, 46(15), 2405-2418.

- T. C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2023). 2023 Yılı Elektrik Piyasası Eylül Ayı Sektör Raporu. *EPDK*. Ankara, 33-70.
- Tacq, J. (1997). *Multivariate Analysis Techniques in Social Science Research*. California: Sage Publication, 432.
- Tasci, M. and Düzkaya, H. (2023). *Investigation of the Effect of Variable Parameters on Comprehensive Maximum Error of Active Electricity Meters by Test Results*. 12th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA, Oshawa Canada, 73-78.
- Thirumalai, C., Chandhini, S. A. and Vaishnavi, M. (2017). *Analysing the concrete compressive strength using Pearson and Spearman*. 2017 International Conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). Coimbatore, India, 215-218.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2007). TS-EN50470-1:2007-Elektrik ölçme donanımı (a.a.)- Bölüm 1: Genel gereklilikler, deneyler ve deney şartları- Ölçme donanımı (sınıf indisleri A, B ve C). *TSE*, Ankara, 61.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2022). TS EN50470-3:2022-Elektrik ölçme donanımı- Bölüm 3: Belirli gerekler-a.a. aktif enerji için elektronik sayaçlar (doğruluk sınıfı A, B ve C olan). *TSE*, Ankara, 32.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2022). TS-EN 62052-11:2021/A11:2022-Elektrik ölçme donanımı- Genel kurallar, deneyler ve deney şartları- Bölüm 11: Sayaç. *TSE*, Ankara. 133.
- Türk, E. ve Kiani, F. (2019). Yapay sinir ağları ile talep tahmini yapma: Beyaz eşya üretim planlama örneği. *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(1), 30-37.
- Uyanık, G. K. ve Güler, N. (2013). A Study on Multiple Linear Regression Analysis. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 106, 234-240.
- Ünsal, A. ve Tunaboşlu, N. S. (2009). Dumlupınar Üniversitesi Merkez Kampüsü Elektrik Enerjisi Kalitesinin Ölçüm Sonuçları. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 13-29.
- Wilamowski, B.M. and Yu, H. (2010). Improved computation for Levenberg–Marquardt training. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 21(6), 930-937.
- Wu, W., Mu, X., Xu, Q., Mu, X., Ji, F., Bao, J. and Ouyang, Z. (2017). Effect of frequency offset on power measurement error in digital input electricity meters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(3), 559-568.
- Xu Y., Fenerci A., Oiseth O. and Moan T. (2020). Efficient prediction of wind and wave induced long-term extreme load effects of floating suspension bridges using artificial neural networks and support vector machines. *Ocean Engineering*, 217, 107888.

- Yamak, R. ve Köseoğlu, M. (2006). *Uygulamalı İstatistik ve Ekonometri (3. Baskı)*. Trabzon: Celepler Matbaacılık, 556.
- Yavuz, B. ve Polat, K. T. (2020). *Yapay sinir ağları ile kalite kontrol: örnek olay çalışması*. Ankara: İKSAD, 114.
- Yazıcıoğlu, İ. (2016). *Electric Conductivity And Resistivity Of Aluminum Alloys For The Application Of Electric Counters*. Master's Thesis, Bahçeşehir University Mechatronic Engineering, İstanbul.
- Yiğit, V. (2011). Genetik Algoritma İle Türkiye Net Elektrik Enerjisi Tüketiminin 2020 Yılına Kadar Tahmini. *International Journal of Engineering Research and Development*, 3(2), 37-41.
- Zhang, W., Ma, J., Duan, J., Li, N., Yi, K. and Teng, Z. (2021). *Performance Evaluation for Smart Electricity Meters Using Machine Learning*. 2nd International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (CECIT), Sanya China, 830-834.
- Zou, K. H., Tuncali, K. and Silverman, S. G. (2003). Correlation and Simple Linear. *Radiology*. 227(3), 617-622.



Gazili olmak ayrıcalıktır