

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



HARMONİK ÜRETEN EV TİPİ YÜKLERİN
YAPAY SİNİR AĞLARI İLE SINIFLANDIRILMASI

DAMLA AĞAÇA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Murat Erhan BALCI (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU
Doç. Dr. Hüseyin GÜNEŞ

BALIKESİR, OCAK – 2025

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Harmonik Üreten Ev Tipi Yüklerin Yapay Sınır Ağları ile Sınıflandırılması**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Damla AĞAÇA

ÖZET

**HARMONİK ÜRETEN EV TİPİ YÜKLERİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE
SINIFLANDIRILMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
DAMLA AĞAÇA
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI)

BALIKESİR, OCAK - 2025

Bu tez kapsamında, kaynak gerilimi harmonik bozulmaya sahip sistemlerde, ev tipi tek fazlı doğrusal olmayan yüklerin sınıflandırılması için yapay sinir ağı (YSA) modelleri geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ev tipi yük olarak, rezistif yük besleyen tam dalga doğrultucu, rezistif yük besleyen yarım dalga doğrultucu, rezistif yük besleyen dimmer devresi, batarya şarj eden tam dalga doğrultucu, daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motor ve ısıtıcı olmak üzere altı farklı yük dikkate alınmıştır.

Buna göre tezde öncelikle, dikkate alınan yüklerin aynı baraya bağlı olduğu bir sistemin zaman tanım bölgesi modeli Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulmuştur. Modellenen sistemde, yüklere ait çeşitli harmonik ve güç kalitesi indislerinin davranışları, rastgele türetilen bozulmuş kaynak gerilimleri altında istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Devamında, çok sayıda bozulmuş kaynak gerilimleri altında yüklerin olası kombinasyonları için ortak bağlantı noktasında ölçülen harmonik ve güç kalitesi indisleri Pearson korelasyon ısı haritası yöntemiyle analiz edilmiştir. Analiz sonucuna göre, yük sınıflandırmasında kullanılmak üzere 15 özellik belirlenmiştir. Böylece, 15 girişi ve 6 çıkışı olan, gizli katman sayısına göre tek ve iki gizli katmanlı olarak ayrılan, gizli katmanlardaki aktivasyon fonksiyonuna göre tanh, sigmoid ve ReLU fonksiyonlu olarak ayrılan, toplamda 6 farklı YSA modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin gizli katman nöron sayıları, çeşitli performans parametreleri dikkate alınarak en iyilenmiştir.

Son olarak, en iyilenen YSA modelleri arasında yapılan karşılaştırmalı değerlendirmeler neticesinde, 2 gizli katmanlı, 1. gizli katmanında 26 ve 2. gizli katmanında 30 nöron olan, gizli katmanlarında tanh ve çıkış katmanında sigmoid aktivasyon fonksiyonları kullanılan YSA modelinin, %94.11 eğitim doğruluğu ve %93.56 test doğruluğuyla en yüksek performansı gösterdiği belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Harmonikler, yapay sinir ağları, harmonik yük tipi sınıflandırma, harmonik yük tanıma
Bilim Kod / Kodları : 93414, 93437

Sayfa Sayısı : 97

ABSTRACT

CLASSIFICATION OF HARMONIC-PRODUCING RESIDENTIAL TYPE LOADS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

MSC THESIS

DAMLA AĞAÇA

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

(SUPERVISOR: PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI)

BALIKESİR, JANUARY - 2025

In this thesis, it is aimed to develop artificial neural network (ANN) models for the classification of residential type single-phase nonlinear loads in the system with harmonically distorted source voltage. As residential type loads, six different loads were considered, namely: a full-wave rectifier feeding a resistive load, a half-wave rectifier feeding a resistive load, a dimmer circuit feeding a resistive load, a full-wave rectifier charging a battery, a single-phase asynchronous motor with a permanent capacitor, and a heater.

Accordingly, in this thesis, the time-domain model of a system with the considered loads connected to the same bus was first created in the Matlab/SIMULINK environment. In the modelled system, the behaviours of various harmonic and power quality indices of the loads were statistically analysed under randomly generated distorted source voltages.

Then, the harmonic and power quality indices measured at the common connection point for possible load combinations under a large number of distorted source voltages were analysed using the Pearson correlation heat map method. Based on the analysis results, 15 features were identified for use in load classification. Thus, a total of 6 different ANN models, each with 15 inputs and 6 outputs, were developed. Note that depending on the number of hidden layers, the models can be divided to single-layer and double-layer models and based on the activation function in the hidden layers, they can be divided to the models with tanh, sigmoid, or ReLU functions. The number of neurons in the hidden layers of the developed models was optimized by considering several performance parameters.

Finally, as a result of the comparative evaluations among the optimized ANN models, it was determined that the ANN model with 2 hidden layers, 26 neurons in the first hidden layer and 30 neurons in the second hidden layer, using tanh activation functions in the hidden layers and sigmoid activation functions in the output layer, showed the highest performance with 94.11% training accuracy and 93.56% test accuracy.

KEYWORDS: Harmonics, artificial neural networks, harmonic load type classification, harmonic load identification

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Arka Plan	2
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı	5
1.3 Tezin Sınırları	6
1.4 Tezin İçeriği	7
2. TEST SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE HARMONİK ANALİZİ	9
2.1 Sistem Modeli	9
2.2 Analizlerde Dikkate Alınan İndisler	12
2.3 Sinüzoidal Gerilim Altında Yüklerin Analizi	13
2.4 Bozulmuş Gerilimler Altında Yüklerin Analizi	16
2.5 Sonuç.....	27
3. YAPAY SINIR AĞI TEMELLİ SINIFLANDIRMA MODELLERİ İÇİN ÖZELLİK SEÇİMİ VE VERİ ÖNİŞLEME ADIMLARI	29
3.1 Veri Setinin Tanıtımı	29
3.2 Özellik Seçim Yöntemi ve Elde Edilen Anlamli Özellikler	30
3.3 Veri Önışleme Adımları.....	36
3.4 Sonuç.....	37
4. TEZ KAPSAMINDA DİKKATE ALINAN YSA MODELLERİ, EĞİTİM VE TEST AŞAMALARI	38
4.1 YSA Modelleri Hakkında Genel Bilgi.....	38
4.2 Tez Kapsamında Önerilen YSA Modelleri	40
4.3 Önerilen YSA Modellerinin Eğitim Yöntemi	42
4.4 Önerilen YSA Modellerinin Test Yöntemi	44
4.5 Sonuç.....	46
5. ÖNERİLEN YSA MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ	48
5.1 Tip 1 Sınıfı YSA Modelleri için En İyi Nöron Sayısının Belirlenmesi	48
5.1.1 Tip 1-1 YSA Modeli	49
5.1.2 Tip 1-2 YSA Modeli	53
5.1.3 Tip 1-3 YSA Modeli	58
5.1.4 Gizli Katman Nöron Sayısı En İyilenen Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA Modellerinin Performanslarının Karşılaştırmalı Analizi	62
5.2 Tip 2 Sınıfı YSA Modelleri için En İyi Nöron Sayısının Belirlenmesi.....	65
5.2.1 Tip 2-1 YSA Modeli	65

5.2.2 Tip 2-2 YSA Modeli	70
5.2.3 Tip 2-3 YSA Modeli	74
5.2.4 Gizli Katman Nöron Sayısı En İyilenen Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA Modellerinin Performanslarının Karşılaştırmalı Analizi	78
5.3 Sonuç.....	81
6. GENEL SONUÇ VE TARTIŞMA	84
7. KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	97

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Analiz sisteminin şematiği.....	10
Şekil 2.2: Analiz sisteminin SIMULINK ortamında modeli.	11
Şekil 2.3: Tek fazlı asenkron motora ait konfigürasyon.	11
Şekil 2.4: Tek fazlı asenkron motora ait model parametreleri.....	12
Şekil 2.5: (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için sinüzoidal besleme gerilimi altında akım dalga şekilleri.	14
Şekil 2.6: (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3 ve (d) Yük 4 için sinüzoidal besleme gerilimi altında akım harmonik spektrumları.....	15
Şekil 2.7: Analiz sisteminde uygulanan 1000 adet bozulmuş kaynak geriliminin THDV histogramı.	17
Şekil 2.8: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6'ya ait akımların THDI histogramları.	18
Şekil 2.9: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 akımlarının I_2/I_1 histogramları.	19
Şekil 2.10: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 akımlarının I_3/I_1 histogramları.	20
Şekil 2.11: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 akımlarının I_4/I_1 histogramları.	21
Şekil 2.12: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 akımlarının I_5/I_1 histogramları.	22
Şekil 2.13: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 akımlarının CFI histogramları.	23
Şekil 2.14: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6'nın PF histogramları.	24
Şekil 2.15: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi altında Yük 2'ye ait DA akım bileşenin histogramı.	26
Şekil 3.1: İlk özellik eleme yönteminden sonra elde edilen özellik kümesinin Pearson korelasyonu ısı haritası.	32
Şekil 3.2: Anlamlı özellik kümesinin son hali için Pearson korelasyonu ısı haritası.	35
Şekil 3.3: Aykırı değer tespitinde kullanılan kutu grafiği (box-plot) yöntemini izah eden şekil [50].	36
Şekil 4.1: Yapay sinir ağında buluna bir nöronun yapısı [53].	38
Şekil 4.2: Örnek bir çok katmanlı YSA'nın yapısı [53].	39
Şekil 4.3: Karmaşıklık matrisi.	45
Şekil 5.1: Tip 1-1 YSA için gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.	49
Şekil 5.2: En iyi Tip 1-1 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.	50

Şekil 5.3: En iyi Tip 1-1 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.	51
Şekil 5.4: En iyi Tip 1-1 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için fl skoru değerleri.	51
Şekil 5.5: En iyi Tip 1-1 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.	52
Şekil 5.6: En iyi Tip 1-1 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.....	53
Şekil 5.7: Tip 1-2 YSA için gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.	54
Şekil 5.8: En iyi Tip 1-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.	55
Şekil 5.9: En iyi Tip 1-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.	55
Şekil 5.10: En iyi Tip 1-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için fl skoru değerleri.	56
Şekil 5.11: En iyi Tip 1-2 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.	57
Şekil 5.12: En iyi Tip 1-2 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.....	57
Şekil 5.13: Tip 1-3 YSA için gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.	58
Şekil 5.14: En iyi Tip 1-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.	59
Şekil 5.15: En iyi Tip 1-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.	59
Şekil 5.16: En iyi Tip 1-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için fl skoru değerleri.	60
Şekil 5.17: En iyi Tip 1-3 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.	61
Şekil 5.18: En iyi Tip 1-3 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.....	61
Şekil 5.19: Gizli katman nöron sayısı en iyilenen Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği hassasiyetlerin karşılaştırması.	63
Şekil 5.20: Gizli katman nöron sayısı en iyilenen Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği duyarlılık karşılaştırması.	63
Şekil 5.21: Gizli katman nöron sayısı en iyilenen Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği F1 skorlarının karşılaştırması.	64
Şekil 5.22: En iyi Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modelleri için en yüksek yanlış tahmin ve en düşük yanlış tahmin sayılarının karşılaştırması.	65
Şekil 5.23: Tip 2-1 YSA için 1. ve 2. gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.	66
Şekil 5.24: En iyi Tip 2-1 YSA'nın test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.	67
Şekil 5.25: En iyi Tip 2-1 YSA'nın test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.	67

Şekil 5.26: En iyi Tip 2-1 YSA'nın test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için f1 skoru değerleri.	68
Şekil 5.27: En iyi Tip 2-1 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.	69
Şekil 5.28: En iyi Tip 2-1 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.	69
Şekil 5.29: Tip 2-2 YSA için 1. ve 2. gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.	70
Şekil 5.30: En iyi Tip 2-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.	71
Şekil 5.31: En iyi Tip 2-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.	71
Şekil 5.32: En iyi Tip 2-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için f1 skoru değerleri.	72
Şekil 5.33: En iyi Tip 2-2 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.	73
Şekil 5.34: En iyi Tip 2-2 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.	73
Şekil 5.35: Tip 2-3 YSA için 1. ve 2. gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.	74
Şekil 5.36: En iyi Tip 2-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.	75
Şekil 5.37: En iyi Tip 2-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.	75
Şekil 5.38: En iyi Tip 2-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için f1 skoru değerleri.	76
Şekil 5.39: En iyi Tip 2-3 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.	77
Şekil 5.40: En iyi Tip 2-3 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.	77
Şekil 5.41: Gizli katman nöron sayıları en iyilenen Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği hassasiyetlerin karşılaştırması.	79
Şekil 5.42: Gizli katman nöron sayıları en iyilenen Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği duyarlılık karşılaştırması.	79
Şekil 5.43: Gizli katman nöron sayıları en iyilenen Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği F1 skorlarının karşılaştırması.	80
Şekil 5.44: En iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modelleri için en yüksek yanlış tahmin ve en düşük yanlış tahmin sayılarının karşılaştırması.	81

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Sistemdeki ilk dört yüke ait çeşitli güç kalitesi indislerinin değerleri.	16
Tablo 2.2: Yük akımlarının THDI histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.	18
Tablo 2.3: Yük akımlarının I_2/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.	19
Tablo 2.4: Yük akımlarının I_3/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.	20
Tablo 2.5: Yük akımlarının I_4/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.	21
Tablo 2.6: Yük akımlarının I_5/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.	22
Tablo 2.7: Yük akımlarının CFI histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.	23
Tablo 2.8: Yüklerin PF histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.	24
Tablo 3.1: Veri setinde bulunan özellikler, özelliklerin açıklamaları, özelliklerin değer tipleri ve özelliklerin değişken tipleri.	30
Tablo 4.1: Tip 1 YSA modellerinin yapısal özellikleri.	41
Tablo 4.2: Tip 2 YSA modellerinin yapısal özellikleri.	41
Tablo 5.1: En iyilenmiş Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modelleri için eğitim ve test doğruluk performans indisleri.	62
Tablo 5.2: En iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modelleri için eğitim ve test doğruluk performansları.	78

SEMBOL LİSTESİ

CFV	: Gerilimin krest faktörü
CFI	: Akımın krest faktörü
DPF	: Temel frekans güç faktörü
h	: Harmonik numarası
i(t)	: Akım anlık değeri
I_h	: Akımın h. harmonik genliği
I	: Akımın etkin değeri
P	: Aktif güç
P₁	: Temel frekans aktif gücü
PF	: Güç faktörü
S	: Görünür güç
S₁	: Temel frekans görünür gücü
t	: Zaman
THDV	: Toplam Gerilim Harmonik Bozulması
THDI	: Toplam Akım Harmonik Bozulması
v(t)	: Gerilimin anlık değeri
V_h	: Gerilimin h. harmonik genliği
V	: Gerilimin etkin değeri
Q1	: Alt çeyreklik
Q3	: Üst çeyreklik
IQR	: Çeyrekler açıklığı
TP	: Gerçek pozitif
TN	: Gerçek negatif
FP	: Yanlış pozitif
FN	: Yanlış negatif

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını gerçekleştirmem sürecinde yol göstericiliğiyle yanımda olan tez danışmanım sayın Prof. Dr. Murat Erhan BALCI'ya ve yardımlarından dolayı Öğr. Gör. Dr. Oktay KARAKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte desteklerini esirgemeyen aileme ayrıca teşekkür ederim.

Balıkesir, 2025

Damla AĞAÇA

1. GİRİŞ

Alternatif akım elektrik şebekeleri, belli bir frekansta ve genlikte sinüzoidal gerilimler ve akımlar altında çalışmak üzere tasarlanırlar. Ancak günümüz güç sistemleri sinüzoidal olmayan (harmonik kirliliğe sahip) akımlar çeken çeşitli doğrusal olmayan yükler barındırırlar [1], [2]. Bu yükler arasında hem konutlarda hem de endüstride yaygın olarak kullanılan doğrultucu devreleri, anahtarlamalı mod güç kaynakları ve evirici devrelerinin yanı sıra endüstride kullanılan tristör kontrollü reaktörler, motor sürücüleri ve kontrollü ark kaynakları sayılabilir [1]. Ayrıca, fotovoltaik üretim birimleri [3]-[5] ve rüzgâr türbinleri [6], [7] de güç elektroniği devreleri üzerinden şebekeye bağlanmaları sebebiyle harmonik kaynağıdır. Bu baskın harmonik kaynaklarına ilaveten, transformatörler ve asenkron motorlar da bozuk dalga formuna (harmonik kirliliğe) sahip uyartım akımları çekerler [1].

Harmoniklerin güç sistem elemanları üzerinde çeşitli olumsuz etkileri vardır. Bunlardan önde gelenlerinden biri, güç sistem elemanlarındaki ekstra kayıplardır. Ekstra kayıplar ise güç sistem elemanlarının aşırı ısınmasına ve neticesinde de ömür kaybına yol açarlar [8]. Harmonikler altında ömür kaybını önlemek için literatürde özellikle güç transformatörleri [9]-[12], güç kabloları [13], [14] ve asenkron motorların [15], [16] anma kayıplarını aşmadıkları azami yüklenme oranları belirlenmiştir. Ayrıca, harmonik bozulmanın;

- Güç sistem elemanlarında ek kayıplara bağlı olarak verimi düşürdüğü [1], [17],
- Yüklerin güç faktörünü kötüleştirdiği [1] ve basit kapasiteyle kompanze edilemeyen bozulma güçlerine yol açtığı [18], [19],
- Elektrik makinalarında moment dalgalanmaları ve titreşimler oluşturduğu [1], [8],
- Koruma elemanlarının ve elektronik cihazların hatalı çalışmasına yol açtığı [1],
- Ölçü transformatörlerinin [20], [21] ve elektromekanik enerji sayaçlarının [22], [23] ölçüm doğruluğunu olumsuz etkilediği,

bilinmektedir.

Harmoniklerin güç sistem elemanları üzerindeki olumsuz etkilerinin sınırlandırılması amacıyla IEEE ve IEC organizasyonlarının hazırladığı standartlarda gerilim ve akım harmonikleri için sınır değerler tanımlanmıştır [24]. Bu sınır değerlerin sağlanabilmesi için uygulanan harmonik iyileştirme tekniklerinden önde gelenleri pasif, aktif ve melez (pasif + aktif) filtrelerdir [25]-[28].

Harmoniklerin sisteme etkilerinin değerlendirilmesi ve bu etkilerin filtre kullanımıyla iyileştirilmesi üzerine yapılacak modelleme ve analiz çalışmalarında ise sistemde yer alan harmonik kaynaklarının yerlerinin ve tiplerinin tespiti önemlidir [29], [30].

1.1 Arka Plan

Harmonik kaynaklarının tespiti üzerine metotlar, ölçüm stratejisine göre tek noktadan ve çok noktadan (dağıtılmış) ölçüm temelli olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir [30]-[32]. Çok noktadan ölçümlere dayalı yöntemler, tek noktadan ölçüm temelli yöntemlere göre daha güvenilirdir. Ancak bu yöntemler, sistemin farklı bölümlerine yerleştirilen senkron ölçüm cihazları kullanılarak uygulanabilir oldukları için uygulama maliyetleri daha yüksektir [32].

Tek noktadan ölçüm temelli yöntemler arasında; (i) aktif güç yönü yöntemi ve bu yöntemden türetilen kaynak yük kalitesi ve harmonik global indisleri, (ii) reaktif güç veya bozulma güçlerinin karşılaştırmasına dayalı yöntemler, (iii) şebeke ve tüketici taraflarının Thevenin ve Norton eşdeğer devre modellerinin kullanımına dayalı kritik empedans ve Süperpozisyon-Projeksiyon yöntemleri ile (iv) yük akımını bileşenlerine ayırmaya dayalı uygun akım ve doğrusal akım indisleri olarak sıralanabilir [31], [32]. Bunlara ilaveten son yıllarda, şebeke ve tüketici taraflarının Thevenin eşdeğer devre modellenmesine dayalı gerilim ve akım oranı harmonik kaynağı tespit yöntemi önerilmiştir [33].

Çok noktadan eş zamanlı ölçüme dayalı yöntemler arasında, global güç kalitesi indisi ve ücretli yol modeli (toll road model) [31], [34] sayılabilir. Ayrıca, her bir barayı ve hat akımını izlemeden diğer bir deyişle ölçmeden az sayıda senkronize ölçüm cihazı kullanarak, harmonik kaynaklarının yerinin tespiti ve harmonik emisyonu tahmini için istatistiksel ve akıllı yöntemlere dayalı harmonik durum tahmini yöntemleri literatürde önerilmiştir [35].

Buraya kadar özetlendiği üzere, harmonik kaynaklarının tespiti için farklı prensiplere göre önerilmiş çok çeşitli yöntemler mevcuttur. Bununla birlikte, harmonik kaynak tipini tespit etmek veya sınıflandırmak için daha yüksek düzeyde uzmanlık ve deneyim gereklidir [36]. Dolayısıyla, literatürdeki güncel çalışmalardan [36], [37] görüldüğü üzere, harmonik kaynaklarının sınıflandırması için yaygın olarak yapay zeka temelli yöntemler uygulanmıştır.

Bu yapay zeka temelli çalışmalardan biri olan kaynak [30]'da 2 boyutlu görüntü matris dönüşümü (GMD) ve derin evrişimli sinir ağına (DESA) dayanan bir harmonik kaynak sınıflandırması yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem, 6 darbeleri doğrultucu, 12 darbeleri doğrultucu, statik frekans dönüştürücü, triyak kontrollü reaktör ve DC motor yükleri için oluşturulmuştur. Önerilen yöntemin mevcutlara kıyasla avantajlarının, otomatik özellik çıkarımına sahip olması, harmonik kaynak sınıflandırması için daha az veriye ihtiyaç duyması ve daha yüksek doğruluğa sahip olması şeklinde ifade edilmiştir. Modelin eğitilmesi ve test edilmesinde kullanılan benzetim temelli veriler, doğrusal olmayan yüklerin tipik harmonik akım bileşenleri dikkate alınarak elde edilmiştir.

[36]'da, ortak bağlantı noktasında (tek noktadan) ölçülen akım ve gerilimleri dikkate alarak sistemdeki yüklerin tipi (akım veya gerilim harmonik kaynağı) ve yerinin tespiti için destek vektör makinesi (DVM) ve naive bayes (NB) sınıflandırıcılarına dayanan iki yöntem sunulmuştur. Bu iki yöntemde, S-dönüşümü kullanılarak gerilime ve akıma ait özellikler elde edilmiş ve veri seti olarak kullanılmıştır. Analiz sonuçları, akım özellik veri setinin gerilim özellik veri setine kıyasla sınıflandırmada daha anlamlı olduğunu ve DVM'nin harmonik kaynaklarının tespitinde daha iyi performansla sahip olduğunu göstermiştir.

[38]'de, [36]'ya benzer şekilde harmonik kaynak türünü tespit etmek için ortak bağlantı noktasından (tek noktadan) yapılan ölçüme dayalı gerilim ve akım sinyallerinin S-dönüşümü kullanılarak gerilim ve akım özellik setleri elde edilmiştir. Elde edilen özellik setleri makine öğrenme algoritmalarından K-en yakın komşu ve naive bayes'e girdi olarak kullanılmıştır. Sonuçlardan harmonik kaynak tanımlanmasında K-en yakın komşu algoritması ve akım özellikleri kombinasyonunun daha iyi performans ortaya koyduğunu göstermiştir.

[39] numaralı kaynakta, üç fazlı altı darbeleri doğrultucu, ark fırını ve transformatör, karakteristik akım harmonik spektrumlarına göre kategorize edilmiştir. Devamında 3., 5. ve 7. akım harmonik genlikleri, bu üç eleman arasında sınıflandırma yapabilmek için özellik olarak çıkarılmıştır. Son olarak, esnek geri yayımlı yapay sinir ağı (YSA) ve bayesian regülasyon algoritmasıyla optimize edilmiş YSA ile sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. [40]'da ise üç fazlı altı darbeleri doğrultucu, ark fırını ve transformatör yükleri için geri yayılım tipi YSA ile karakteristik 3., 5. ve 7. akım harmonikleri özellik olarak dikkate alınarak sınıflandırma yapılmıştır.

Kaynak [41]'de, monitör, işlemci, floresan lamba, televizyon, şarj aleti, fan, buzdolabı ve ampul gibi çeşitli tek fazlı yüklerin sınıflandırması için çok katmanlı algılayıcı, radyal tabanlı fonksiyon (RTF) ağı ve doğrusal, polinom ve RTF çekirdeklerine sahip DVM dahil olmak üzere çeşitli yapay zeka temelli modeller geliştirilmiştir. Veri seti oluşturulurken, yük akımlarının besleme geriliminin bozulmasına etkisi ihmal edilebilir olan bir test sisteminde çeşitli yük kombinasyonları için akım harmonikleri ölçülmüştür.

Radial taban fonksiyonlu YSA temelli sınıflandırıcının çalışıldığı [42]'de, akım dalga formundan özellik çıkarımı için hızlı Fourier dönüşümü (FFT) kullanılmıştır. Buna göre, YSA'nın giriş parametreleri olarak harmonik numaraları ve THDI belirlenmiştir. Bu çalışmada, yük olarak dizüstü bilgisayar, masaüstü bilgisayar, enerji verimli lamba ve klima dikkate alınmış ve bu dört sınıf yükün 15 farklı kombinasyonu için önerilen yöntemin geçerliliği test edilip gösterilmiştir.

Kaynak [43]'de Huang ve Lin, kendi kendine organize olan özellik kafesinin (KKOESA) ve dalgacık dönüşüm katmanının birleşiminden oluşan dalgacık dönüşümlü melez YSA mimarisini tanımlamıştır. İlk katmanda, Morlet dalgacıkları gerilim ve akımlardan özellikleri çıkarmak için ve ikinci katmandaki KKOESA ise sınıflandırıcı olarak kullanılmıştır. Çalışmada, elektronik devreler, DA ve AA motorları ile ark fırınları sınıflandırma amacıyla dikkate alınmıştır. Matlab yazılım ortamında simülasyonla elde edilen veri setleri modelin eğitimi ve testinde kullanılmıştır.

Buna ilaveten, yine Huang ve arkadaşlarının bir diğer çalışmasında [44], 6 darbeleri doğrultucu, 12 darbeleri doğrultucu, tristör kontrollü reaktör ve DA motorundan oluşan çeşitli doğrusal olmayan yüklerin sınıflandırması için dalgacık dönüşümü ve kendi kendine organizasyon özellik haritası ağını kullanan melez bir YSA modeli önerilmiştir. Dikkate alınan yüklerin farklı yüklenme oranları ve güç faktörü değerlerinde elde edilen V-I eğrileri sınıflandırma özelliği olarak kullanılmıştır.

[45] numaralı çalışmada, doğrusal yük, çeşitli doğrusal olmayan yükler (6 darbeleri ve 12 darbeleri doğrultucular, ark fırını, DA motoru ve statik var kompenzator) ile fotovoltaik panel, çift beslemeli asenkron generatör ve mikro türbinli evirici tabanlı dağıtık üretim (DG) birimlerinin, k-en yakın komşu algoritması kullanılarak sınıflandırılması amaçlanmıştır. Çalışmada önerilen yöntemde, özellikler empirik mod ayrıştırma tekniğiyle gerilim dalga

formlarından çıkarılmıştır. Modelin oluşturulmasında ve testinde kullanılan veri seti, PSCAD yazılımıyla zaman tanım bölgesinde elde edilmiştir.

Çalışma [46]'da, yine çeşitli inverter tabanlı DG'ler (mikro türbin, batarya enerji depolama sistemi, fotovoltaiik panel, süperiletken manyetik enerji depolama sistemi, kalıcı mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini ve çift beslemeli endüksiyon generatörü rüzgar türbini) ile doğrusal yük ve çeşitli doğrusal olmayan yüklerin (6 darbeli ve 12 darbeli doğrultucular, ark fırını, DA motoru ve statik var kompenzator) bulunduğu sistemlerde, ortak bağlantı noktasındaki harmonik kaynaklarının tespiti amaçlanmıştır. Harmonik kaynakların tespitinde Destek Vektör Makinesi (DVM) kullanılmıştır. DVM sınıflandırıcısının parametreleri Balina Optimizasyon Algoritması (BOA) ile optimize edilmiştir. Önerilen yöntemde, özellikler gerilim dalga formlarından çıkarılmıştır. Modelin oluşturulmasında ve testinde kullanılan veri seti, PSCAD yazılımıyla zaman tanım bölgesinde elde edilmiştir.

Buraya kadar özetlenen çalışmalar değerlendirildiğinde, ulaşılabilen literatürde kaynak geriliminin harmonik bileşenlerinin genlikleri ve açılarının rassal olarak değiştiği sistem şartlarında, harmonik üreten yük tiplerinin sınıflandırılması probleminin çözümüne yönelik bir çalışmaya rastlanmadığı ifade edilebilir.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında,

- Kaynak geriliminin harmonik bileşenlerinin rassal bir şekilde değiştiği sistem şartları için,
- Gerilim harmonik bozulmasının yük akımı harmonik bozulmasına etkilerini dikkate alarak,

harmonik üreten evsel yük tiplerinin sınıflandırmasında kullanılmak üzere YSA temelli bir model geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda, bozulmuş kaynak gerilimine sahip olan ve yüklerin akım harmonik bozulmasının gerilim harmonik bozulmasına bağımlılığının dikkate alındığı bir sistem modeli zaman tanım bölgesinde oluşturulmuştur. Bu model oluşturulurken Matlab/SIMULINK yazılımı kullanılmıştır.

Analiz sisteminde, tek fazlı triyak kontrollü kıyıcı (dimmer) yükü, sürekli kondansatörlü tek fazlı asenkron motor, tek fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu yükü, rezistif yük besleyen ve batarya şarj eden tek fazlı tam dalga doğrultucular ile ısıtıcı yükü ele alınmıştır. Böylece, beşi doğrusal olmayan karakterde olan altı farklı ev tipi yükün bozulmuş gerilimler altında sınıflandırması hedeflenmiştir.

Devamında farklı harmonik bileşenler ve toplam harmonik bozulma seviyelerindeki çok sayıda bozulmuş gerilimler altında sistemdeki yüklerin harmonik akım ve güç kalitesi indislerinin istatistiksel analizi yapılmıştır.

Ayrıca, YSA temelli sınıflandırıcı modeli için özellik seçimi ve veri önileme yöntemleri belirlenmiştir. Bu yöntemlere göre çok sayıda bozulmuş gerilim dalga formu altında çeşitli yük kombinasyonları için ortak bağlantı noktasında ölçülen harmonik ve güç kalitesi indislerini barındıran özellik veri seti düzenlenmiştir.

Son olarak, literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak tercih edilen ReLU, sigmoid ve tanh aktivasyon fonksiyonlarını dikkate alarak, tek gizli katmanlı ve iki gizli katmanlı, 6 farklı YSA model tipi tanımlanmıştır. Bununla birlikte, tanımlanan modellerin yüklerin sınıflandırılmasında gösterdiği performansları, farklı gizli katman nöron sayıları için parametrik olarak analiz edilmiştir. Analizler neticesinde yük sınıflandırmasında en başarılı model belirlenmiştir.

1.3 Tezin Sınırları

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar aşağıda maddeler halinde verilen sınırlara sahiptir:

- Önerilen YSA temelli sınıflandırma aracı, tek fazlı triyak kontrollü kıyıcı yükü, sürekli kondansatörlü tek fazlı asenkron motor, tek fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu yükü, rezistif yük besleyen ve batarya şarj eden tek fazlı tam dalga doğrultucular ile ısıtıcı yükü dikkate alınarak eğitilmiş ve test edilmiştir.
- YSA modelinin eğitilmesi ve test edilmesinde kullanılan ortak bağlantı noktasına ait harmonik ve güç kalitesi verileri, Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulan ve yüklerin gerilim-akım ilişkilerinin diferansiyel denklem takımlarıyla zaman tanım bölgesinde modellendiği simülasyon sisteminde elde edilmiştir.
- Analizlerde ve modelleme çalışmalarında, bozulmuş kaynak gerilimi olarak; temel frekans bileşeni anma değerinde sabit tutulmuş, 20. harmoniğe kadar tek ve çift

numaralı harmonik bileşenler içeren, harmonik bileşenlerin genlik ve faz açıları rastgele türetilmiş, toplam harmonik bozulma değeri (THDV) %3.99 ile %7.36 arasında değişen, 1000 adet farklı dalga formu simüle edilmiştir. Simülasyonlarda ayrıca sinüzoidal anma gerilimi de dikkate alınmıştır.

- Simüle edilen 1001 adet gerilim altında, 6 farklı yüke ait tekli, ikili, üçlü, dördü ve beşli kombinasyonlar ile tüm yüklerin bulunduğu toplamda 63063 (63x1001) sistem durumu modelleme çalışmalarında dikkate alınmıştır.

1.4 Tezin İçeriği

Tezin ikinci bölümünde YSA modelinin oluşturulması ve test edilmesinde kullanılan verinin üretilmesi için Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulan simülasyon sistemi tanıtılmıştır. Ayrıca bu bölümde, dikkate alınan 6 farklı evsel yükün, sinüzoidal ve çok sayıda bozulmuş gerilimler altında çeşitli güç kalitesi ve harmonik indisleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Üçüncü bölümde YSA modellerinin oluşturulmasında dikkate alınan özellik çıkarımı yöntemi tanıtılmıştır. Devamında bir önceki bölümde analiz edilen indisler arasında özellik çıkarımı yapılmıştır. Ayrıca, YSA modelin eğitilmesi ve test edilmesi süreçlerinde kullanılan verinin ön işleme adımlarından bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, tez kapsamında dikkate alınan YSA yapıları ve bu yapıların eğitim ve test süreçlerinde uygulanan yöntemler/algoritmalar sunulmuştur. Sonrasında, modellerin performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan, doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve fl skoru indisleri ile karmaşıklık matrisi tanıtılmıştır.

Beşinci bölümde, tez kapsamında çalışılan 15 giriş ve 6 çıkışa sahip olan, tek ve iki gizli katmanlı YSA modellerinde, gizli katmanda tanh, sigmoid ve ReLU aktivasyon fonksiyonları dikkate alınarak, 6 farklı tip YSA modeli oluşturulmuştur. Devamında, bu modellerin gizli katman nöron sayıları, doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve fl skoru indisleri ile karmaşıklık matrisi dikkate alınarak en iyilenmiştir. Elde edilen nöron sayısı en iyilenmiş 6 YSA modelinin performansları kendi aralarında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve harmonik üreten yüklerin sınıflandırılmasında en başarılı olan tespit edilmiştir.

Son bölümde, bu tez çalışmasında yapılan çalışmalar üzerine genel bir değerlendirme yapılarak öneriler ve gelecek çalışma belirtilmiştir.

2. TEST SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE HARMONİK ANALİZİ

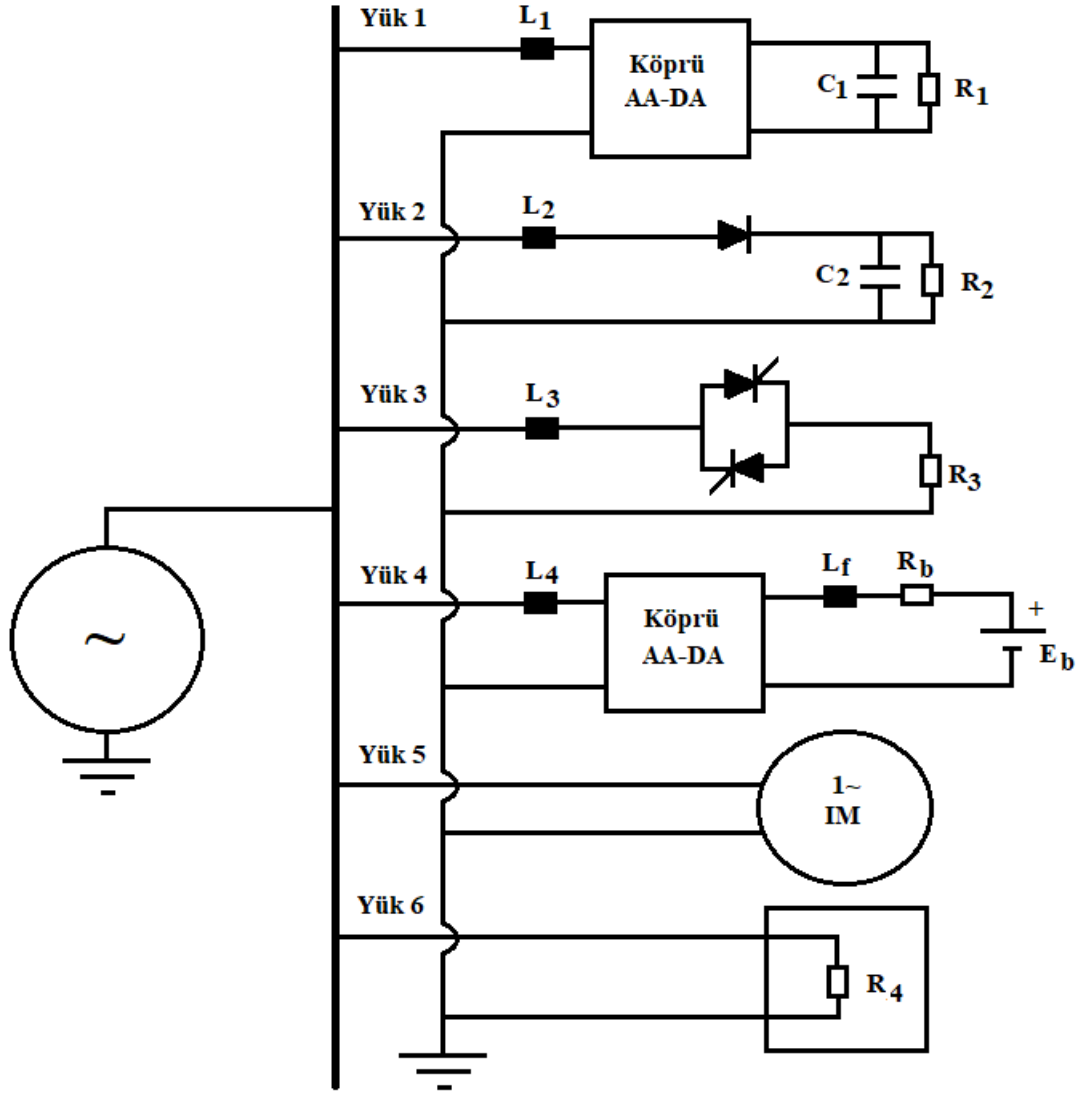
Bu bölümde öncelikle, sınıflandırmaya tabi tutulacak yükleri barındıran sistemin Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulan modeli tanıtılacaktır. Devamında, analizlerde dikkate alınan ve literatürde yaygın olarak kabul gören güç kalitesi indislerinin ifadeleri sunulacaktır. Ayrıca, oluşturulan model kullanılarak, sistemde var olan yüklerin sinüzoidal gerilim altında çektikleri akım harmonikleri ve diğer güç kalitesi indisleri değerlendirilecektir. Son olarak, rassal şekilde türetilen farklı harmonik spektrumlara ve toplam harmonik bozulma değerlerine sahip çok sayıda bozulmuş gerilimler altında, yüklerin akım harmoniklerinin ve diğer güç kalitesi indislerinin değişimleri istatistiksel olarak analiz edilecektir.

2.1 Sistem Modeli

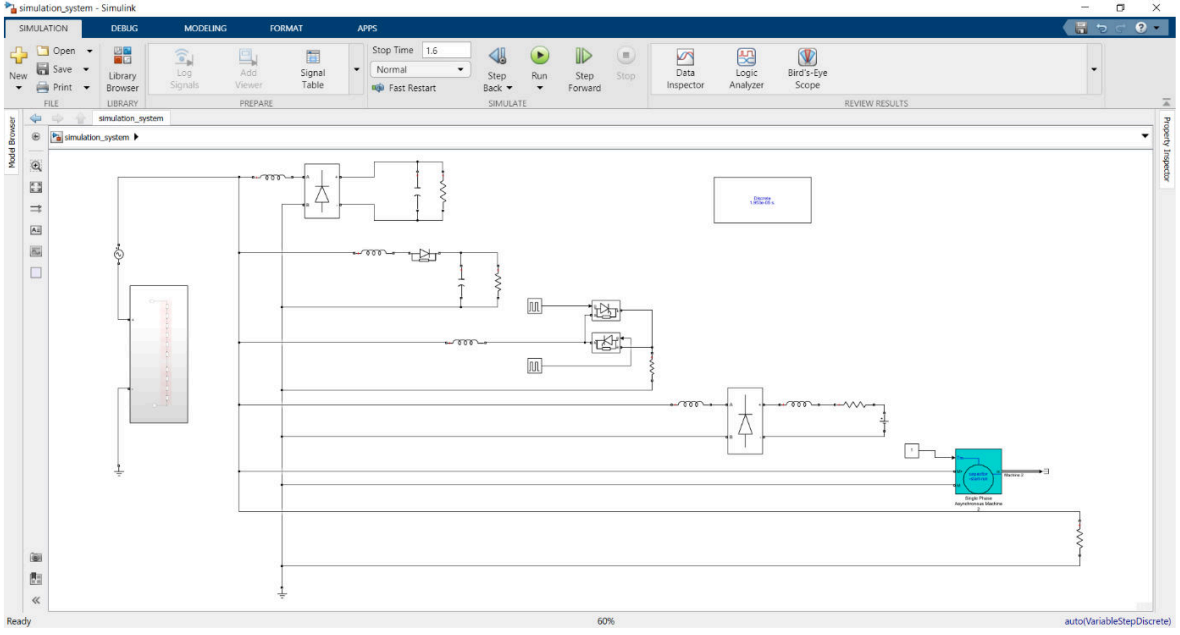
Bu tez çalışma kapsamında yapılan analizler, Şekil 2.1’de sunulan 110 V ve 60 Hz anma değerlerine sahip tek fazlı sistem için gerçekleştirilmiştir. Analiz sistemi Matlab/SIMULINK ortamında modellenmiş olup SIMULINK dosyasının görünümü Şekil 2.2’de verilmiştir. Şekil 2.2’deki sistem modelinde, şebeke tarafında temel frekans gerilim kaynağına seri bağlı olan dikdörtgen maske içinde kaynağın gerilim harmonik bozulmasını temsil eden birbirine seri bağlanmış olan ve çeşitli harmonik frekanslarındaki gerilim kaynakları bulunmaktadır.

Ayrıca, her iki şekilden de görüldüğü üzere analiz sisteminde 6 farklı yük yer almaktadır. Bu yükler sırasıyla, rezistif yük besleyen tam dalga doğrultucu (Yük 1), rezistif yük besleyen yarım dalga doğrultucu (Yük 2), rezistif yük besleyen AA kıyıcı veya dimmer devresi (Yük 3), batarya şarj eden tam dalga doğrultucu (Yük 4), daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motor (Yük 5) ve ısıtıcı yüküdür (Yük 6). İlk 4 yük ile kaynak arasında yüksek frekanslı akım harmoniklerini süzmek için bobinler mevcuttur (L_1, L_2, L_3, L_4). Sistemde ve asenkron motor dışındaki yüklerde yer alan bobinlere ait L_1, L_2, L_3 ve L_4 indüktansları 0.5 mH, Yük 1 ve Yük 2’de yer alan kondansatörlere ait C_1 ve C_2 kapasiteleri 5000 μ F, R_1, R_2, R_3, R_4 ve R_b dirençleri sırasıyla 20, 24.5, 20, 20 ve 0.15 Ω , L_f indüktansı 0.4 H ve E_b DA gerilim kaynağı 160 V’tur. Burada, sistemde yer alan E_b ve R_b elemanlarının şarj edilen bataryayı temsil ettiğini belirtmeliyiz [47]. SIMULINK kütüphanesinde hazır bulunan tek fazlı asenkron motor yük modeline ait özellikler ve parametreler ise Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de verilmiştir.

Bu şekillerden, analizde dikkate alınan asenkron motorun daimi kondansatörlü, 187 W, 110 V ve 60 Hz anma değerlerine sahip tek fazlı bir motor olduğu ifade edilebilir.



Şekil 2.1: Analiz sisteminin şematığı.



Şekil 2.2: Analiz sisteminin SIMULINK ortamında modeli.

Block Parameters: Single Phase Asynchronous Machine 2 ✕

Single Phase Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a single phase asynchronous machine (split-phase, capacitor-start, capacitor-start-run, main and auxiliary windings accessible) modeled in the dq stator reference frame. Main and auxiliary windings are in quadrature. You can specify initial speed that will make the machine run without the auxiliary winding.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Mechanical input:

Torque T_m

Units

SI

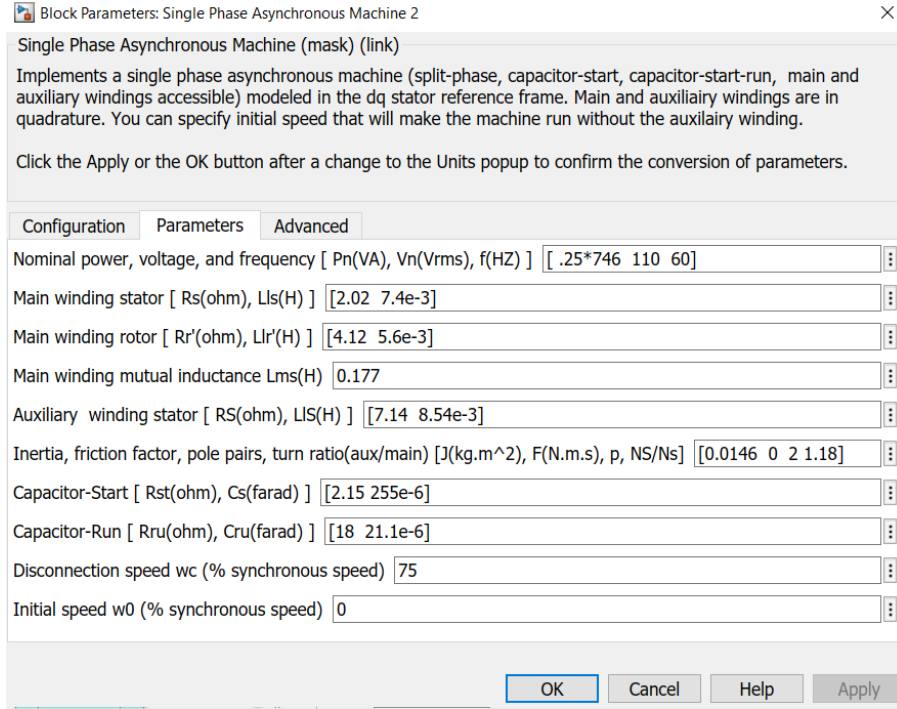
Type of machine

Capacitor-Start-Run

Measurement output

Use signal names to identify bus labels

Şekil 2.3: Tek fazlı asenkron motora ait konfigürasyon.



Şekil 2.4: Tek fazlı asenkron motora ait model parametreleri.

2.2 Analizlerde Dikkate Alınan İndisler

Yapılan analizlerde dikkate alınan indislerden harmonik bozulmanın ölçümüyle ilgili olanlar gerilim ve akıma ait toplam harmonik bozulma indisleridir. Bunların kısaltmaları sırasıyla THDV ve THDI olup ifadeleri Denklem (2.1) ve (2.2)'de yazılmıştır [3]:

$$THDV = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2} V_h^2}}{V_1} \quad (2.1)$$

$$THDI = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2} I_h^2}}{I_1} \quad (2.2)$$

Bu ifadelerde, h harmonik numarasını, V_h ve V_1 h. harmonik ve temel harmonik gerilimlerinin etkin değerlerini, I_h ve I_1 h. harmonik ve temel harmonik akımlarının etkin değerlerini ifade eder.

Analizlerde gerilim (V) ve akımın (I) toplam etkin değerleri de dikkate alınmıştır. Toplam etkin değer, literatürde iyi bilindiği üzere zaman tanım bölgesinde hesaplanabilir. Ayrıca, harmoniklerin etkin değerlerinin vektörel toplamından da bulunabilir [48]:

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} = \sqrt{\sum_h V_h^2} \quad (2.3)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} = \sqrt{\sum_h I_h^2} \quad (2.4)$$

Denklem (2.3) ve (2.4)'deki t zamanı, T ise periyodu ifade etmektedir.

Analizlerde dikkate alınan gerilim ve akıma ait son indis ise; tepe faktörü (crest factor) olup bu indis gerilim ve akımın bir periyot boyunca ölçülen en yüksek anlık değerinin (tepe değerinin) etkin değere oranıdır [48]:

$$CFV = \frac{\max(|v(t)|)}{V} \quad (2.5)$$

$$CFI = \frac{\max(|i(t)|)}{I} \quad (2.6)$$

Son olarak, güç faktörü (PF) indisi de aktif gücün (P) görünür güce (S) oranı olarak hesaplanır [48]:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\sum_h V_h I_h \cos(\theta_h)}{VI} \quad (2.7)$$

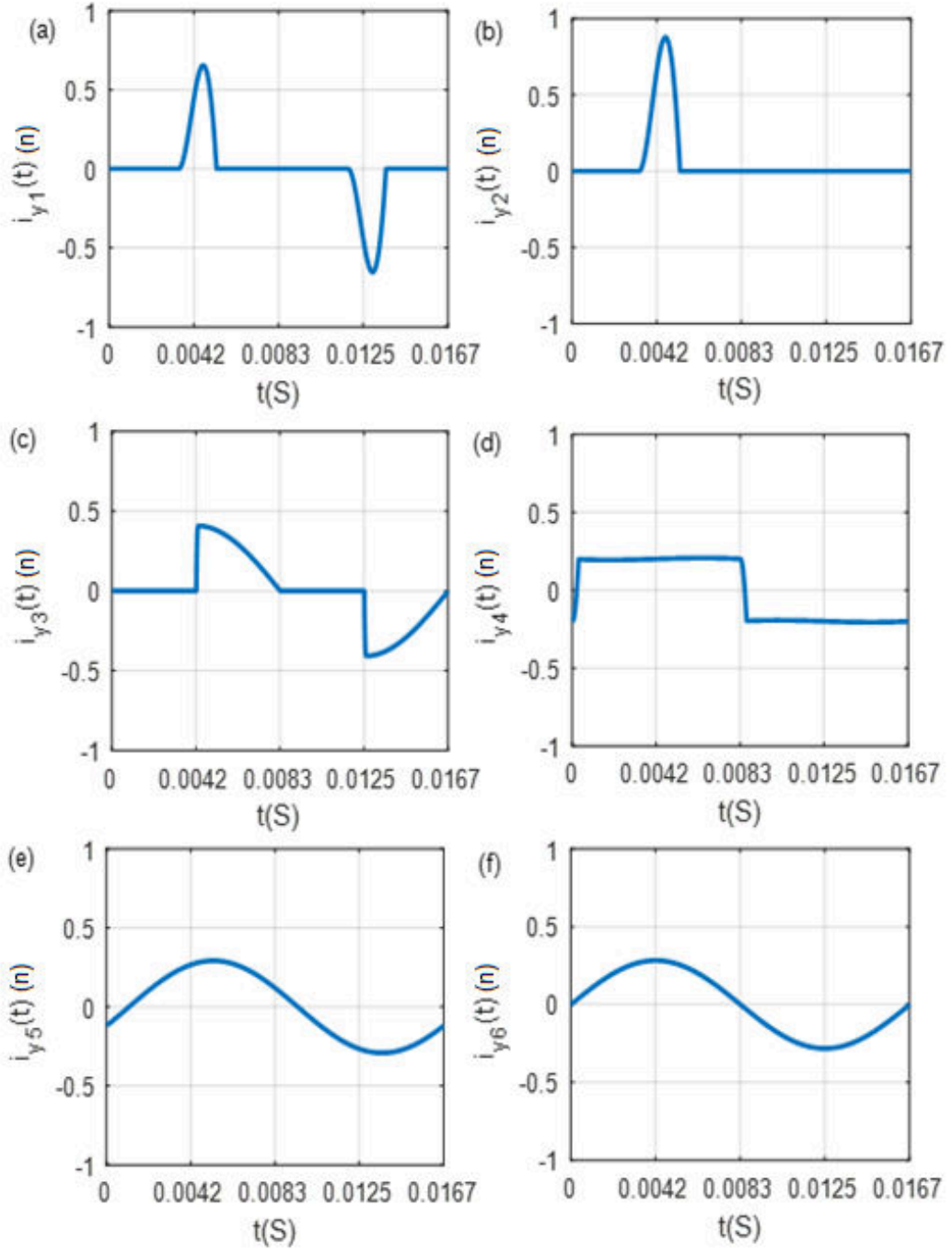
Bu ifadede θ_h h. harmonik gerilimi ve akımı arasındaki faz farkıdır.

Temel frekans dikkate alınarak hesaplanan aktif (P_1) ve görünür (S_1) güçlerin oranı ise temel frekans güç faktörünü (DPF) verir [19]:

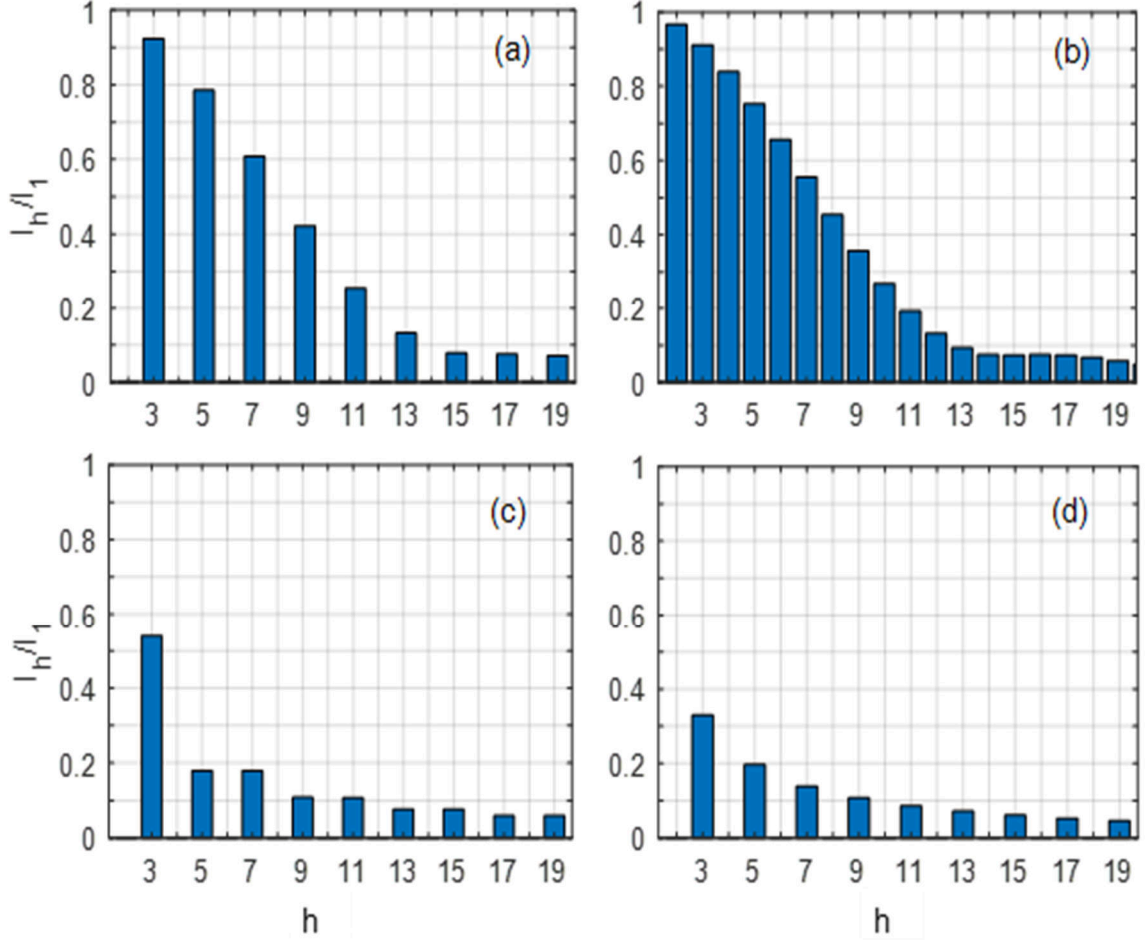
$$DPF = \frac{P_1}{S_1} = \cos(\theta_1) \quad (2.8)$$

2.3 Sinüzoidal Gerilim Altında Yüklerin Analizi

Analiz sisteminde yer alan yüklerin anma sinüzoidal gerilimi altında çektikleri akımların normalize edilmiş dalga formları Şekil 2.5'de çizdirilmiştir. Ayrıca, Şekil 2.6'da bu yüklerin harmonik spektrumları verilmiştir.



Şekil 2.5: (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için sinüzoidal besleme gerilimi altında akım dalga şekilleri.



Şekil 2.6: (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3 ve (d) Yük 4 için sinüzoidal besleme gerilimi altında akım harmonik spektrumları.

Her iki şekilden, ilk dört yüke ait sinüzoidal besleme altındaki akım dalga şekillerinin önemli derecede bozulmaya sahip olduğu, son iki yükün ise aynı besleme şartlarında sinüzoidal dalga formunda akımlar çektikleri görülmektedir. Bununla birlikte, Yük 2 haricindeki doğrusal olmayan yük akımlarında tek numaralı harmoniklerin bulunduğu, Yük 2'nin akımının hem tek hem de çift numaralı harmonikler içerdiği ifade edilebilir.

Sistemdeki yüklerin sinüzoidal anma gerilim altında CFI, I_{DA}/I_1 , THDI(%), DPF ve PF indislerinin değerleri Tablo 2.1'de sunulmuştur. Bu tablodan, ilk dört yüke ait THDI değerlerinin sırasıyla %146, %207, %63 ve %45 olduğu görülmektedir. Ayrıca, CFI değerleri sırasıyla 3.22, 4.37, 2.03, 1.05, 1.41 ve 1.41, DPF değerleri 0.991, 0.993, 0.840, 0.995, 0.913 ve 1.000, PF değerleri ise 0.561, 0.413, 0.710, 0.908, 0.913 ve 1.000'dir. Diğer taraftan sadece Yük 2'nin yani yarım dalga kontrolsüz doğrultucunun akımının bağıl DA değerinin (I_{DA}/I_1) sıfırdan farklı olduğu görülmektedir.

Tablo 2.1’de verilenlerden CFI, THDI ve PF indislerinin incelenen yükler için kayda değer seviyede birbirinden farklı değerler aldığı dolayısıyla bu indislerin sınıflandırmada öz nitelik olarak kullanılabilceği değerlendirilebilir. Bunlara ilaveten DA bileşenin sadece Yük 2’nin akımında yer alması bu yükün tespiti için önemli bir ayırt edici özelliktir.

Tablo 2.1: Sistemdeki ilk dört yüke ait çeşitli güç kalitesi indislerinin değerleri.

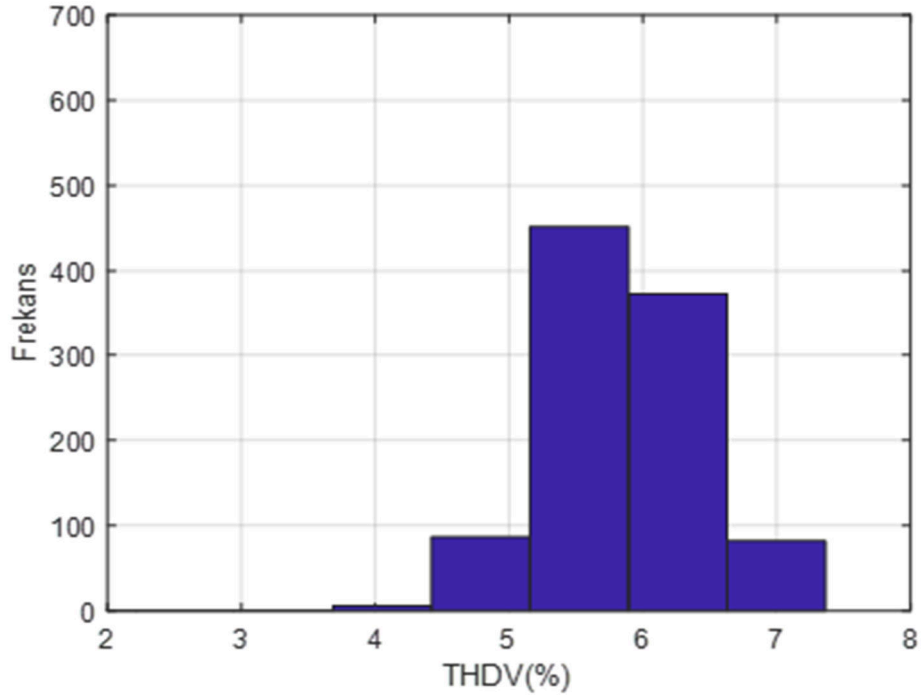
	CFI	I_{DA}/I_1	THDI(%)	DPF	PF
Yük 1	3.22	0	146	0.991	0.561
Yük 2	4.37	0.72	207	0.993	0.413
Yük 3	2.03	0	63	0.840	0.710
Yük 4	1.05	0	45	0.995	0.908
Yük 5	1.41	0	0.01	0.913	0.913
Yük 6	1.41	0	0	1.000	1.000

2.4 Bozulmuş Gerilimler Altında Yüklerin Analizi

Bu kısımda, sistemdeki yüklerin bozulmuş gerilimler altında akım harmonik bileşenlerinin genliklerinin, THDI, CFI ve PF değerlerinin değişimi istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bunun için 2. ile 20. harmonikler arasında tek ve çift numaralı harmonik bileşenlerin hem genlikleri hem de faz açıları rastgele seçilerek farklı harmonik spektruma ve THDV değerlerine sahip 1000 adet kaynak gerilimi türetilmiştir.

Rastgele harmonik bileşenler türetilirken tek harmoniklerin etkin değerleri için temel harmoniğin etkin değerinin %2’si ve çift harmoniklerin etkin değerleri için temel harmonik etkin değerinin %0.5’i üst sınır kabul edilerek, tüm harmoniklerin açıları ise 0 ile 180 derece aralığı dikkate alınarak, Matlab yazılımında randn fonksiyonuyla normal dağılıma göre rastgelelik sağlanmıştır. Temel frekans bileşen ise anma değerinde ve 0° faz açısında sabit tutulmuştur.

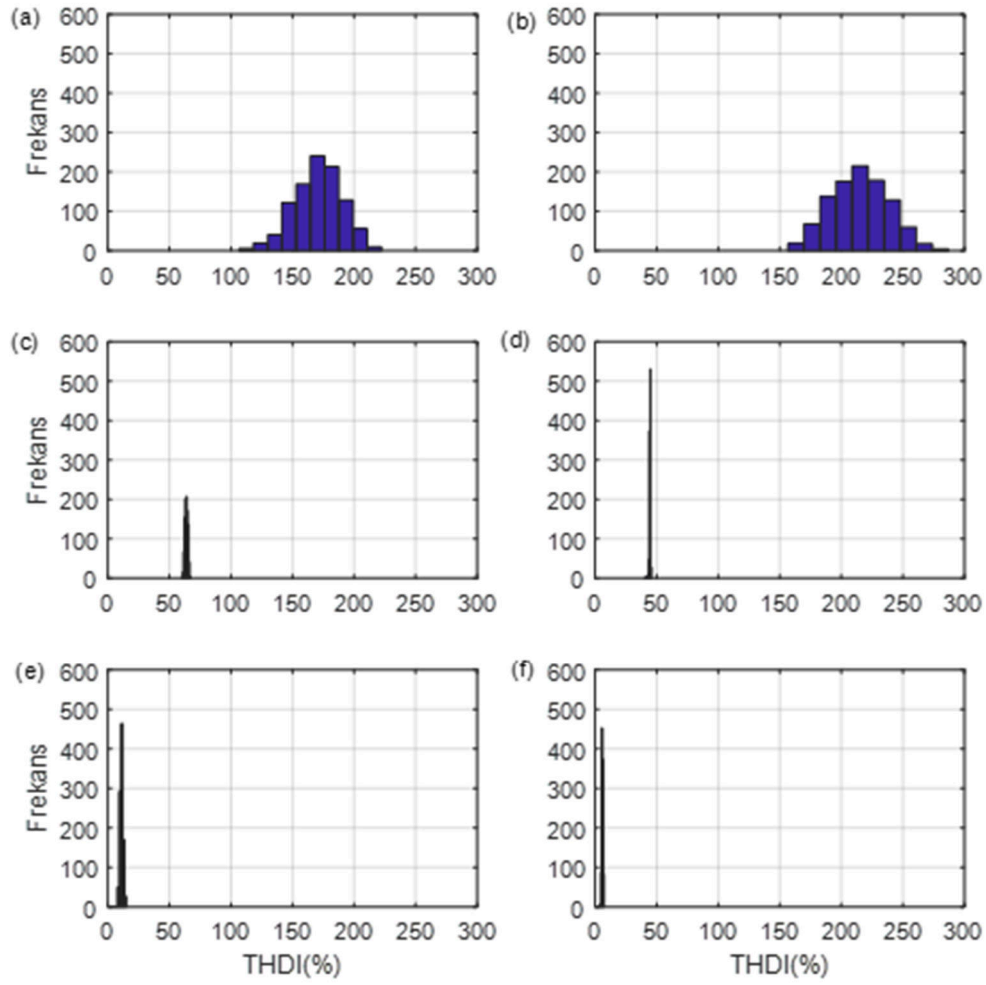
Böylece, Şekil 2.7’de verilen THDV histogramına sahip bozulmuş gerilimler elde edilmiş ve analiz sistemindeki yüklere uygulanmıştır. Bu bozulmuş gerilimlerde ulaşılan THDV’lerin en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla %7.36, %3.99 ve %5.85’dir. Üretilen gerilimlerin THDV değerlerinin standart sapması ise 0.530’dur.



Şekil 2.7: Analiz sisteminde uygulanan 1000 adet bozulmuş kaynak geriliminin THDV histogramı.

1000 adet bozulmuş dalga formunda ve 1 adet sinüzoidal gerilim altında yük akımlarının THDI değerleri, düşük frekanslı bileşenlerin (2. ile 5. harmonikler arası bileşenlerin) temel frekans bileşene göre bağıl değerleri ve CFI değerlerine ait histogramlar Şekil 2.8-Şekil 2.13’de verilmiştir.

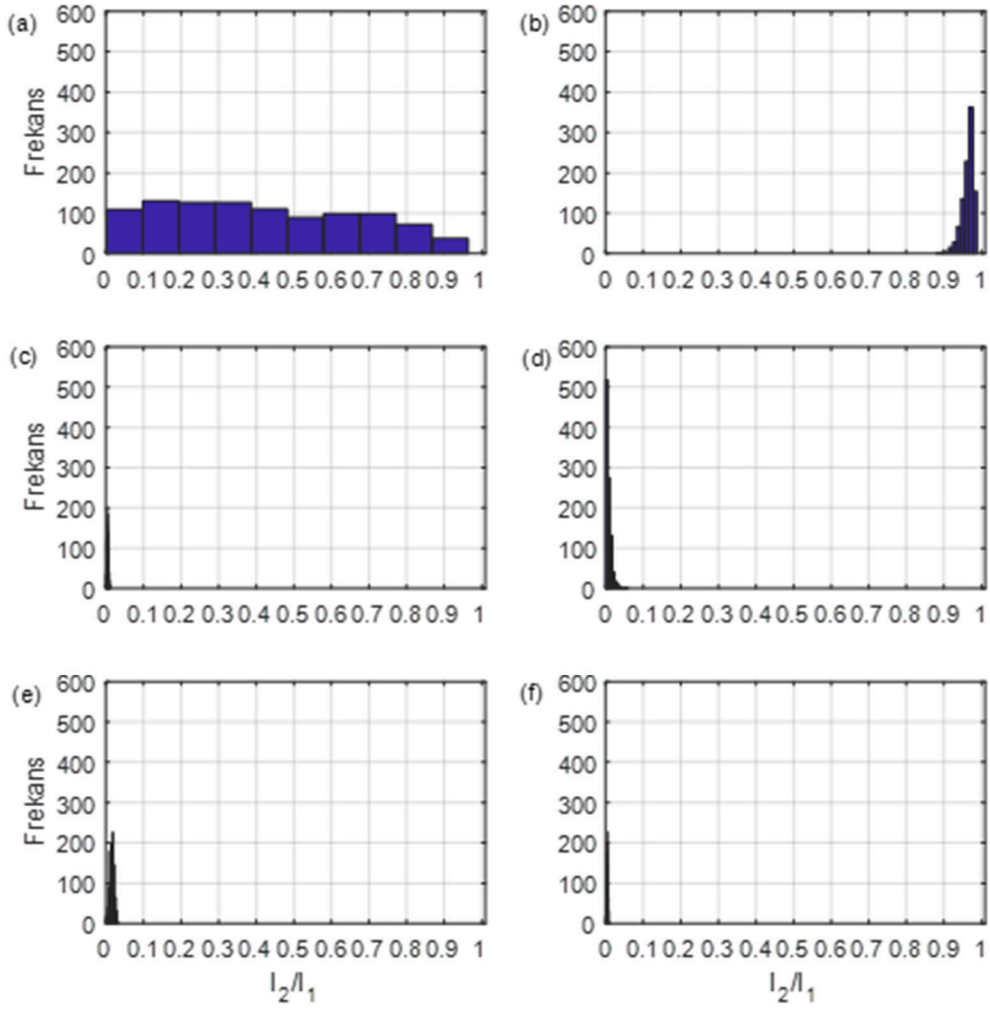
Ayrıca, yüklerin bozulmuş gerilimler altındaki PF histogramları Şekil 2.14’de çizdirilmiştir. Bu histogramlara ait en yüksek, en düşük, ortalama değerler ve standart sapmalar ise sırasıyla Tablo 2.2-Tablo 2.8’de sunulmuştur.



Şekil 2.8: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6'ya ait akımların THDI histogramları.

Tablo 2.2: Yük akımlarının THDI histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

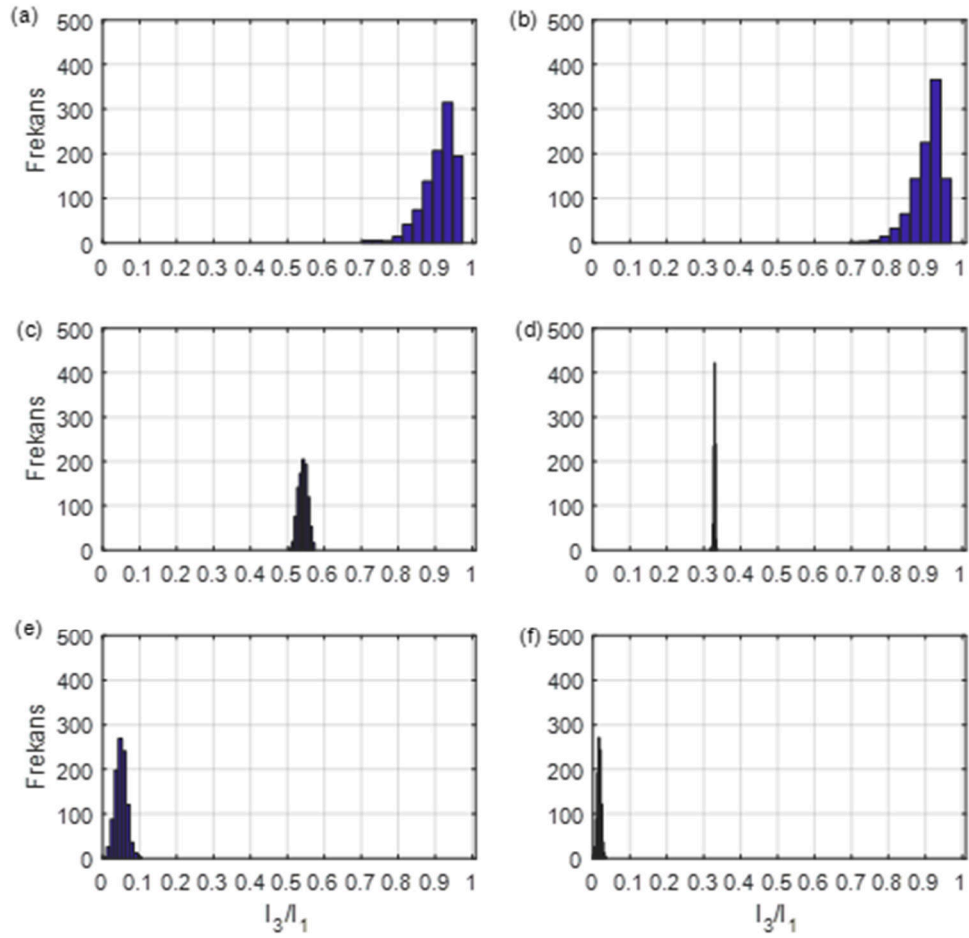
	En Yüksek Değer	En Düşük Değer	Ortalama Değer	Standart Sapma
Yük 1	222.36	106.78	170.80	19.30
Yük 2	287.03	156.72	215.11	23.07
Yük 3	67.00	59.96	63.69	1.17
Yük 4	45.71	40.19	44.59	0.42
Yük 5	15.13	0.01	11.10	1.26
Yük 6	7.36	0	5.84	0.56



Şekil 2.9: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 akımlarının I_2/I_1 histogramları.

Tablo 2.3: Yük akımlarının I_2/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

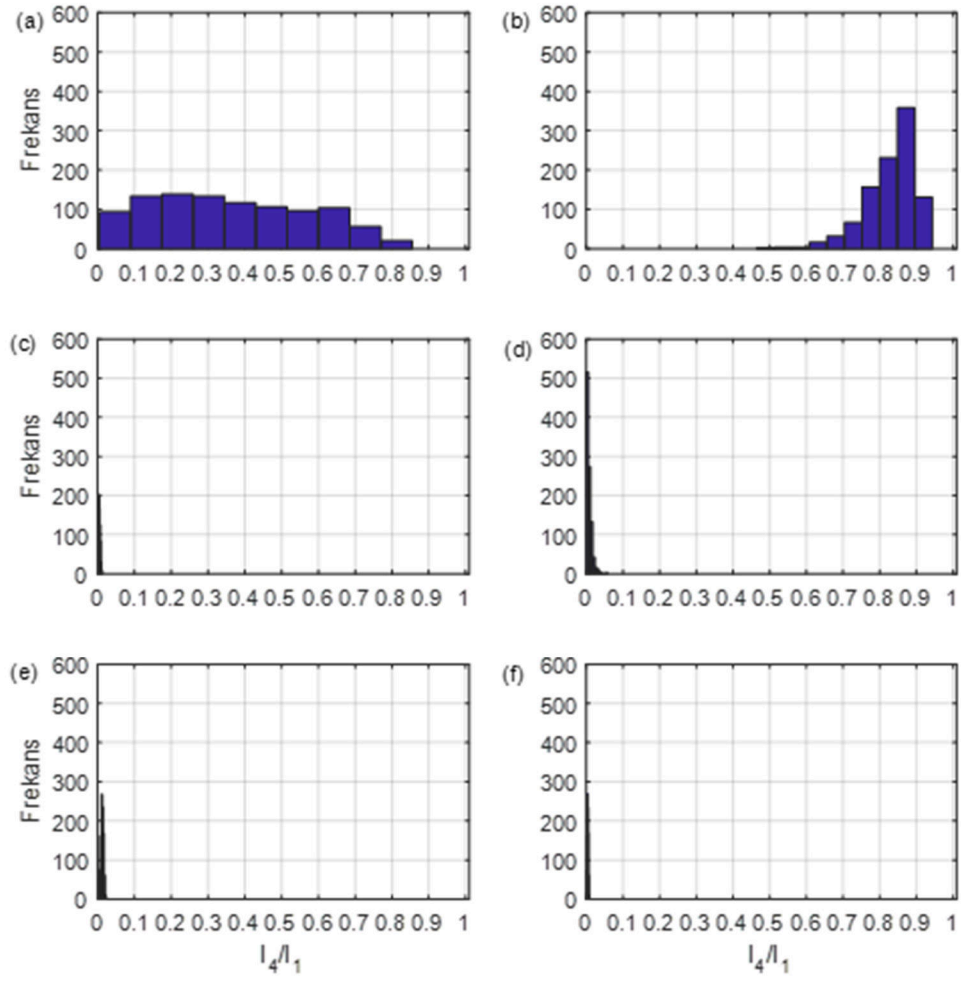
	En Yüksek Değer	En Düşük Değer	Ortalama Değer	Standart Sapma
Yük 1	0.964	0.002	0.420	0.253
Yük 2	0.988	0.879	0.963	0.015
Yük 3	0.010	5.570×10^{-5}	0.004	0.002
Yük 4	0.059	4.371×10^{-5}	0.007	0.007
Yük 5	0.033	1.541×10^{-5}	0.016	0.005
Yük 6	0.009	0	0.004	0.002



Şekil 2.10: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 akımlarının I_3/I_1 histogramları.

Tablo 2.4: Yük akımlarının I_3/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

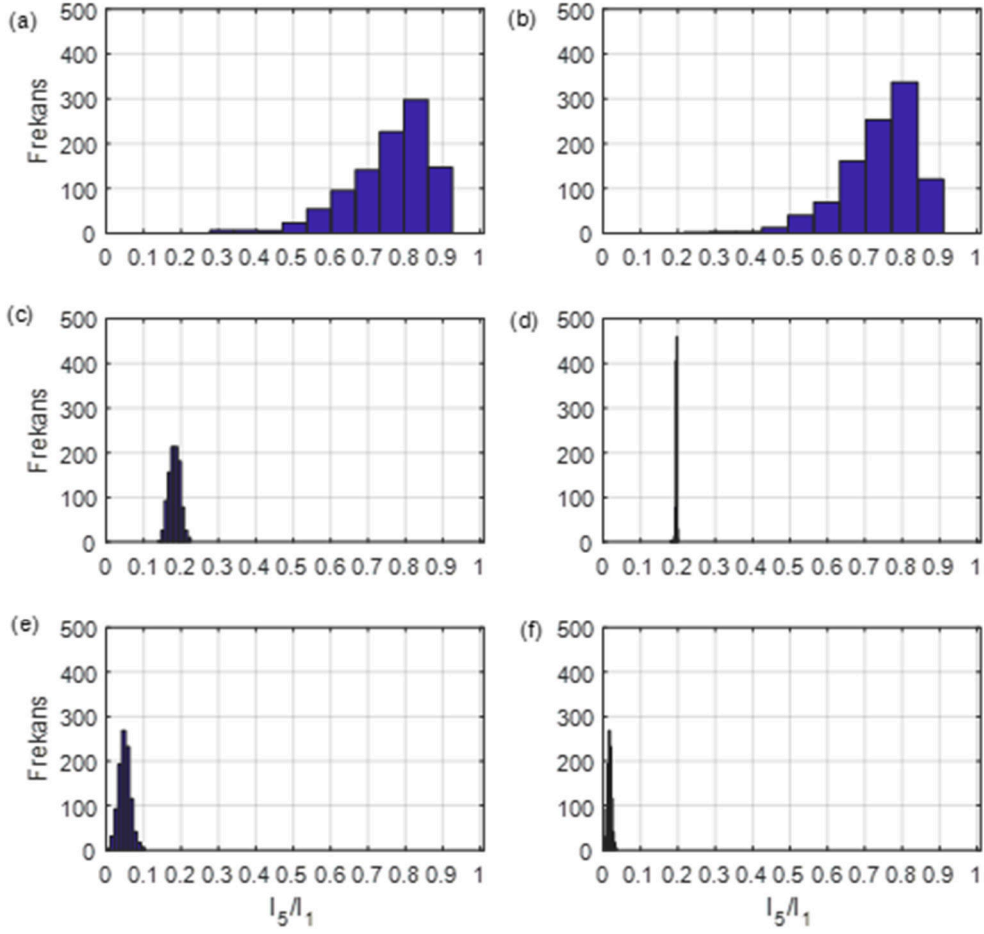
	En Yüksek Değer	En Düşük Değer	Ortalama Değer	Standart Sapma
Yük 1	0.974	0.703	0.910	0.043
Yük 2	0.969	0.694	0.905	0.039
Yük 3	0.574	0.504	0.542	0.012
Yük 4	0.336	0.316	0.329	0.002
Yük 5	0.105	1.135×10^{-4}	0.049	0.015
Yük 6	0.036	0	0.017	0.005



Şekil 2.11: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 akımlarının I_4/I_1 histogramları.

Tablo 2.5: Yük akımlarının I_4/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

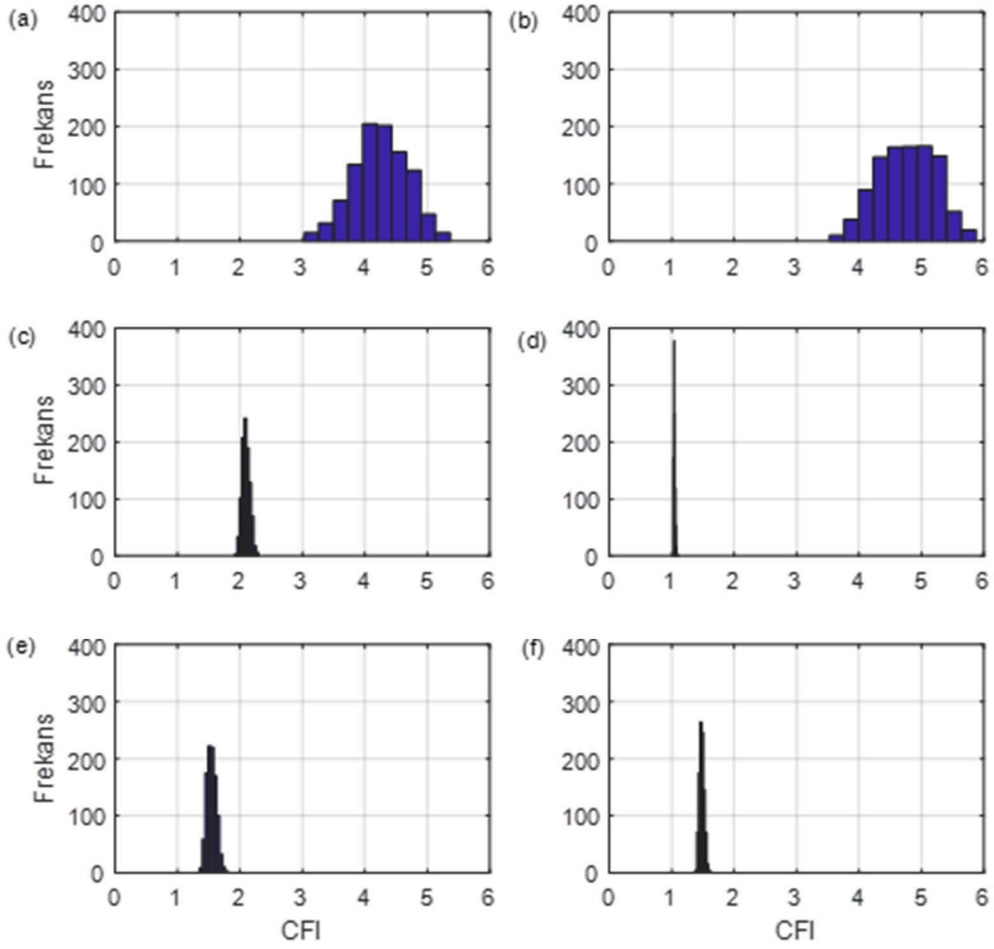
	En Yüksek Değer	En Düşük Değer	Ortalama Değer	Standart Sapma
Yük 1	0.855	0.005	0.366	0.210
Yük 2	0.943	0.464	0.830	0.068
Yük 3	0.013	2.696×10^{-4}	0.005	0.002
Yük 4	0.059	8.670×10^{-5}	0.008	0.007
Yük 5	0.025	6.092×10^{-6}	0.013	0.004
Yük 6	0.009	1.665×10^{-6}	0.005	0.001



Şekil 2.12: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 akımlarının I_5/I_1 histogramları.

Tablo 2.6: Yük akımlarının I_5/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

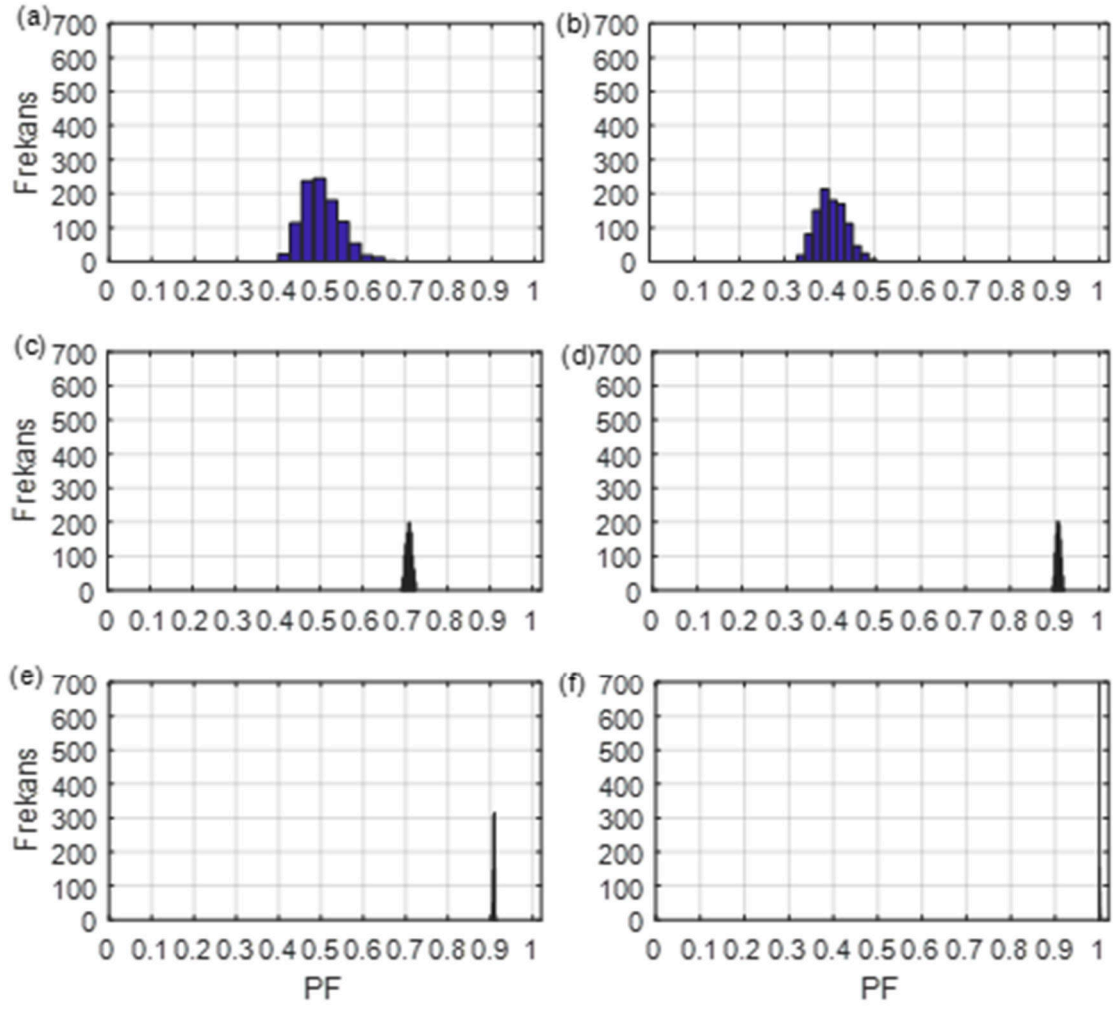
	En Yüksek Değer	En Düşük Değer	Ortalama Değer	Standart Sapma
Yük 1	0.926	0.277	0.757	0.108
Yük 2	0.911	0.216	0.742	0.098
Yük 3	0.226	0.138	0.182	0.015
Yük 4	0.200	0.180	0.196	0.002
Yük 5	0.104	1.546×10^{-5}	0.049	0.016
Yük 6	0.036	0	0.017	0.006



Şekil 2.13: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 akımlarının CFI histogramları.

Tablo 2.7: Yük akımlarının CFI histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

	En Yüksek Değer	En Düşük Değer	Ortalama Değer	Standart Sapma
Yük 1	5.367	3.027	4.247	0.434
Yük 2	5.874	3.524	4.763	0.463
Yük 3	2.298	1.912	2.095	0.062
Yük 4	1.106	1.030	1.046	0.009
Yük 5	1.814	1.347	1.546	0.074
Yük 6	1.642	1.375	1.482	0.039



Şekil 2.14: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6'nın PF histogramları.

Tablo 2.8: Yüklerin PF histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

	En Yüksek Değer	En Düşük Değer	Ortalama Değer	Standart Sapma
Yük 1	0.675	0.397	0.500	0.044
Yük 2	0.505	0.327	0.404	0.032
Yük 3	0.725	0.690	0.708	0.007
Yük 4	0.921	0.894	0.907	0.005
Yük 5	0.913	0.906	0.909	8.967×10^{-4}
Yük 6	1.000	1.000	1.000	0.000

Şekil 2.8 ve Tablo 2.2'den THDI değerlerinin, Yük 1 için %106.78 ile %222.36 arasında, Yük 2 için %156.72 ile %287.03, Yük 3 için %59.96 ile %67.00, Yük 4 için %40.19 ile %45.71, Yük 5 için %0.01 ile %15.13 ve Yük 6 için %0 ile %7.36 arasında değiştiği görülmektedir. Yüklere ait THDI'ların ortalama ve standart sapma değerleri ise sırasıyla Yük 1 için %170.80 ile 19.30, Yük 2 için %215.11 ile 23.07, Yük 3 için %63.69 ile 1.17, Yük 4 için 44.59 ile 0.42, Yük 5 için 11.10 ile 1.26 ve Yük 6 için 5.84 ile 0.56'dır.

Şekil 2.9 ve Tablo 2.3'den I_2/I_1 değerlerinin, Yük 1 için 0.964 ile 0.002, Yük 2 için 0.988 ile 0.879, Yük 3 için 0.010 ile 5.570×10^{-5} , Yük 4 için 0.059 ile 4.371×10^{-5} , Yük 5 için 0.033 ile 1.541×10^{-5} ve Yük 6 için 0.009 ile 0 arasında değiştiği görülmektedir. Yüklere ait I_2/I_1 oranının ortalama ve standart sapma değerleri ise sırasıyla Yük 1 için 0.420 ile 0.253, Yük 2 için 0.963 ile 0.015, Yük 3 için 0.004 ile 0.002, Yük 4 için 0.007 ile 0.007, Yük 5 için 0.016 ile 0.005 ve Yük 6 için 0.004 ile 0.002'dir.

Şekil 2.10 ve Tablo 2.4'den I_3/I_1 değerlerinin, Yük 1 için 0.974 ile 0.703, Yük 2 için 0.969 ile 0.694, Yük 3 için 0.574 ile 0.504, Yük 4 için 0.336 ile 0.316, Yük 5 için 0.105 ile 1.135×10^{-4} ve Yük 6 için 0.036 ile 0 arasında değiştiği görülmektedir. Yüklere ait I_3/I_1 oranının ortalama ve standart sapma değerleri ise sırasıyla Yük 1 için 0.910 ile 0.043, Yük 2 için 0.905 ile 0.039, Yük 3 için 0.542 ile 0.012, Yük 4 için 0.329 ile 0.002, Yük 5 için 0.049 ile 0.015 ve Yük 6 için 0.017 ile 0.005'dir.

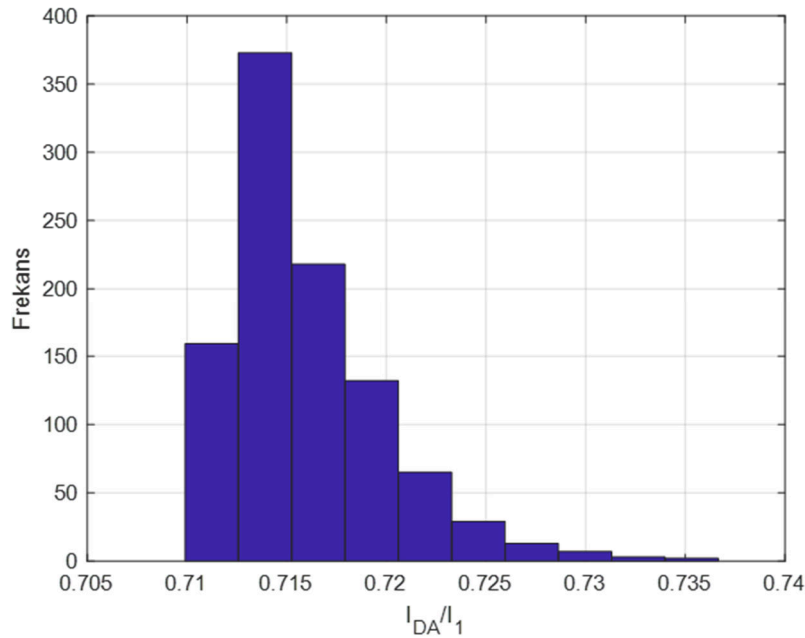
Şekil 2.11 ve Tablo 2.5'den I_4/I_1 değerlerinin, Yük 1 için 0.855 ile 0.005, Yük 2 için 0.943 ile 0.464, Yük 3 için 0.013 ile 2.696×10^{-4} , Yük 4 için 0.059 ile 8.670×10^{-5} , Yük 5 için 0.025 ile 6.092×10^{-6} ve Yük 6 için 0.009 ile 1.665×10^{-6} arasında değiştiği görülmektedir. Yüklere ait I_4/I_1 oranının ortalama ve standart sapma değerleri ise sırasıyla Yük 1 için 0.366 ile 0.210, Yük 2 için 0.830 ile 0.068, Yük 3 için 0.005 ile 0.002, Yük 4 için 0.008 ile 0.007, Yük 5 için 0.013 ile 0.004 ve Yük 6 için 0.005 ile 0.001'dir.

Şekil 2.12 ve Tablo 2.6'dan I_5/I_1 değerlerinin, Yük 1 için 0.926 ile 0.277, Yük 2 için 0.911 ile 0.216, Yük 3 için 0.226 ile 0.138, Yük 4 için 0.200 ile 0.180, Yük 5 için 0.104 ile 1.546×10^{-5} ve Yük 6 için 0.036 ile 0 arasında değiştiği görülmektedir. Yüklere ait I_5/I_1 oranının ortalama ve standart sapma değerleri ise sırasıyla Yük 1 için 0.757 ile 0.108, Yük 2 için 0.742 ile 0.098, Yük 3 için 0.182 ile 0.015, Yük 4 için 0.196 ile 0.002, Yük 5 için 0.049 ile 0.016 ve Yük 6 için 0.017 ile 0.006'dır.

Şekil 2.13 ve Tablo 2.7'den CFI değerlerinin, Yük 1 için 5.367 ile 3.027, Yük 2 için 5.874 ile 3.524, Yük 3 için 2.298 ile 1.912, Yük 4 için 1.106 ile 1.030, Yük 5 için 1.814 ile 1.347 ve Yük 6 için 1.642 ile 1.375 arasında değiştiği görülmektedir. Yüklere ait CFI oranının ortalama ve standart sapma değerleri ise sırasıyla Yük 1 için 4.247 ile 0.434, Yük 2 için 4.763 ile 0.463, Yük 3 için 2.095 ile 0.062, Yük 4 için 1.046 ile 0.009, Yük 5 için 1.546 ile 0.074 ve Yük 6 için 1.482 ile 0.039'dur.

Şekil 2.14 ve Tablo 2.8'den PF değerlerinin, Yük 1 için 0.675 ile 0.397, Yük 2 için 0.505 ile 0.327, Yük 3 için 0.725 ile 0.690, Yük 4 için 0.921 ile 0.894 ve Yük 5 için 0.913 ile 0.906 arasında değiştiği, Yük 6 için 1.000 değerinde sabit olduğu görülmektedir. Yüklere ait PF'nin ortalama ve standart sapma değerleri ise sırasıyla Yük 1 için 0.500 ile 0.044, Yük 2 için 0.404 ile 0.032, Yük 3 için 0.708 ile 0.007, Yük 4 için 0.907 ile 0.005, Yük 5 için 0.909 ile 8.967×10^{-4} ve Yük 6 için 1.000 ve 0'dır.

Buraya kadar sunulan istatistiksel analizlere ilaveten sadece Yük 2 için gözlemlenen DA bileşenin kaynak geriliminin bozulmasından etkilenme durumunu gösteren histogram Şekil 2.15' de verilmiştir.



Şekil 2.15: 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi altında Yük 2'ye ait DA akım bileşenin histogramı.

Bu histograma göre, I_{DA}/I_1 'in en yüksek, en düşük, ortalama ve standart sapma değerleri 0.736, 0.709, 0.716 ve 0.003'dür.

2.5 Sonuç

Bu bölümde, öncelikle tez kapsamında dikkate alınan ve sınıflandırmaya tabi tutulacak yükleri barındıran sistemin Matlab/SIMULINK ortamında modeli tanıtılmıştır. Modellenen sistemde 6 farklı yüke yer verilmiştir. Bu yükler sırasıyla, rezistif yük besleyen tam dalga doğrultucu (Yük 1), rezistif yük besleyen yarım dalga doğrultucu (Yük 2), rezistif yük besleyen AA kıyıcı veya dimmer devresi (Yük 3), batarya şarj eden tam dalga doğrultucu (Yük 4), daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motor (Yük 5) ve ısıtıcı yüküdür (Yük 6).

Devamında tanıtılan model yardımıyla sinüzoidal gerilim altında, sistemde var olan yüklerin akımlarına ait harmonik spektrumları, toplam harmonik bozulma (THDI) ve tepe faktörü (CFI) değerleri, temel frekans güç faktörü (DPF) ile güç faktörü (PF) indisleri yorumlanmıştır.

Son olarak, rassal şekilde türetilen farklı spektrumlarda ve toplam harmonik bozulma değerleri %3.99 ile %7.36 arasında değişen 1000 adet bozulmuş gerilim altında, yüklere ait akım harmonikleri ve diğer güç kalitesi indisleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Bu analizlerden elde edilen çıktılar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- İlk dört yük önemli derecede akım harmonik bozulmasına sahip olup bunların sinüzoidal gerilim altında toplam akım harmonik bozulma (THDI) değerleri sırasıyla %146, %207, %63 ve %45'tir.
- Yük 1, 3 ve 4'ün sinüzoidal gerilim altındaki karakteristik akım harmonikleri tek numaralı olup Yük 2'nin sinüzoidal gerilim altında çektiği akım hem tek hem de çift numaralı harmoniklere sahiptir.
- Bununla birlikte, Yük 2 diğer yüklerden farklı olarak yüksek değerde DA bileşenine ($I_{DA}/I_1=0.72$) de sahiptir.
- Diğer taraftan, Yük 5'in sinüzoidal gerilim altında çektiği akım ihmal edilebilir harmonik bozulmaya sahipken, Yük 6 saf rezistif bir yük olması sebebiyle sinüzoidal gerilim altında akımı sinüzoidal dalga formuna sahiptir.

- Modellenen yüklerin sinüzoidal gerilim altında sırasıyla akım tepe faktörü (CFI) değerleri 3.22, 4.37, 2.03, 1.05, 1.41 ve 1.41, temel frekans güç faktörü (DPF) değerleri 0.997, 0.993, 0.840, 0.995, 0.913 ve 1.000, güç faktörü (PF) değerleri ise 0.561, 0.413, 0.710, 0.908, 0.913 ve 1.000'dır. Bu sonuçlardan CFI ve PF indislerinin yükün cinsine göre önemli oranda farklı değerler aldıkları sonucuna varılmıştır.
- Ayrıca, kaynak geriliminin bozulmuş dalga formuna sahip olduğu durumlarda, tüm yüklerin THDI, akım harmonik spektrum, CFI ve PF değerlerinin değişim gösterdiği, bu değişimlerin özellikle de Yük 1 ve 2 için çok geniş aralıklarda olduğu ifade edilebilir.
- Bununla birlikte, Yük 1, 3 ve 4'ün sinüzoidal olmayan kaynak gerilimleri altında atipik olarak çift numaralı harmonik akımları çektiği görülmüştür.
- Sinüzoidal anma gerilim şartlarında ihmal edilebilir akım harmonik bozulmasına sahip daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun bozulmuş gerilimler altında THDI değeri %15 seviyesine ulaşmıştır.

3. YAPAY SİNİR AĞI TEMELLİ SINIFLANDIRMA MODELLERİ İÇİN ÖZELLİK SEÇİMİ VE VERİ ÖNİŞLEME ADIMLARI

Bu bölümde, ilk olarak Matlab/SIMULINK ortamında simülasyonla üretilmiş ve yapay sinir ağı (YSA) temelli sınıflandırma modelleri oluşturmak için Python'a aktarılmış olan veri seti tanıtılacaktır. İkinci olarak, tez kapsamında YSA modelleri oluşturmak için dikkate alınan özellik seçimi yöntemi hakkında bilgi verilecektir. Devamında, bu yöntem yardımıyla tespit edilen ve harmonik üreten yüklerin sınıflandırmasında diğerlerine göre daha anlamlı olan özellikler sunulacaktır. Son olarak, YSA modellerinin eğitim, test ve doğrulama süreçlerinde kullanılan verinin ön işleme adımlarından bahsedilecektir.

3.1 Veri Setinin Tanıtımı

Veri seti türetilirken aşağıdaki belirtilen adımlar sırasıyla uygulanmıştır:

- İlk adımda, Matlab/SIMULINK'te kurulan Şekil 2.2'deki sistem kullanılarak farklı harmonik bileşen genlikleri ve faz açılarına sahip rastgele türetilmiş, 1000 adet bozulmuş ve 1 adet sinüzoidal kaynak gerilimi için 6 farklı yükün akımları simüle edilmiştir,
- İkinci adımda, 1001 adet gerilim dalga formu için simüle edilen yük akımı ve gerilim harmonik bileşenlerinin fazör değerleri Matlab'de Workspace'e aktarılmıştır,
- Üçüncü adımda, dikkate alınan 1001 adet gerilim dalga formunun her birinde, yüklerin sistemde olup olmama durumuna göre 63 (2^6-1) farklı yük kombinasyonu için yük akımı harmoniklerinin fazör toplamından 63063 (1001×63) adet kaynak akımının harmonik bileşenleri türetilmiştir,
- Son adımda, 63063 kaynak gerilimi bozulma ve yük kombinasyonu durumu için elde edilen kaynak gerilimi ve kaynak akımı harmoniklerine dayanarak bölüm 2'de sunulan indisler hesaplanmıştır.

Yukarıda belirtilen adımlarla elde edilen veri setindeki özellikler ile bu özelliklerin açıklamaları, değer tipleri ve değişken tipleri Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1: Veri setinde bulunan özellikler, özelliklerin açıklamaları, özelliklerin değer tipleri ve özelliklerin değişken tipleri.

Özellik Adı	Özellik Açıklaması	Özellik Değer Tipi	Özellik Değişken Tipi
I_{DA}	Kaynaktan çekilen akımın DA bileşeni	Nümerik Özellik	Bağımsız
I_1, I_2, \dots, I_{20}	Kaynaktan çekilen akımın 1. ile 20. harmonik arası bileşenlerinin etkin değerleri	Nümerik Özellik	Bağımsız
I	Kaynaktan çekilen akımın toplam etkin değeri	Nümerik Özellik	Bağımsız
THDI	Kaynaktan çekilen akımın toplam harmonik bozulma değeri	Nümerik Özellik	Bağımsız
DPF	Yük kombinasyonunun temel frekans güç faktörü	Nümerik Özellik	Bağımsız
PF	Yük kombinasyonunun güç faktörü	Nümerik Özellik	Bağımsız
CFI	Kaynaktan çekilen akımın tepe faktörü	Nümerik Özellik	Bağımsız
V_1, V_2, \dots, V_{20}	Kaynak geriliminin 1. ile 20. harmonik arası bileşenlerinin etkin değerleri	Nümerik Özellik	Bağımsız
V	Kaynak geriliminin toplam etkin değeri	Nümerik Özellik	Bağımsız
THDV	Kaynak geriliminin toplam harmonik bozulma değeri	Nümerik Özellik	Bağımsız
CFV	Kaynak geriliminin tepe faktörü	Nümerik Özellik	Bağımsız
$S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$	Sırasıyla 1. yükten 6. yüke kadar yüklerin sistemde var veya yok olduğunu belirten model çıkışları	Kategorik Özellik	Bağımlı

Tablo 3.1’den görüleceği üzere, türetilen veri kümesinde 49 adet nümerik giriş özelliği ve 6 adet kategorik çıkış özelliği için toplam 55 sütun mevcuttur. Bu sütunlardaki satır sayısı 63063’tür.

3.2 Özellik Seçim Yöntemi ve Elde Edilen Anlamli Özellikler

Tez kapsamında çalışılan YSA temelli sınıflandırma modellerinin olabildiğince az sayıda giriş parametresiyle (verisiyle) başarılı bir performans gösterebilmesi için anlamlı özelliklerin belirlenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu doğrultuda, Tablo 3.1’de verilen indislerden anlamlı özellik çıkarımı için Pearson korelasyon analizi uygulanmıştır. Korelasyon analizi, iki değişken (özellik) arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [49].

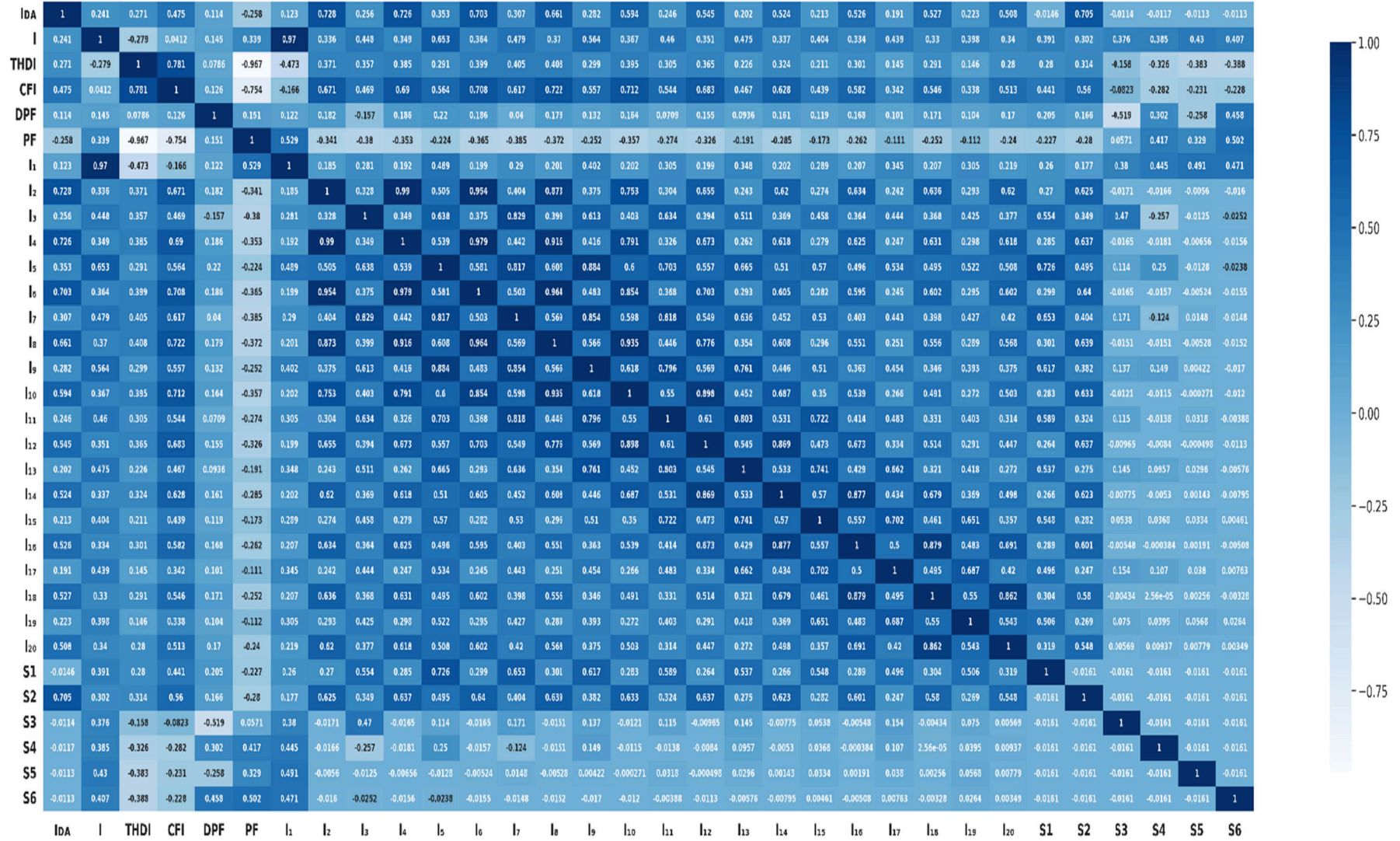
Tez kapsamında elde edilen veri üzerinde Pearson korelasyon analizini uygularken öncelikle bir korelasyon matrisi oluşturulmuştur. Bu matris hakkında kısaca bilgi vermek gerekirse; matristeki korelasyon katsayıları -1 ve 1 aralığında değişir. 1’e yaklaşan değerler doğru yönlü ilişkiyi, -1’e yaklaşan değerler ters yönlü ilişkiyi, 0 değeri ise ilişkinin olmadığını ifade eder [49]. Pearson korelasyonu katsayı hesaplama formülü Denklem 3.1’de verilmiştir [49]:

$$r = \frac{\sum(X_t - \bar{X})(Y_t - \bar{Y})}{\sqrt{[\sum(X_t - \bar{X})^2][\sum(Y_t - \bar{Y})^2]}} \quad (3.1)$$

Bu denklemde, r korelasyon katsayısını, X_t t anındaki X değişkeninin değerini, Y_t t anındaki Y değişkeninin değerini, \bar{X} ; X değişkeninin ortalamasını ve \bar{Y} ; Y değişkeninin ortalamasını temsil eder.

Yukarıda kısaca özetlenen yaklaşımla ilk olarak, 49 adet giriş özellik verisi ile 6 adet çıkış verisi arasında mutlak korelasyon değerlerine bakılmıştır. Buna göre her özellik verisinin çıkış verileriyle arasındaki mutlak korelasyon değerleri incelenmiştir. İkinci olarak, 0.2 bir eşik değer olarak tanımlanmış ve çıkış ile mutlak korelasyon değeri 0.2'den yüksek olan giriş verileri özellik olarak seçilmiştir. Böylece, ilk özellik eleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Devamında elde kalan özellikler için Pearson korelasyonu ısı haritası oluşturulmuştur (Şekil 3.1'e bakınız). Bunun sonucunda, çıkış verileriyle korelasyonu 0.2 ve üzeri olan özellikler arasındaki önem dereceleri karşılaştırmalı olarak görülebilir hale gelmiştir. Sonrasında, veri setinin karmaşık hale gelmesini önlemek amacıyla yüksek korelasyona sahip özelliklerin belirlenmesi için bir eliminasyon daha uygulanmıştır. Bu doğrultuda, haritadaki özelliklerin kendi aralarındaki ilişkiler incelenmiş ve bu ilişkiler arasında mutlak olarak 0.8'e eşit veya yüksek olanlar (aralarında yüksek korelasyona sahip olanlar) belirlenmiştir.



Şekil 3.1: İlk özellik eleme yönteminden sonra elde edilen özellik kümesinin Pearson korelasyonu ısı haritası.

Son olarak, birbirleriyle yüksek korelasyona sahip olan özelliklerden 6 adet çıkış değişkenleriyle arasındaki mutlak korelasyon değerlerinin ortalaması daha yüksek olan özellikler, daha anlamlı kabul edilerek özellik setine dahil edilmiştir. Bir başka ifadeyle, aralarındaki ilişki yüksek olan giriş verilerinden, çıkış verileriyle ortalama mutlak korelasyonu daha düşük olanlar veri setinden çıkarılmıştır.

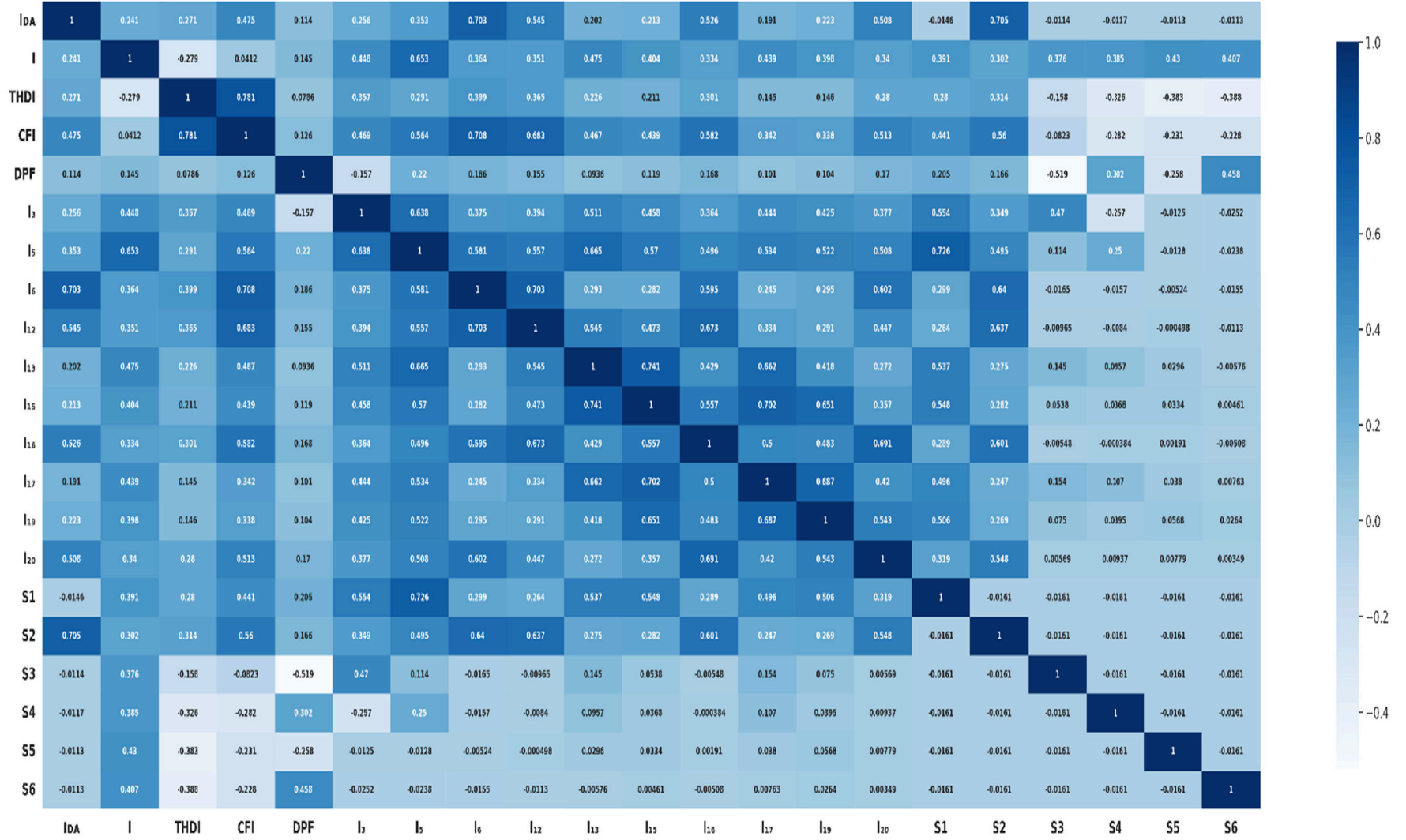
Bu yöntemin uygulanma adımları detaylı olarak maddeler halinde aşağıda verilmiştir:

- THDI ve PF arasındaki korelasyonun -0.97 olduğu görülmüştür; THDI ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değeri, PF ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değerine göre daha yüksek olduğu için PF veri setinden çıkartılmıştır.
- I_1 ile I arasındaki korelasyonun 0.97 olduğu görülmüştür; I ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değeri, I_1 ile çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değerine göre daha yüksek olduğu için I_1 veri setinden çıkartılmıştır.
- I_2 ile I_4 arasındaki korelasyonun 0.99 olduğu görülmüştür; I_4 ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değeri, I_2 ile çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değerine göre daha yüksek olduğu için I_2 veri setinden çıkartılmıştır.
- I_4 ile I_6 arasındaki korelasyonun 0.98 olduğu görülmüştür; I_6 ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değeri, I_4 ile çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değerine göre daha yüksek olduğu için I_4 veri setinden çıkartılmıştır.
- I_6 ile I_8 arasındaki korelasyonun 0.96 olduğu görülmüştür; I_6 ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değeri, I_8 ile çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değerine göre daha yüksek olduğu için I_8 veri setinden çıkartılmıştır.
- I_6 ile I_{10} arasındaki korelasyonun 0.85 olduğu görülmüştür; I_6 ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değeri, I_{10} ile çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değerine göre daha yüksek olduğu için I_{10} veri setinden çıkartılmıştır.
- I_3 ile I_7 arasındaki korelasyonun 0.83 olduğu görülmüştür; I_3 ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değeri, I_7 ile çıkışlar arasındaki mutlak

korelasyonların ortalama değerine göre daha yüksek olduğu için I_7 veri setinden çıkartılmıştır.

- I_5 ile I_9 arasındaki korelasyonun 0.88 olduğu görülmüştür; I_5 ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değeri, I_9 ile çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değerine göre daha yüksek olduğu için I_9 veri setinden çıkartılmıştır.
- I_{11} ile I_{13} arasındaki korelasyonun 0.8 olduğu görülmüştür; I_{13} ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değeri, I_{11} ile çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değerine göre daha yüksek olduğu için I_{11} veri setinden çıkartılmıştır.
- I_{12} ile I_{14} arasındaki korelasyonun 0.87 olduğu görülmüştür; I_{12} ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değeri, I_{14} ile çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değerine göre daha yüksek olduğu için I_{14} veri setinden çıkartılmıştır.
- I_{16} ile I_{18} arasındaki korelasyonun 0.88 olduğu görülmüştür; I_{16} ve çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değeri, I_{18} ile çıkışlar arasındaki mutlak korelasyonların ortalama değerine göre daha yüksek olduğu için I_{18} veri setinden çıkartılmıştır.

Yukarıdaki adımlar neticesinde elde edilen anlamlı özellik kümesinin son hali için oluşturulan Pearson korelasyonu ısı haritası Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu ısı haritasında I_{DA} , I , $THDI$, CFI , DPF , I_3 , I_5 , I_6 , I_{12} , I_{13} , I_{15} , I_{16} , I_{17} , I_{19} ve I_{20} olmak üzere 15 özelliğin birbirleri arasındaki korelasyon seviyeleri görülmektedir. Yük sınıflandırması amacıyla önerilecek YSA temelli modellerin oluşturulması için bu özelliklerin veri kümesine dahil edilesine karar verilmiştir.

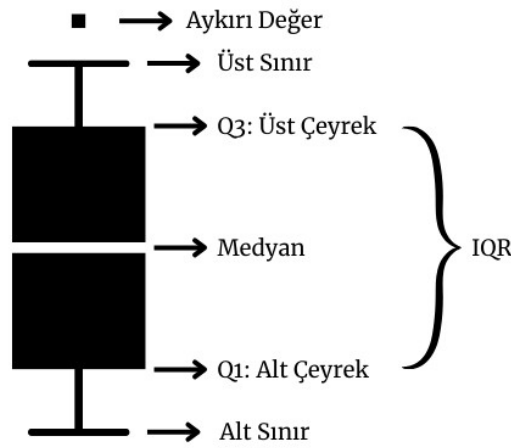


Şekil 3.2: Anlamli özellik kümesinin son hali için Pearson korelasyonu ısı haritası.

3.3 Veri Önışleme Adımları

Eldeki verilerden tutarlı bir değerlendirme sonucu elde edebilmek için eksik, veri kümesinin tutarsız veya aykırı (diğerlerinden çok önemli oranda farklı) değerlerden temizlenmesi gereklidir [50]. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, öncelikle veri setinde sonsuz (Inf) veya tanımsız veri (NaN) değer kontrolleri yapılmıştır.

Devamında, veri setinde aykırı değerler tespit edilip temizlenmiştir. Aykırı değerleri tespit etmek amacıyla kutu grafiği yöntemi kullanılmıştır. Kutu grafiği (box-plot) yöntemini izah eden şematik Şekil 3.3’de verilmiştir [50].



Şekil 3.3: Aykırı değer tespitinde kullanılan kutu grafiği (box-plot) yöntemini izah eden şekil [50].

Buna göre veri setinde bulunan her bir özellik (sütun) için alt çeyreklik (Q1) ve üst çeyreklik (Q3) değerleri belirlenmiştir. Q3 ve Q1 değerlerinden Denklem 3.2 ifadesiyle çeyrekler açıklığı (IQR) hesaplanmıştır. Bu hesaplanan IQR’ın 1.5 katı Q1’den çıkartılarak alt sınır, yine IQR’ın 1.5 katı Q3’e eklenerek üst sınır belirlenmiştir. Bu sınır değerler arasında yer almayan değerlere sahip veri hücreleri aykırı değer olarak kabul edilerek veri setinden çıkarılmıştır [50].

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (3.2)$$

Yapılan işlemden 63063 satırdan 1433 satır çıkartılmıştır.

3.4 Sonuç

Bu bölümde, ilk olarak Matlab/SIMULINK ortamında simülasyonla üretilen ve YSA modellerinin oluşturulduğu Python'a aktarılan veri seti tanıtılmıştır. Başlangıç veri setinde çeşitli güç kalitesi indislerini barındıran 49 adet nümerik giriş özelliği ve 6 adet kategorik çıkış özelliği için toplam 55 sütun bulunmaktadır. Ayrıca veri setinde, rastgele türetilen 1001 adet gerilim dalga formunun her birinde, yüklerin sistemde olup olmama durumuna göre 63 (2^6-1) farklı yük kombinasyonu için hesaplanan 63063 (1001×63) adet özellik değeri satır verisi olarak yer almaktadır.

İkinci olarak, tez kapsamında YSA modeli oluşturmak için dikkate alınan özellik seçimi yöntemi hakkında bilgi verilmiştir. Devamında, bu yöntem yardımıyla elde edilen ve diğer özelliklere göre daha anlamlı bulunan özellikler, I_{DA} , I, THDI, CFI, DPF, I_3 , I_5 , I_6 , I_{12} , I_{13} , I_{15} , I_{16} , I_{17} , I_{19} ve I_{20} olarak belirlenmiştir.

Son olarak, YSA modellerinin eğitilmesi ve testi için kullanılacak verinin ön işleme adımları oluşturulmuştur. Bu adımlara göre veri setinde olan sonsuz (Inf) ve tanımsız (NaN) değerlerin bulunduğu satırlar çıkarıldıktan sonra, kutu yöntemi uygulanmıştır. Bu iki aşama sonrasında, 63063 veri satırından aykırı değer barındıran 1433 satır çıkartılmıştır.

4. TEZ KAPSAMINDA DİKKATE ALINAN YSA MODELLERİ, EĞİTİM VE TEST AŞAMALARI

Bu bölümde, öncelikle YSA'lar hakkında kısa bir bilgi verildikten sonra, tez kapsamında dikkate alınan YSA yapıları ve bu yapıların eğitim ve test süreçlerinde uygulanan yöntemler sunulacaktır.

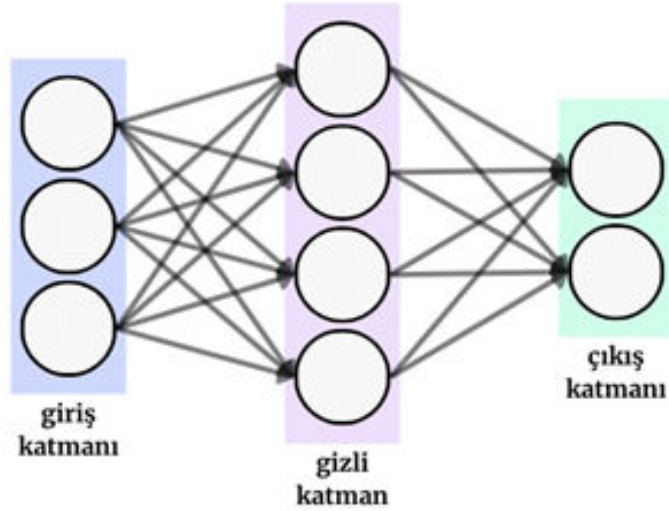
4.1 YSA Modelleri Hakkında Genel Bilgi

YSA, insan beyninde bulunan biyolojik/doğal nöronlardan ilham alınarak geliştirilen modellerdir. Biyolojik nöronlarda olduğu gibi YSA'da bulunan nöronlar da birbirlerine bağlıdır. Yapay nöronlar sayesinde, YSA modellerindeki çıktılar girdilerin bir fonksiyonu olarak ifade edilir [51]-[53]. Her bir yapay nöronda, girdi verisi, ağırlık ve bias gibi parametrelerle çarpma ve toplama işlemleri yapılır. Ayrıca, her yapay nöronun girdi verisine verdiği tepkiyi belirleyen bir aktivasyon fonksiyonu bulunur [52], [53]. Şekil 4.1'de YSA'da bulunan bir nöron yapısı gösterilmiştir [53].



Şekil 4.1: Yapay sinir ağında bulunan bir nöronun yapısı [53].

YSA'ların yapısında; giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç tip katman bulunabilir. YSA yapısında sadece giriş ve çıkış katmanları bulunduyorsa buna tek katmanlı YSA denir. YSA yapısında giriş katmanı, çıkış katmanı ve gizli katmanlar içeriyorsa buna çok katmanlı YSA denir [53]. Şekil 4.2'de üç katmanlı bir YSA modelinin yapısı gösterilmiştir [53].



Şekil 4.2: Örnek bir çok katmanlı YSA'nın yapısı [53].

Şekil 4.2'de sunulan YSA modeli, 3 giriş katmanı nöronuna, 4 gizli katman nöronuna ve 2 çıkış katmanı nöronuna sahiptir. Diğer bir deyişle, bu YSA modeli, iki çıkış parametresini üç giriş parametresi cinsinden ifade etmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, YSA'da bulunan nöronların birbirleriyle bağlantıları vardır ve bu bağlantılar sonucunda bir ağ yapısı oluşmaktadır.

Diğer taraftan, nöronlarda bulunan aktivasyon fonksiyonu YSA'ların modelleme kabiliyetini etkileyen bir öğedir [53], [54]. Bu tez kapsamında, literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak kullanılan sigmoid, ReLU ve tanh aktivasyon fonksiyonları modellemede dikkate alınmıştır [52], [53]. Bu üç aktivasyon fonksiyonunun özellikleri aşağıda kısaca sunulmuştur:

- Sigmoid aktivasyon fonksiyonu: Bu aktivasyon fonksiyonunun ifadesi Denklem (4.1)'de verilmiştir [52], [53]. Çıktısı 0 ile 1 arasında değer alır [53]:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} = \frac{e^x}{e^x + 1} \quad (4.1)$$

Sigmoid aktivasyon fonksiyonu, genellikle ikili (binary) sınıflandırma problemlerinde çıkış katmanlarında kullanılır [53].

- Tanh aktivasyon fonksiyonu: Tanh aktivasyon fonksiyonunun çıktısı -1 ile +1 arasında değerler alır [53]. Bu fonksiyonunun ifadesi Denklem 4.2’de verilmiştir [52], [53]:

$$f(x) = \frac{(e^x - e^{-x})}{(e^x + e^{-x})} = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (4.2)$$

Tanh aktivasyon fonksiyonu, doğrusal olmayan ve türevlenebilir bir fonksiyondur. Genelde ikili (binary) sınıflandırma problemlerinde gizli katmanlarda tercih edilmektedir [53].

- ReLU aktivasyon fonksiyonu: ReLU aktivasyon fonksiyonunda, eğer giriş sıfırdan küçük veya eşitse çıkış sifıra eşittir ve eğer giriş sıfırdan büyükse çıkış girişe eşittir. ReLU aktivasyon fonksiyonunun ifadesi Denklem 4.3’de verilmiştir [52]:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ x, & x > 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

ReLU aktivasyon fonksiyonu 0 ile ∞ arasında değerler üretebilmektedir [53].

4.2 Tez Kapsamında Önerilen YSA Modelleri

Literatürdeki çalışmalarla [55], [56] uyumlu olarak, eldeki verilerin %30’unun test veri seti, geri kalan %70’inin ise eğitim veri seti olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Bu ayırma işlemi gerçekleştirilirken farklı çalıştırma zamanlarında aynı veri seti rastgeleliğini korumak amacıyla sabit bir rassal durum (random state) değeri belirlenmiştir.

Bu tezde çalışılan YSA modelleri, Tip 1 YSA modeli (1 gizli katmanlı) ve Tip 2 YSA modeli (2 gizli katmanlı) olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu yapılarda, veri setinde 15 adet özellik (bağımsız değişken) bulunması sebebiyle, giriş katmanında 15 nöron bulunmaktadır. YSA modeliyle 6 farklı yükün sınıflandırılması hedeflendiği için çıkış katmanında 6 nöron bulunmaktadır. Çıkışlar ilgili yükün sistemde olup olmadığını gösteren 0 ve 1 değerlerini alırlar. Buna göre, çıkışlardan birinin 0 değer olması durumunda bu çıkışa karşılık gelen yükün sistemde olmadığına, 1 değer alması durumunda ise çıkışa karşılık gelen yükün sistemde olduğuna karar verilir. Bundan dolayı, çıkış katmanında aktivasyon fonksiyonu olarak ikili (0 veya 1) sınıflandırmada kullanışlı olan sigmoid aktivasyon fonksiyonu tercih edilmiştir.

[57] ve [58] çalışmalarında, gizli katman nöron sayısının belirlenmesi için (i) gizli katman nöron sayısı giriş ve çıkış katmanlarının boyutları arasında olmalı ve (ii) gizli katman nöron sayısı giriş katmanı boyutunun 2 katından küçük olmalı kuralları ifade edilmiştir. Bahse konu iki kural dikkate alınarak, bu çalışmada gizli katman nöron sayısı çıkış katmanı nöron sayısı olan 6 ve giriş katmanı nöron sayısının 2 katı olan 30 değerleri arasında sınırlandırılmıştır. Buna göre, bir gizli katmana sahip olan Tip 1 sınıfı YSA modellerinde gizli katman nöron sayısı 6'dan 30'a kadar parametrik olarak 4'er adımla artırılacaktır. İki gizli katmana sahip olan Tip 2 sınıfı YSA modellerinde ise gizli katman nöron sayıları yine 6'dan 30'a kadar parametrik olarak 4'er adımla artırılarak bu aralıkta olası tüm nöron sayısı çiftleri denenecektir.

Yukarıdaki belirtilen tasarım hususlarına ilaveten, gizli katmanlarda tanh, sigmoid ve ReLU aktivasyon fonksiyonlarının denenmesine karar verilmiştir. İki gizli katmanlı Tip 2 sınıfı YSA modellerinde gizli katmanlardaki aktivasyon fonksiyonları aynı türden tanımlanmıştır. Tasarlanan YSA modellerinin yapısal özellikleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de özetlenmiştir.

Tablo 4.1: Tip 1 YSA modellerinin yapısal özellikleri.

Katman	Sabit	Değişken
Giriş Katmanı	15 Giriş	
1. Gizli Katman		30, 26, 22, ..., 6 Nöron (tanh, sigmoid, ReLU)
Çıkış Katmanı	6 Çıkış (sigmoid)	

Tablo 4.2: Tip 2 YSA modellerinin yapısal özellikleri.

Katman	Sabit	Değişken
Giriş Katmanı	15 Giriş	
1. Gizli Katman		30, 26, 22, ..., 6 Nöron (tanh, sigmoid, ReLU)
2. Gizli Katman		30, 26, 22, ..., 6 Nöron (tanh, sigmoid, ReLU)
Çıkış Katmanı	6 Çıkış (sigmoid)	

Tablo 4.2’de verilen YSA’lar yoğun (dense) ağ yapısında [59] modellenmiştir. Çalışılan modellerde katmanlar arasındaki bağlantının ifadesi Denklem 4.4’de verilmiştir. Bu denklemden görüldüğü üzere, sıralı YSA modelinde, her bir nöronun çıktısı bir ağırlık ile çarpılır, bir önyargı (bias) değeri ile toplanır ve seçilen aktivasyon fonksiyonundan geçirilir [53].

$$\text{Çıkış}_i^{(l)} = f \left(\sum_{j=1}^{n_{l-1}} \text{Çıkış}_j^{(l-1)} \times \text{Ağırlık}_{ij}^{(l)} + \text{Önyargı}_i^{(l)} \right) \quad (4.4)$$

Bu ifadede, $\text{Çıkış}_i^{(l)}$ katmanda bulunan i’inci nöronun çıktısını, f katman için seçilen aktivasyon fonksiyonunu, n_{l-1} bir önceki katmandaki nöron sayısını (giriş katmanında özelliklerin sayısı), $\text{Çıkış}_j^{(l-1)}$ bir önceki katmanda bulunan j’inci nöronun çıktısını, $\text{Ağırlık}_{ij}^{(l)}$ bir önceki katmanda bulunan j’inci nöron ile katmanda bulunan i’inci nöron arasındaki bağlantı ağırlığını, $\text{Önyargı}_i^{(l)}$ katmanda bulunan i’inci nöronun önyargı (bias) değerini temsil etmektedir.

4.3 Önerilen YSA Modellerinin Eğitim Yöntemi

YSA’ları, öğrenme işleminden en iyi sonucu elde edebilmek için hata (loss) fonksiyonunun en düşük değerinin bulunması gerekir. Hata (loss) fonksiyonunun en düşük değerinin bulunması işlemi, optimizasyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir [60].

Bu tez çalışmasında, kayıp fonksiyonunu en düşük seviyeye indirgeyebilmek için kullanılan modelin derlenmesi aşamasında gradient tabanlı bir optimizasyon algoritması olan ve öğrenme hızı ile momentumu adaptif olarak ayarlayan Adam optimizasyonu kullanılmıştır [60]. Adam optimizasyon algoritmasının model parametrelerini (ağırlıklar ve önyargılar) güncellerken kullanmış olduğu ifadeler Denklem 4.5-4.9’da verilmiştir [60]:

$$m_t = \beta_1 \times m_{t-1} + (1 - \beta_1) \times g_t \quad (4.5)$$

$$v_t = \beta_2 \times v_{t-1} + (1 - \beta_2) \times g_t^2 \quad (4.6)$$

$$\hat{m}_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t} \quad (4.7)$$

$$\hat{v}_t = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \quad (4.8)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{\hat{v}_t + \epsilon}} \times \hat{m}_t \quad (4.9)$$

m_t ve v_t sırasıyla momentum ve ikinci momentum terimlerini, g gradyan vektörünü, β_1 ve β_2 birinci ve ikinci momentum terimlerinin üstel hareketli ortalamaları için düzeltme faktörünü, t güncelleme zaman adımını, ϵ sıfıra bölme hatasını önlemek amacıyla kullanılan çok küçük bir değeri, θ_t t zaman adımında modelin parametrelerini (ağırlıklar ve önyargılar), η öğrenme hızını temsil etmektedir.

Kayıp fonksiyonu kategorik çapraz entropi (categorical cross entropy), kosinüs yakınlığı (cosine similarity) ve ikili çapraz entropi (binary crossentropy) gibi çeşitleri bulunan, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde yapılan hatalı tahminlerin maliyetini (cost) gösteren bir fonksiyondur [61]. Bu tez çalışmasında, 6 adet çıkışın ikili (0 veya 1) değerleri alabilmesinden kaynaklı olarak kayıp fonksiyonu olarak, ikili çapraz entropi fonksiyonu kullanılmıştır. İkili çapraz entropi fonksiyonu, eğitim verisinde modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerleri arasındaki uzaklığa göre bir değerlendirme yapmaktadır. İkili çapraz entropi ifadesi, Denklem 4.10'da verilmiştir [61], [62]. Bu ifadeye göre, ikili çapraz entropi ile yapılan değerlendirmede, modelin doğru tahminlerde bulunması kayıp fonksiyonunun çıktısını düşürür. Buna karşılık, modelin yanlış tahminlerde bulunması kayıp fonksiyonunun çıktısını artırır.

$$\text{ikili çapraz entropi} \quad (4.10)$$

$$= - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \log(y_{\text{tahmin}}) + (1 - y_i) \log(1 - y_{\text{tahmin}})]$$

Bu ifadede, N örnek sayısını, y_i gerçek etiket değerini (1 veya 0), y_{tahmin} modelin tahmin ettiği etiket değerini (1 veya 0) temsil etmektedir.

Eğitim sürecinde, modelin doğru sınıflandırma oranını ölçmek ve böylece performansını değerlendirmek amacıyla Denklem 4.11'de verilen doğruluk (accuracy) indisi kullanılacaktır [36]:

$$\text{doğruluk} = \frac{\text{doğru sınıflandırma sayısı}}{\text{toplam veri sayısı}} \quad (4.11)$$

Eğitim süreci, Tablo 4.1 ve 4.2’de yapısal özellikleri özetlenen YSA modelleri için eldeki simülasyon verisinin %70’inin kullanılmasına karar verilmiştir. Eğitim, 200 devir (epochs) boyunca 8 yığın boyutu (batch size) kullanılarak gerçekleştirilecektir. Eğitimin her iterasyonunda, model parametreleri (ağırlıklar ve önyargılar) güncellenerek, kayıp fonksiyonu çıktısı ve doğruluk indisi hesaplanacak, bu şekilde eğitim süreci izlenecektir.

4.4 Önerilen YSA Modellerinin Test Yöntemi

Model test süreci eğitim sürecinin devamında gerçekleşir. Test için veri setinde bulunan ikili (0 veya 1) değere sahip 6 çıkışta sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu [0,1] aralığında olasılık değeri döndürmektedir. Denklem 4.12’den de görüleceği üzere, eşik değeri (0.5) olarak belirlenmiştir. Bu eşik değeri kullanılarak, sigmoid aktivasyon fonksiyonu çıkışı [0,1] aralığındaki olasılık değerinin ikili (0 veya 1) değerlerine dönüştürülmüştür. Eğer modelin çıkışından elde edilen olasılık değeri 0.5’ten büyük veya eşit ise 1 olarak işaretlenmiş, değilse 0 ile işaretlenmiştir. Böylece, test veri seti için sigmoid aktivasyon fonksiyonu çıkışları ikili (0 veya 1) durumuna getirilmiştir [63]:

$$\begin{cases} y_i = 1, & \text{eğer } y_{\text{tahmin}} \geq 0.5 \\ y_i = 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (4.12)$$

Denklem (4.12)’de yer alan y_{tahmin} terimi; sigmoid aktivasyon fonksiyonu çıkışını yani tahmin edilen olasılık değerini, y_i ise sigmoid aktivasyon fonksiyonu çıkışının ikili (0 veya 1) değerine dönüştürülmüş halini temsil etmektedir.

Test verilerinden sigmoid aktivasyon fonksiyonu ile elde edilen çıkışlar, eşik değeri kullanılarak ikili (0 veya 1) değerlere dönüştürülmüştür. Dönüştürülen bu çıkışlar, gerçek değerler (0 veya 1) ile karşılaştırılarak sınıflandırma performansı 4 farklı değerlendirme metriği kullanılarak analiz edilmiştir. Sınıflandırma problemlerinde genellikle kullanılan bu metrikler; doğruluk (accuracy), duyarlılık (recall), hassasiyet (precision) ve F1 skoru olarak sıralanmıştır [36]. Her bir metriğin matematiksel ifadeleri, Denklem 4.13 ile Denklem 4.16 arasında verilmiştir:

$$\text{doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (4.13)$$

$$\text{duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4.14)$$

$$\text{hassasiyet} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4.15)$$

$$f1 \text{ skoru} = 2 \times \frac{\text{hassasiyet} \times \text{duyarlılık}}{\text{hassasiyet} + \text{duyarlılık}} \quad (4.16)$$

İndislerin ifadelerinde yer alan, *TP* (True Positive), gerçek pozitif sayısını temsil etmektedir. Gerçek pozitif, 1 ve 0 etiketlerinden 1'in yani pozitifin doğru tahmin edilme sayısıdır. *TN* (True Negative), gerçek negatif sayısını temsil etmektedir. 1 ve 0 etiketlerinden 0'ın yani negatifin doğru tahmin edilme sayısıdır. *FP* (False Positive), yanlış pozitif sayısını temsil etmektedir. 1 ve 0 etiketlerinden 1'in yani pozitifin yanlış tahmin edilme sayısıdır. *FN* (False Negative), yanlış negatif sayısını temsil etmektedir. 1 ve 0 etiketlerinden 0'ın yani negatifin yanlış tahmin edilme sayısıdır. *TP*, *TN*, *FP* ve *FN* sayılarının bir arada sunulduğu ve birlikte değerlendirilebildiği matris ise karmaşıklık matrisi (confusion matrix) olarak literatürde isimlendirilmektedir [64] (Şekil 4.3'e bakınız).

Gerçek Etiket	TN	FP
	FN	TP
	Tahmin Edilen Etiket	

Şekil 4.3: Karmaşıklık matrisi.

4.5 Sonuç

Bu bölümde, öncelikle YSA'lar hakkında kısa bir bilgi verildikten sonra, tez kapsamında dikkate alınan YSA yapıları ve bu yapıların eğitim ve test süreçlerinde uygulanan yöntemler sunulmuştur.

Bu bölümün önemli çıktılarından ilki, tez kapsamında çalışılan YSA modellerinin tasarım kurallarıdır. Tasarım kuralları;

- Harmonikli yük sınıflandırma için önerilecek YSA modellerinin farklı kombinasyonlar ile denenmesi, buna göre Tip 1 YSA modelinin 1 giriş katmanı, 1 gizli katman ve 1 çıkış katmanından oluşması ve Tip 2 YSA modelinin 1 giriş katmanı, 2 gizli katman ve 1 çıkış katmanından oluşması,
- Bu YSA modellerinin giriş sayısının 15 ve çıkış sayısının 6 olması,
- Çıkış katmanında aktivasyon fonksiyonu olarak ilgili yüklerin sistemde var olup olmadığını ifade eden ikili (0 veya 1) sınıflandırmaya uygun olan sigmoid aktivasyon fonksiyonunun kullanımı,
- Tip 1 YSA modellerinde gizli katmandaki nöron sayısının 6 ile 30 arasında 4'er adım aralıklarla artırılarak denenmesi,
- Tip 2 YSA modelinde 1. ve 2. gizli katmanlardaki nöron sayılarının 6 ile 30 arasında 4'er adım artırılarak taranması ve bu aralıkta olası tüm nöron sayısı çiftlerinin göz önüne alınması,
- Tip 1 YSA modelinde gizli katmanda tanh, sigmoid ve ReLU aktivasyon fonksiyonlarının denenmesi,
- Tip 1 YSA gizli katmanında dikkate alınan aktivasyon fonksiyonlarının Tip 2 YSA gizli katmanlarında da dikkate alınmasıdır (tanh-tanh, sigmoid-sigmoid, ReLU-ReLU).

YSA modellerinin eğitimi ve testi için izlenecek yöntemlere ilişkin belirlenen önemli hususlar ise aşağıda sıralanmıştır:

- Kayıp (Hata) fonksiyonunu en düşük seviyeye indirgeyebilmek için Adam optimizasyon yöntemi uygulanacaktır.
- 6 adet çıkışın ikili (0 veya 1) değerleri alabilmesi sebebiyle kayıp fonksiyonu olarak, ikili çapraz entropi fonksiyonu belirlenmiştir.

- Eğitim sürecinde, modelin doğru sınıflandırma oranını ölçmek ve model performansını değerlendirebilmek için doğruluk (accuracy) indisleri tercih edilecektir.
- Eğitim, 200 devir (epochs) boyunca 8 yığın boyutu (batch size) kullanılarak gerçekleştirilecektir.
- Sigmoid aktivasyon fonksiyonu çıkışı $[0,1]$ aralığındaki olasılık değerini, ikili (0 veya 1) değerlerine dönüştürebilmek için eşik değeri 0.5 olarak belirlenmiştir.
- Test aşamasında, doğruluk, duyarlılık, hassasiyet ve f1 skoru indisleri ile karmaşıklık matrisleri performans değerlendirme aracı olarak kullanılacaktır.

5. ÖNERİLEN YSA MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Bu tez çalışmasında dikkate alınan YSA modellerinin katman yapıları, bir önceki bölümde belirtildiği üzere;

- Tip 1 sınıfı YSA modelleri için 1 giriş katmanı, 1 gizli katman ve 1 çıkış katmanı,
- Tip 2 sınıfı YSA modelleri için 1 giriş katmanı, 2 gizli katman ve 1 çıkış katmanı, şeklindedir.

Bununla birlikte, her iki model tipinin gizli katmanlarında, tanh, sigmoid ve ReLU olmak üzere 3 farklı aktivasyon fonksiyonunun uygulanmasına karar verilmiştir. Çıkış katmanlarında ise sigmoid aktivasyon fonksiyonu sabit tutulmuştur. Böylece her iki YSA modelinde, aktivasyon fonksiyonuna göre üçer alt tip model daha tasarlanmıştır.

Ayrıca, Tip 1 ve Tip 2 YSA modellerinin tümünde, gizli katman nöron sayıları; çıkış katmanı nöron sayısı olan 6'dan, giriş katmanı nöron sayısının 2 katı olan 30'a kadar 4'er adımlarla artırılarak, çok sayıda gizli katman nöron sayıları için eğitimler gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

Bu bölümde ise yukarıda belirtilen hususlar doğrultusunda doğruluk, duyarlılık, hassasiyet ve fl skoru indislerinin yanı sıra karmaşıklık matrisleri dikkate alınarak,

- Sırasıyla, tanh, sigmoid ve ReLU aktivasyon fonksiyonuna sahip Tip 1 ve Tip 2 YSA modelleri için nöron sayılarının performansa etkisi analiz edilecek ve devamında en iyi (optimal) nöron sayıları belirlenecek,
- Daha sonra bu üç farklı aktivasyon fonksiyonu için elde edilen en iyi modellerin performansları kendi aralarında değerlendirilecek ve aktivasyon fonksiyonu tipinin Tip 1 ve Tip 2 YSA modellerinin performansına etkisi yorumlanacak,
- Nihayetinde tüm denenen YSA modelleri arasında en iyi performansa sahip olan belirlenecektir.

5.1 Tip 1 Sınıfı YSA Modelleri için En İyi Nöron Sayısının Belirlenmesi

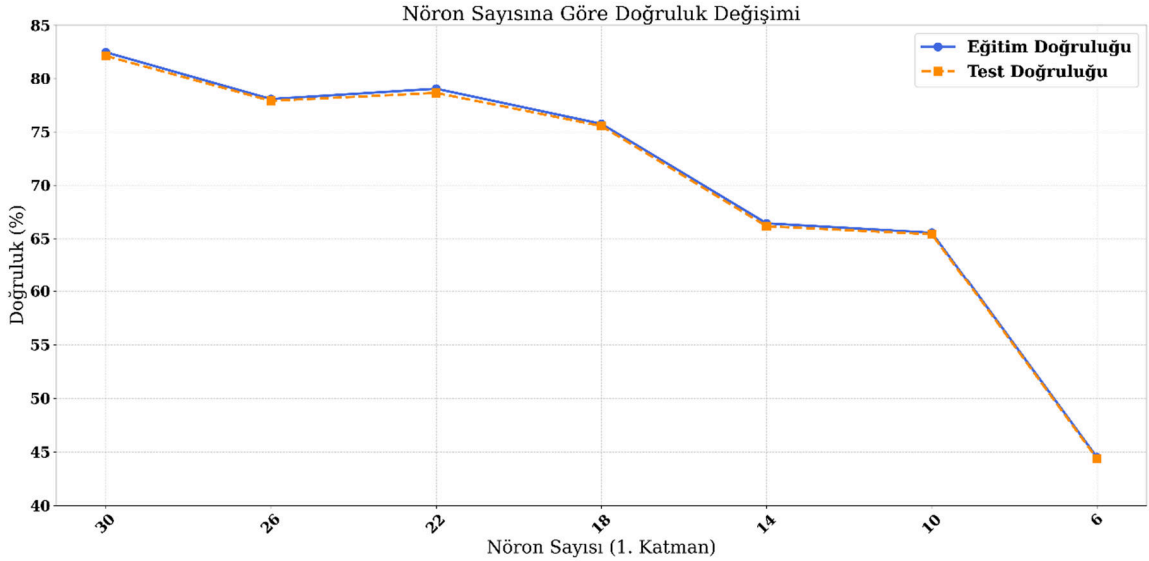
Bu kısımda, tek gizli katmana sahip Tip 1 sınıfı YSA modellerinin gizli katmanındaki nöron sayısının en uygun değeri, önceki bölümde belirtilen performans göstergeleri dikkate alınarak parametrik analizlerle belirlenecektir. Analizlerde, Tip 1 sınıfı YSA modelleri üç

alt tip olarak ele alınacaktır. Bunlar; gizli katmanında tanh aktivasyon fonksiyonu olan Tip 1-1 modeli, gizli katmanında sigmoid aktivasyon fonksiyonu olan Tip 1-2 modeli ve gizli katmanında ReLU aktivasyon fonksiyonu olan Tip 1-3 modelidir.

5.1.1 Tip 1-1 YSA Modeli

Tip 1-1 sınıfı YSA modellerinin nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinin doğruluk değişimi grafiği Şekil 5.1’de sunulmuştur.

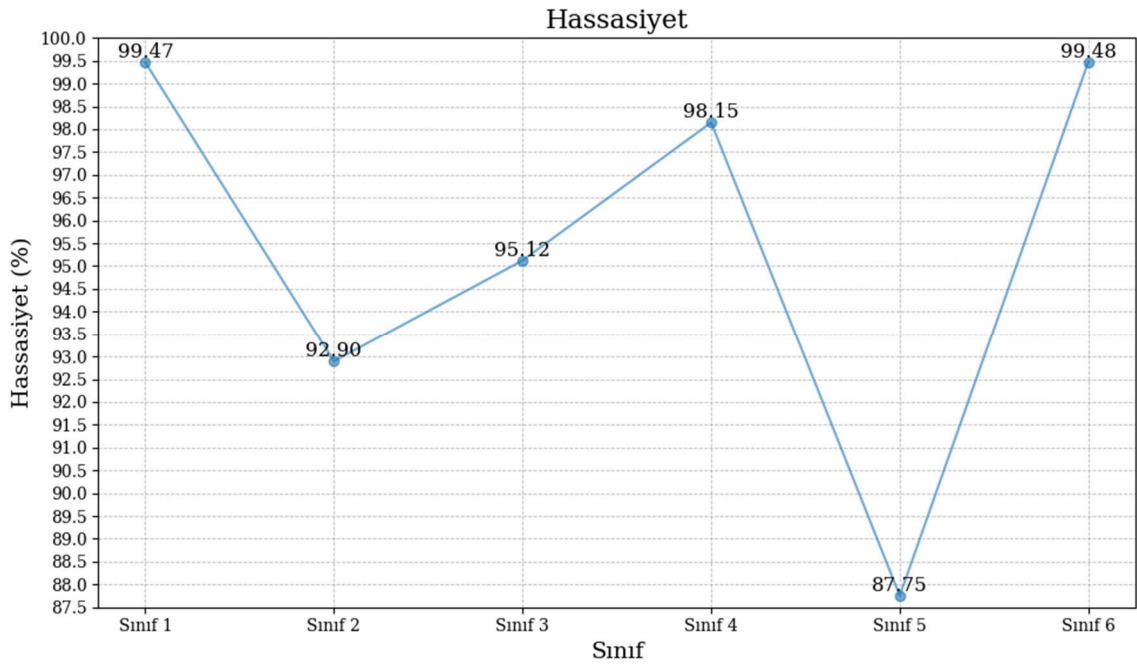
Şekil 5.1’e bakıldığında dikkate alınan nöron sayısı aralığı için modelin doğruluğunun eğitim ve test veri setlerinde yaklaşık olarak %44 ile %83 aralığında değiştiği görülmektedir. Nöron sayısına göre doğruluk değişiminin nöron sayısı arttıkça doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Aynı grafikten en yüksek doğruluğun gizli katmanda 30 nöronun olduğu durumda elde edildiği, en düşük doğruluğun ise aynı katmanda nöron sayısının 6 olduğu durum için gözlemlendiği ifade edilebilir.



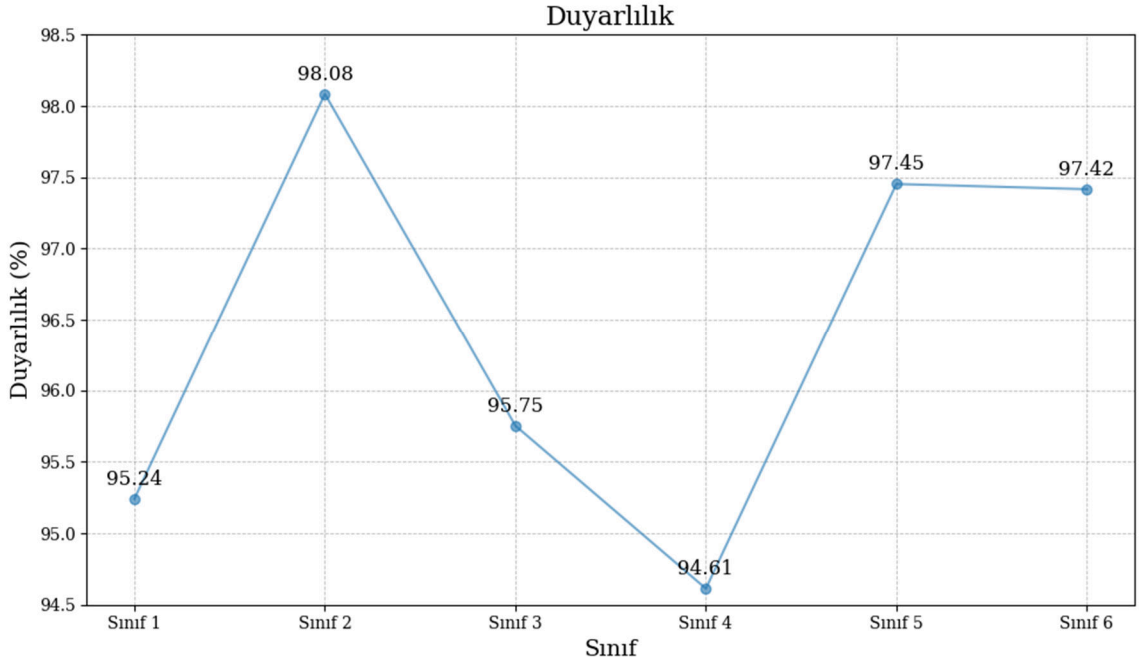
Şekil 5.1: Tip 1-1 YSA için gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.

En iyi nöron sayısına sahip Tip 1-1 YSA modelinde test veri setinde sırasıyla her bir yük sınıfı için hassasiyet, duyarlılık ve f1 skoru değerleri Şekil 5.2-Şekil 5.4 arasındaki şekillerde sunulmuştur. Bu şekiller incelendiğinde, en iyi doğruluktaki Tip 1-1 YSA modelinin (gizli katmanında 30 nöron bulunan), rezistif yük besleyen tam dalga doğrultucu (sınıf 1), rezistif yük besleyen yarım dalga doğrultucu (sınıf 2), rezistif yük besleyen AA

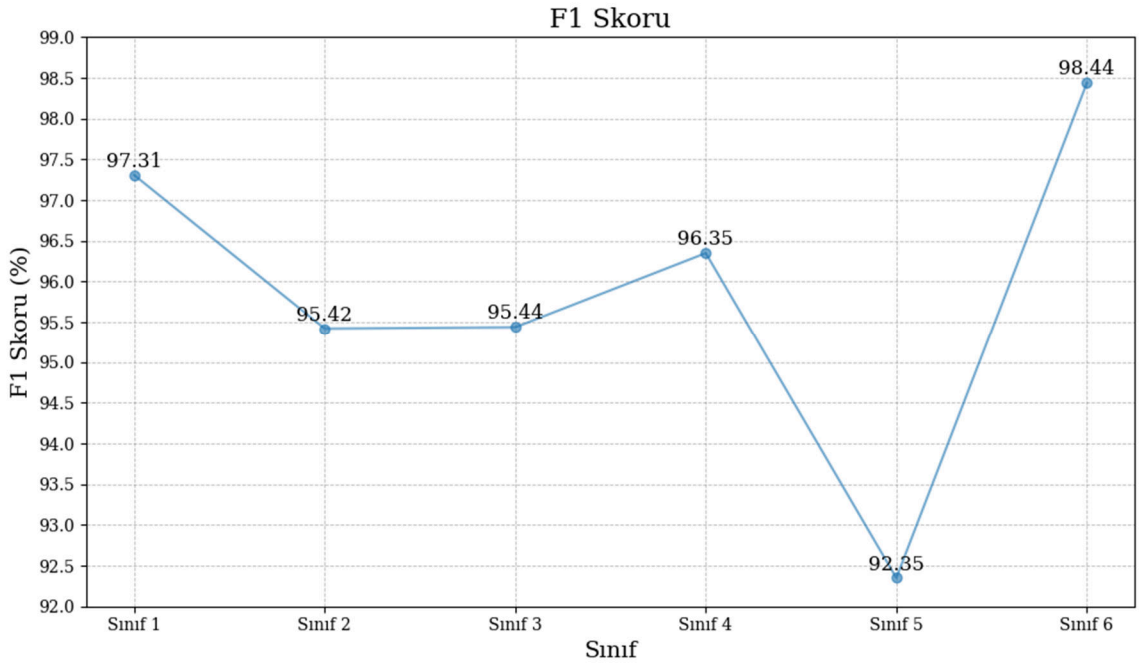
kıyıcı veya dimmer devresi (sınıf 3), batarya şarj eden tam dalga doğrultucu (sınıf 4), daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motor (sınıf 5) ve ısıtıcı (sınıf 6) yüklerin tespitinde test veri seti için hassasiyet değerlerinin sırasıyla %99.47, %92.90, %95.12, %98.15, %87.75 ve %99.48 olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı yük sıralaması için testlerde görülen duyarlılık değerleri %95.24, %98.08, %95.75, %94.61, %97.45 ve %97.42 ve fl skoru değerleri %97.31, %95.42, %95.44, %96.35, %92.35 ve %98.44'dür. Bu sonuçlardan, modelin 6. yük sınıfını tespit etmede en yüksek performansa ve 5. yük sınıfını tespit etmede ise en düşük performansa sahip olduğu belirtilebilir.



Şekil 5.2: En iyi Tip 1-1 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.

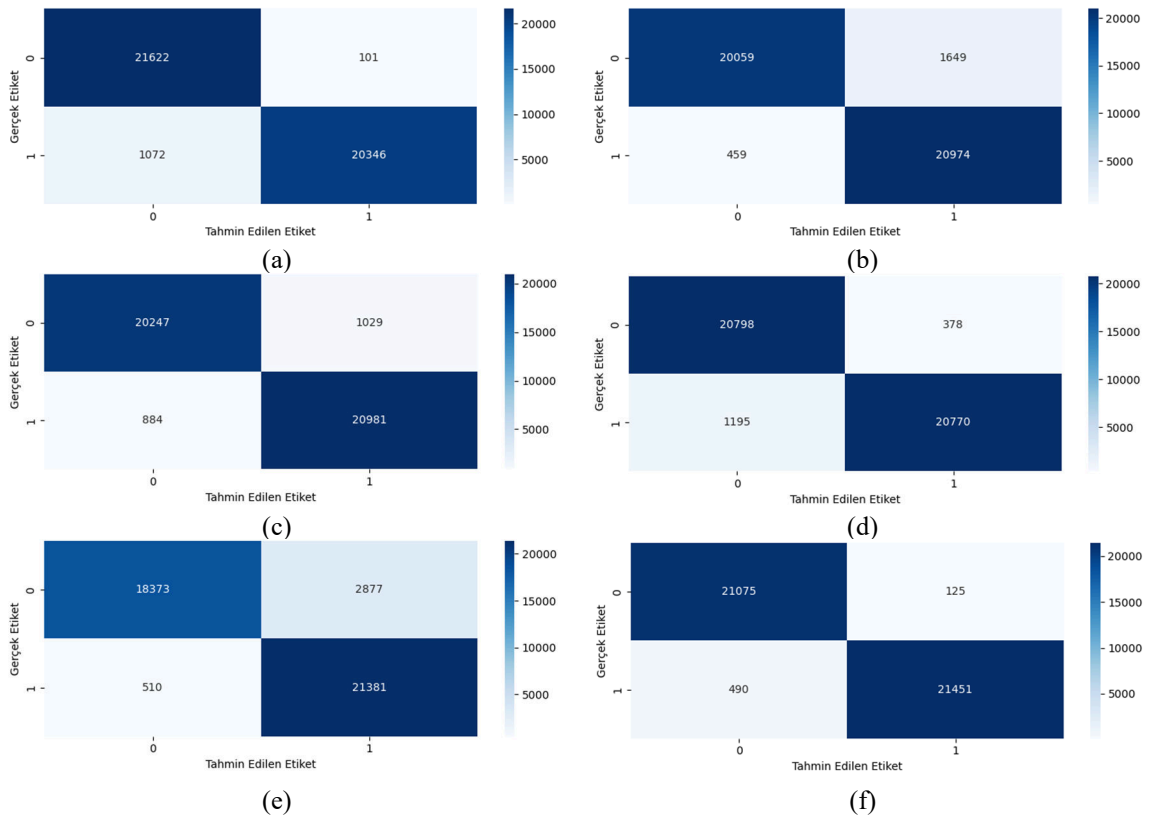


Şekil 5.3: En iyi Tip 1-1 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.

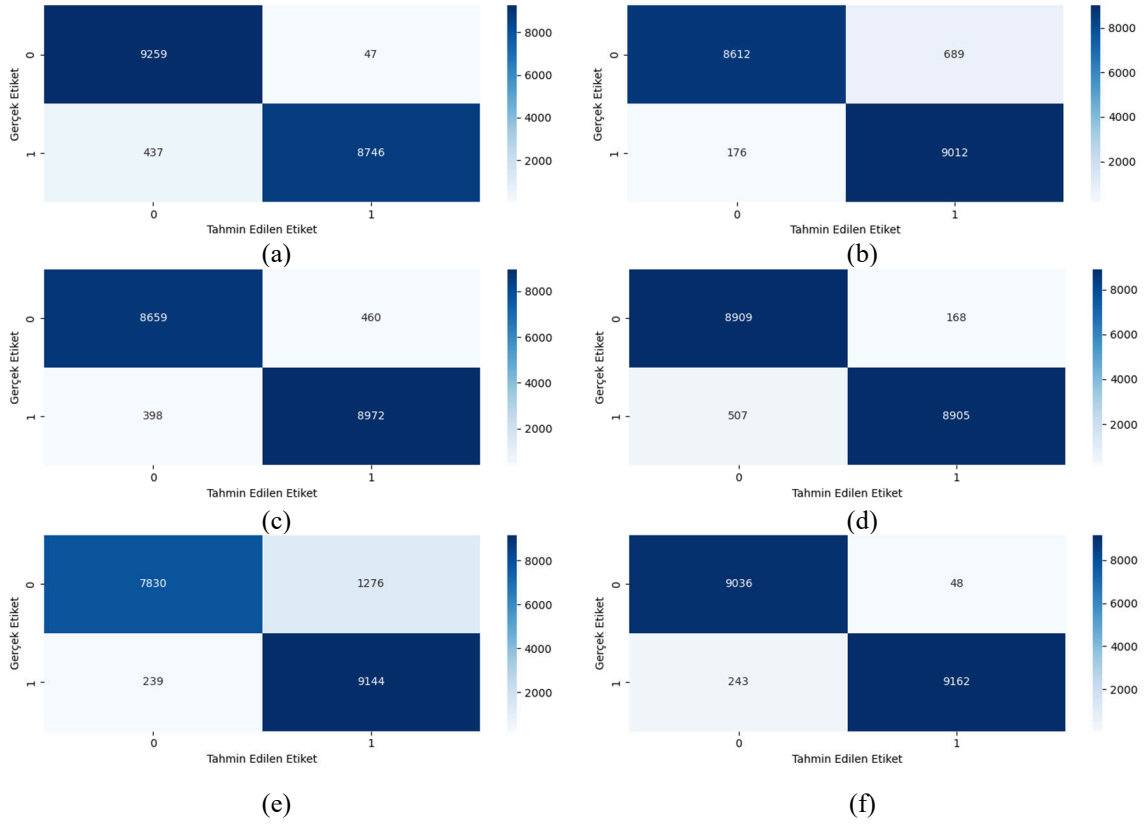


Şekil 5.4: En iyi Tip 1-1 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için f1 skoru değerleri.

Son olarak, en iyi Tip 1-1 YSA modelin, 6 çıkış (yük) sınıfına ait karmaşıklık matrisleri (confusion matrix) eğitim veri seti için Şekil 5.5 ve test veri seti için Şekil 5.6'da sunulmuştur. Şekil 5.5'den görüldüğü üzere; eğitim sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı toplam 615 yanlış tahmin sayısı ile Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı ise toplam 3387 yanlış tahmin sayısı ile Yük 5'dir (Sınıf 5). Ayrıca, test sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı toplam 291 yanlış tahmin sayısı ile Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı ise toplam 1515 yanlış tahmin sayısı ile Yük 5 (Sınıf 5) olduğu Şekil 5.6'dan görülmektedir.



Şekil 5.5: En iyi Tip 1-1 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.

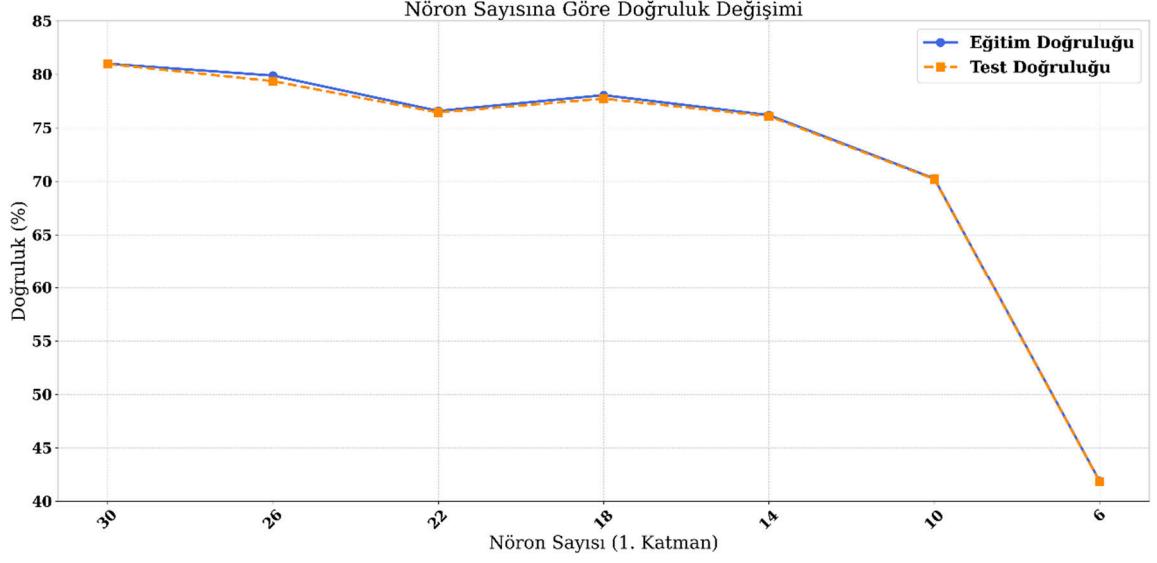


Şekil 5.6: En iyi Tip 1-1 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.

5.1.2 Tip 1-2 YSA Modeli

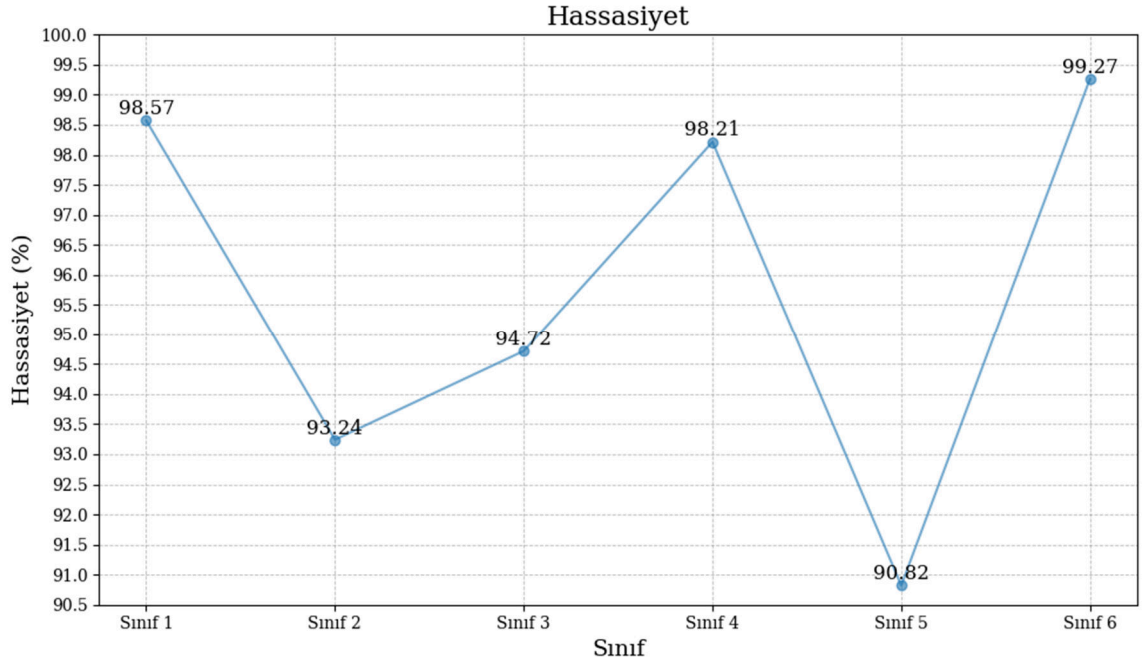
Tip 1-2 sınıfı YSA modellerinin nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinin doğruluk değişimi grafiği Şekil 5.7’de sunulmuştur.

Şekil 5.7’ye bakıldığında dikkate alınan nöron sayısı aralığı için modelin doğruluğunun eğitim ve test veri setlerinde yaklaşık olarak %42 ile %81 aralığında değiştiği görülmektedir. Nöron sayısına göre doğruluk değişiminin Tip 1-1’de olduğu gibi nöron sayısı arttıkça doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Aynı grafikten en yüksek doğruluğun gizli katmanda 30 nöronun olduğu durumda elde edildiği, en düşük doğruluğun ise aynı katmanda nöron sayısının 6 olduğu durum için gözlemlendiği ifade edilebilir.

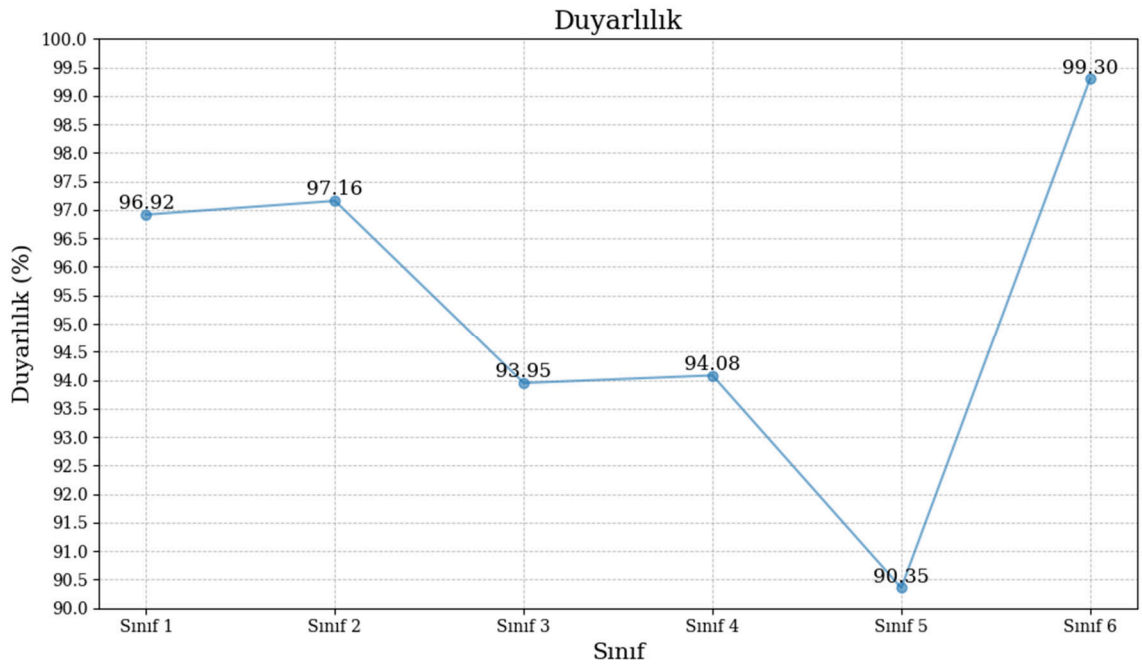


Şekil 5.7: Tip 1-2 YSA için gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.

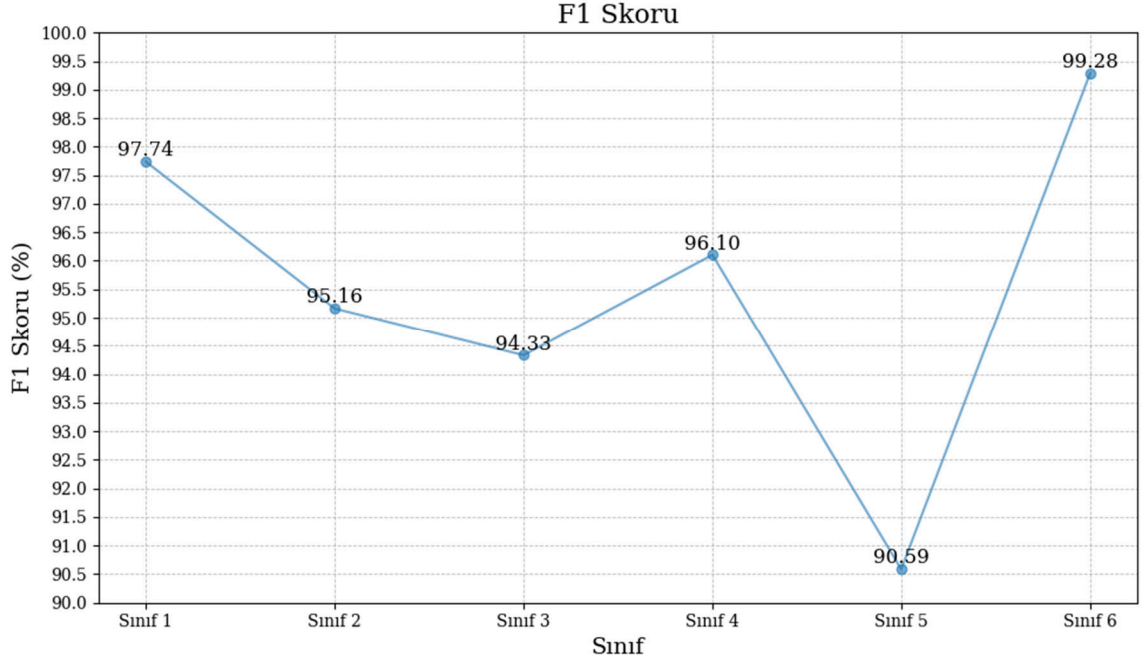
En iyi nöron sayısına sahip Tip 1-2 YSA modelinde test veri setinde sırasıyla her bir yük sınıfı için hassasiyet, duyarlılık ve f1 skoru değerleri Şekil 5.8-Şekil 5.10 arasındaki şekillerde sunulmuştur. Bu şekiller incelendiğinde, en iyi doğrulukta Tip 1-2 YSA modelinin (gizli katmanında 30 nöron bulunan), Yük 1'den (Sınıf 1) Yük 6'ya (Sınıf 6) kadar tüm yüklerin tespitinde test veri seti için hassasiyet değerlerinin sırasıyla %98.57, %93.24, %94.72, %98.21, %90.82 ve %99.27 olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı yük sıralaması için testlerde görülen duyarlılık değerleri %96.92, %97.16, %93.95, %94.08, %90.35 ve %99.30 ve f1 skoru değerleri %97.74, %95.16, %94.33, %96.10, %90.59 ve %99.28'dir. Bu sonuçlardan, modelin Yük 6'yı tespit etmede en yüksek performansa ve Yük 5'i tespit etmede ise en düşük performansa sahip olduğu belirtilebilir.



Şekil 5.8: En iyi Tip 1-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.

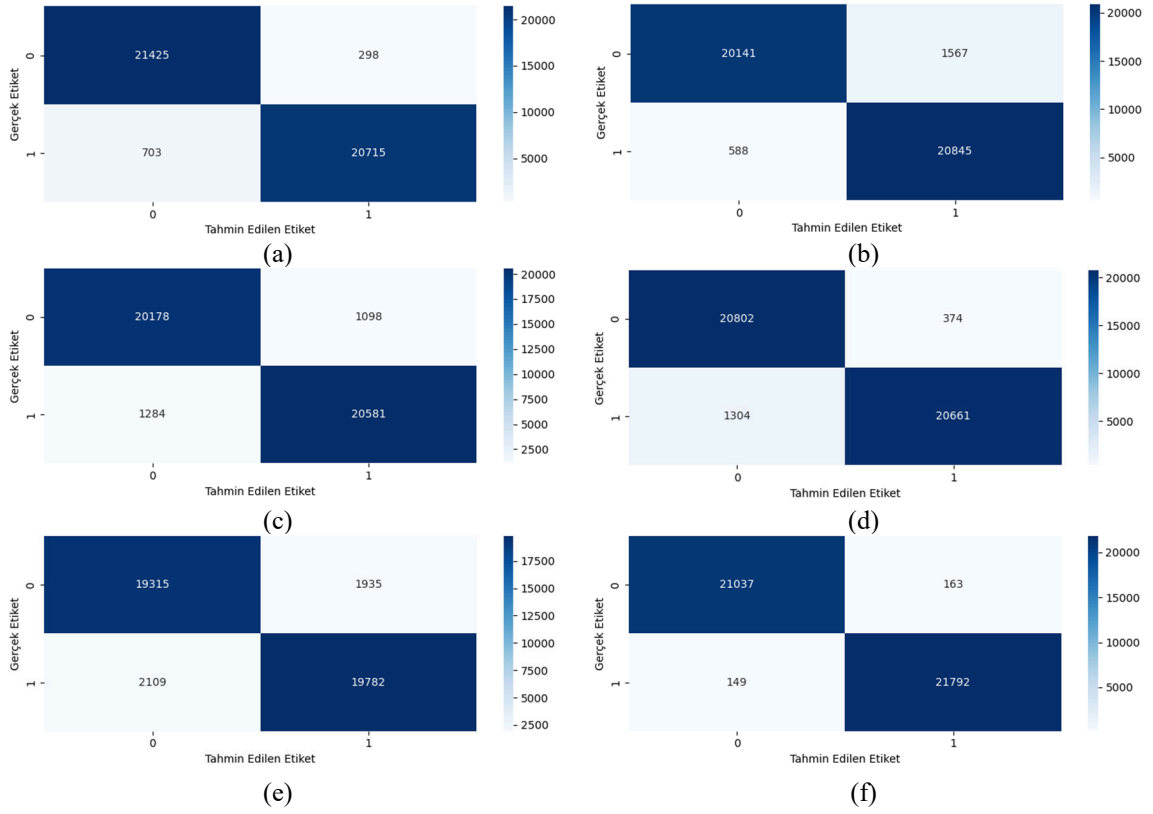


Şekil 5.9: En iyi Tip 1-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.

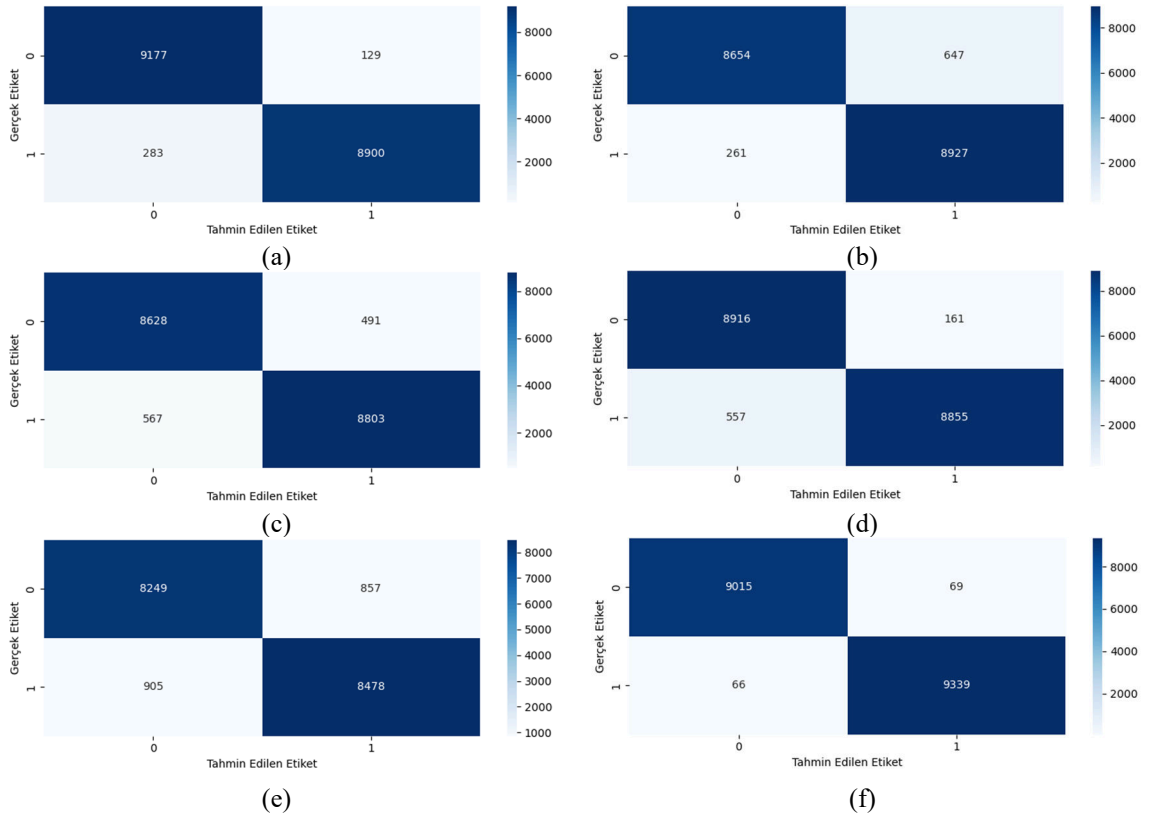


Şekil 5.10: En iyi Tip 1-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için f1 skoru değerleri.

Son olarak, en iyi Tip 1-2 YSA modelin, 6 çıkış (yük) sınıfına ait karmaşıklık matrisleri eğitim veri seti için Şekil 5.11 ve test veri seti için Şekil 5.12’de sunulmuştur. Şekil 5.11’den görüldüğü üzere; eğitim sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı toplam 312 yanlış tahmin sayısı ile Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı ise toplam 4044 yanlış tahmin sayısı ile Yük 5’tir (Sınıf 5). Ayrıca, test sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı toplam 135 yanlış tahmin sayısı ile Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı ise toplam 1762 yanlış tahmin sayısı ile Yük 5 (Sınıf 5) olduğu Şekil 5.12’den görülmektedir.



Şekil 5.11: En iyi Tıp 1-2 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.

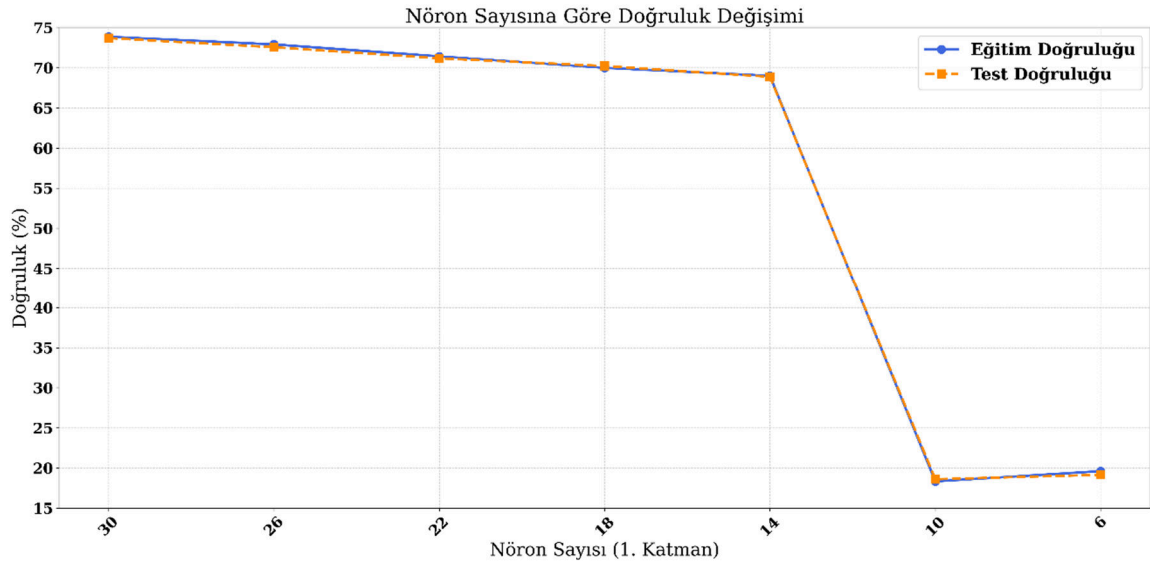


Şekil 5.12: En iyi Tıp 1-2 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.

5.1.3 Tip 1-3 YSA Modeli

Tip 1-3 sınıfı YSA modellerinin nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinin doğruluk değişimi grafiği Şekil 5.13’de sunulmuştur.

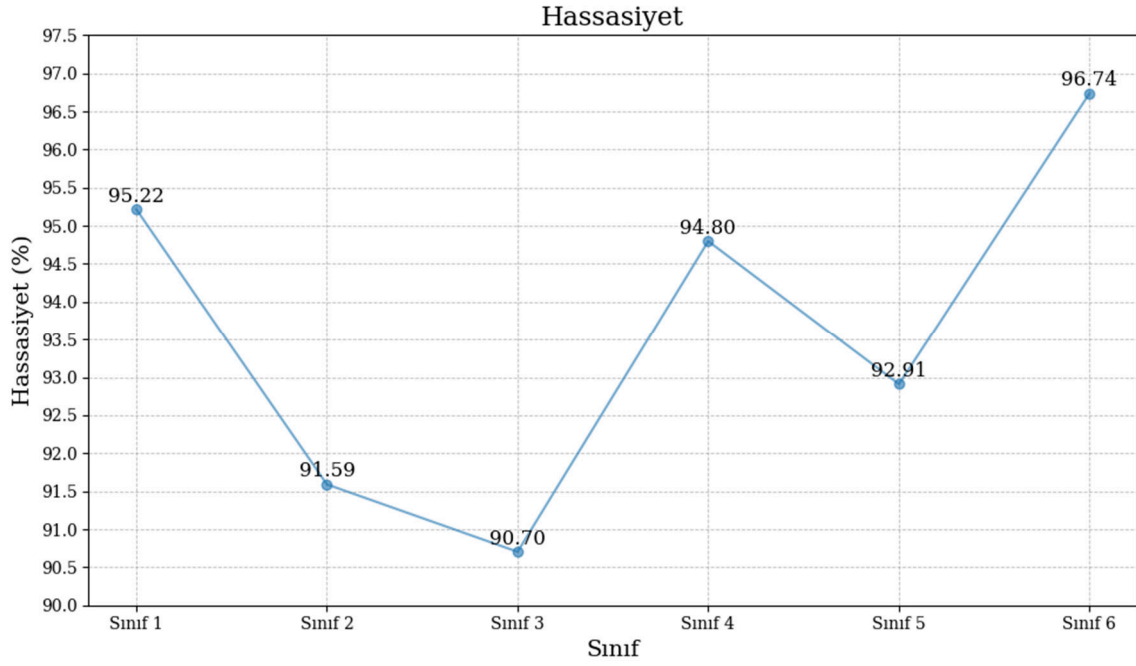
Şekil 5.13’e bakıldığında dikkate alınan nöron sayısı aralığı için modelin doğruluğunun eğitim ve test veri setlerinde yaklaşık olarak %18 ile %74 aralığında değiştiği görülmektedir. Daha önceki iki YSA alt tipinde olduğu gibi nöron sayısından doğruluğun olumlu şekilde etkilendiği görülmektedir. Aynı grafikten en yüksek doğruluğun gizli katmanda 30 nöronun olduğu durumda elde edildiği, en düşük doğruluğun ise aynı katmanda nöron sayısının 6 olduğu durum için gözlemlendiği ifade edilebilir.



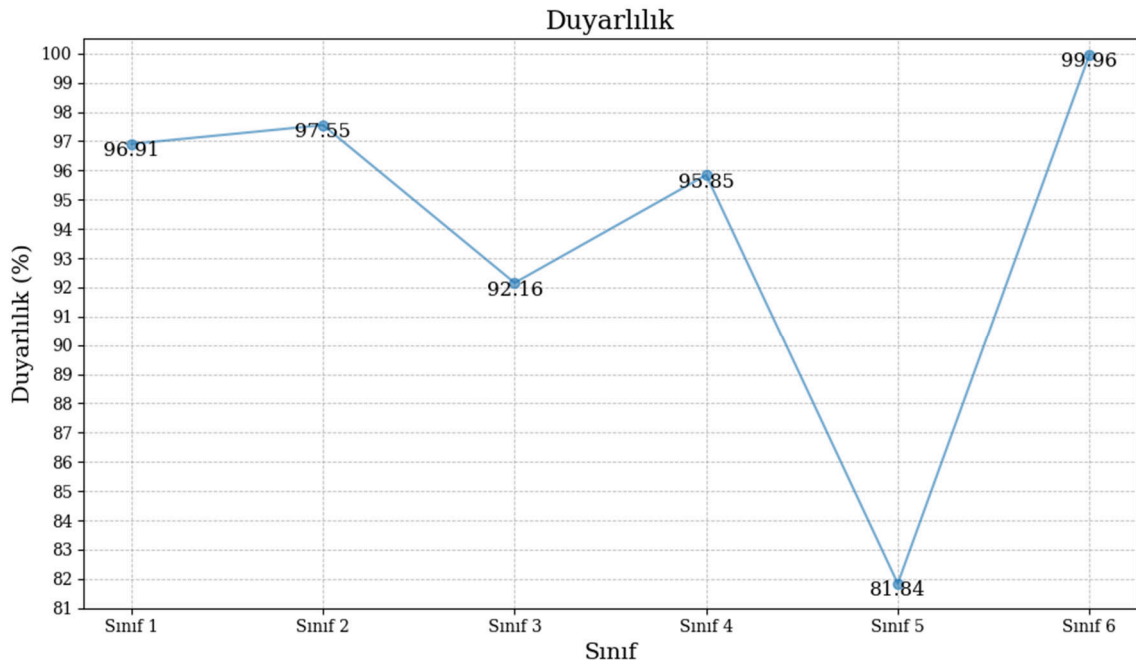
Şekil 5.13: Tip 1-3 YSA için gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.

En iyi nöron sayısına sahip Tip 1-3 YSA modelinde test veri setinde sırasıyla her bir yük sınıfı için hassasiyet, duyarlılık ve f1 skoru değerleri Şekil 5.14-Şekil 5.16 arasındaki şekillerde sunulmuştur. Bu şekiller incelendiğinde, en iyi doğruluktaki (gizli katmanında 30 nöron bulunan) Tip 1-3 YSA modelinin, Yük 1’den (Sınıf 1), Yük 6’ya (Sınıf 6) kadar tüm yüklerin sınıflandırmasında test veri seti için hassasiyet değerlerinin sırasıyla %95.22, %91.59, %90.70, %94.80, %92.91 ve %96.74 olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı yük sıralaması için testlerde görülen duyarlılık değerleri %96.91, %97.55, %92.16, %95.85, %81.84 ve %99.96 ve f1 skoru değerleri %96.05, %94.48, %91.42, %95.32, %87.02 ve %98.32’dir. Bu sonuçlardan, modelin Yük 6’yı (sınıf 6) tespit etmede en yüksek

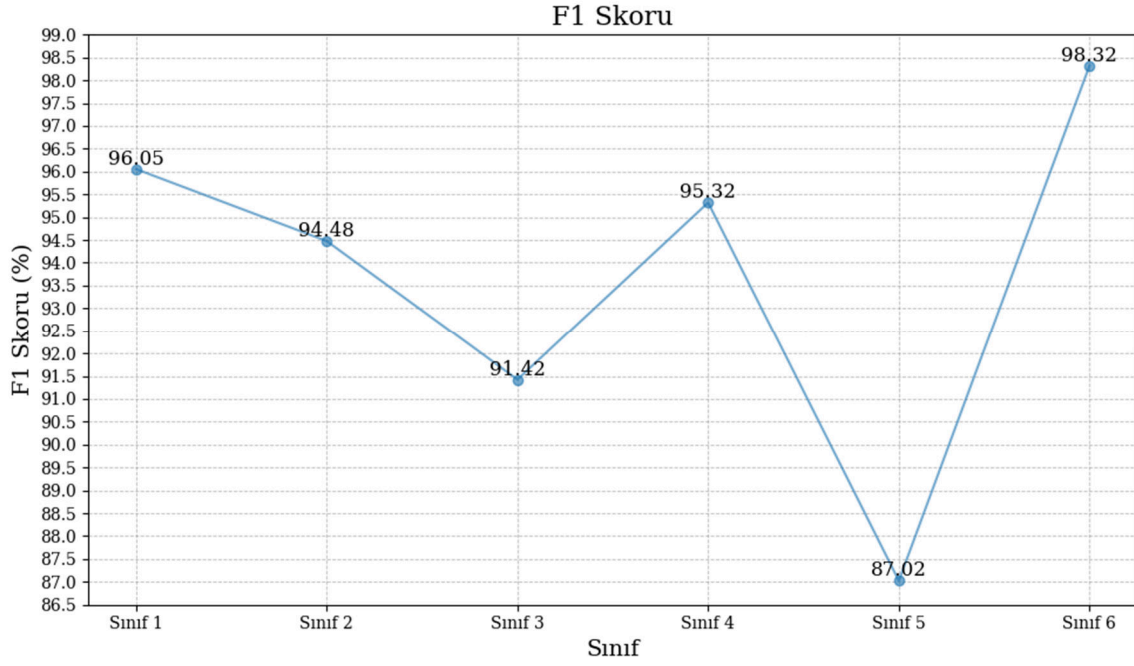
performansa ve Yük 5'i (sınıf 5) tespit etmede ise en düşük performansa sahip olduğu belirtilebilir.



Şekil 5.14: En iyi Tip 1-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.

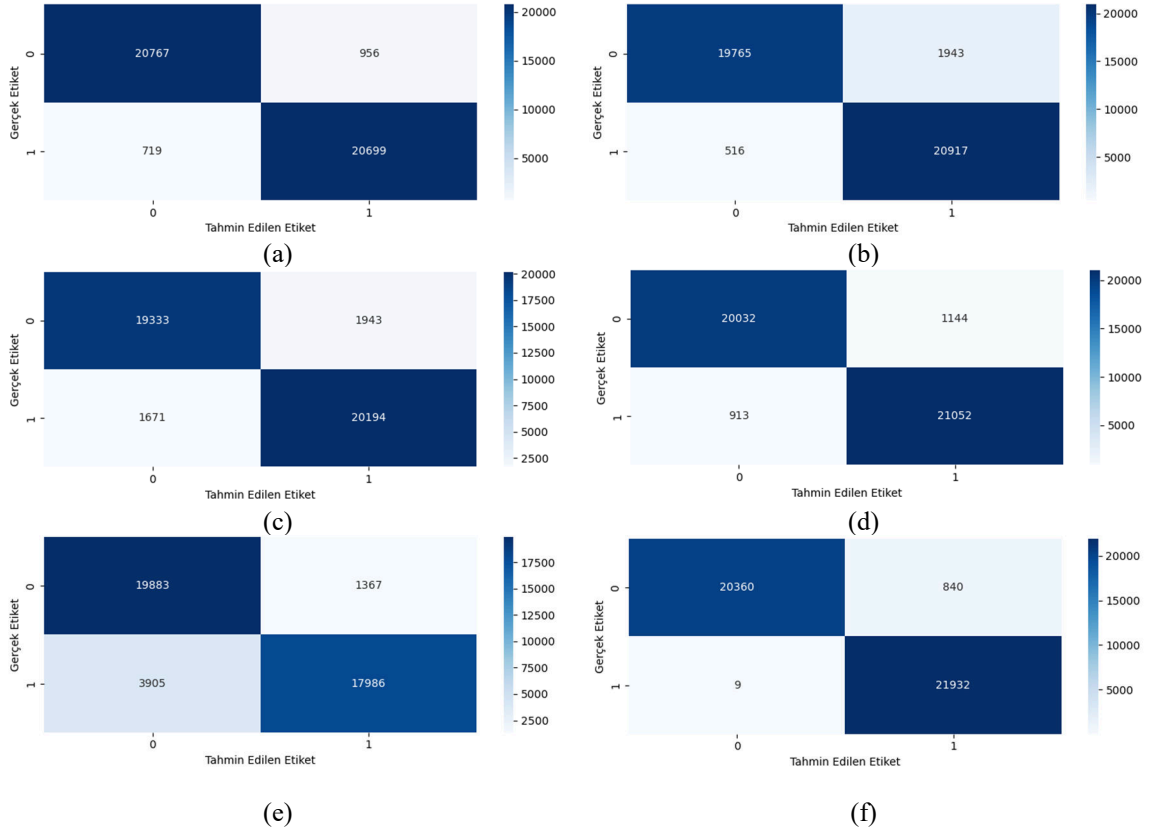


Şekil 5.15: En iyi Tip 1-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.

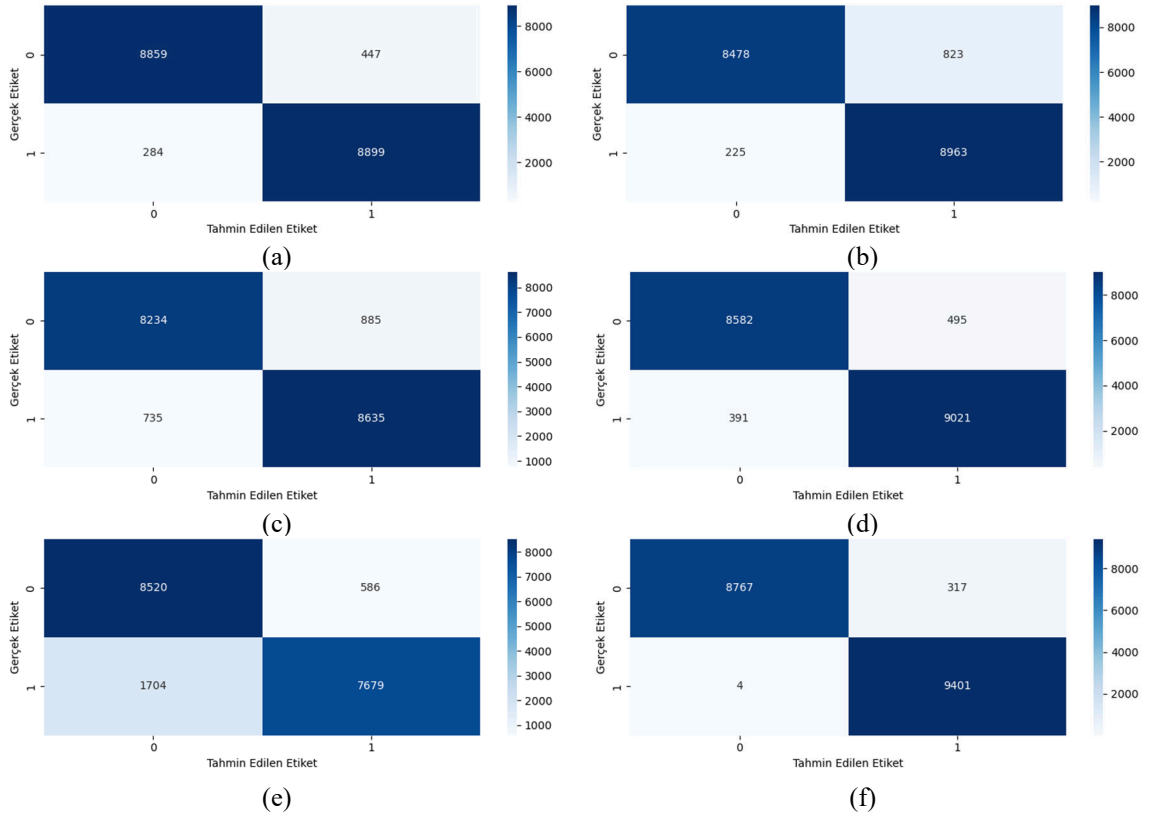


Şekil 5.16: En iyi Tip 1-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için fl skoru değerleri.

Son olarak, en iyi Tip 1-3 YSA modelin, 6 çıkış (yük) sınıfına ait karmaşıklık matrisleri eğitim veri seti için Şekil 5.17 ve test veri seti için Şekil 5.18’de sunulmuştur. Şekil 5.17’den görüldüğü üzere; eğitim sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı toplam 849 yanlış tahmin sayısı ile Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı ise toplam 5272 yanlış tahmin sayısı ile Yük 5’dir (Sınıf 5). Şekil 5.18 ise test sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının toplam 321 yanlış tahmin sayısı ile Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının ise toplam 2290 yanlış tahmin sayısı ile Yük 5 (Sınıf 5) olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.17: En iyi Tip 1-3 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.



Şekil 5.18: En iyi Tip 1-3 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.

5.1.4 Gizli Katman Nöron Sayısı En İyilenen Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA

Modellerinin Performanslarının Karşılaştırmalı Analizi

Bu kısımda, tek gizli katmanlı ve gizli katmanında tanh, sigmoid ve ReLU aktivasyon fonksiyonlarına sahip en iyilenmiş Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modellerinin kendi aralarında performans karşılaştırmasını yaparak, hem aktivasyon fonksiyonunun Tip 1 YSA modelinin performansına etkisini analiz etmek hem de en iyi Tip 1 YSA modelini belirlemek amaçlanmıştır.

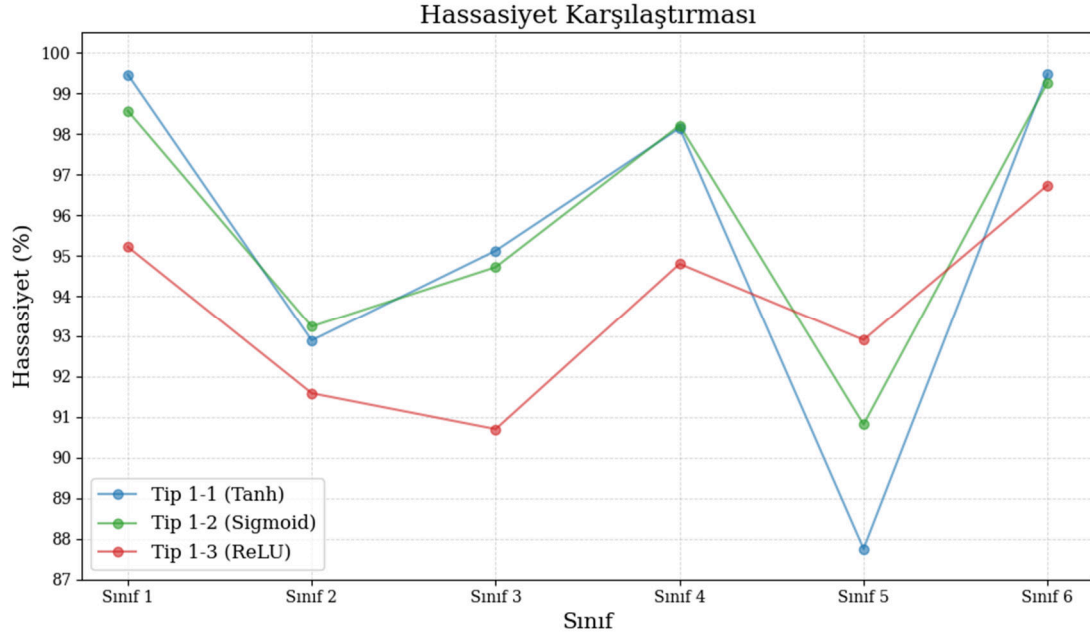
Bu doğrultuda, Tip 1 sınıfına ait üç farklı YSA modelinin eğitim ve test doğrulukları Tablo 5.1’de sunulmuştur. Tablo 5.1’e göre, hem eğitim hem de test aşamalarında en yüksek doğruluğa ulaşan model, gizli katmanında tanh aktivasyon fonksiyonu kullanılan Tip 1-1 modelidir. Bununla birlikte;

- Tip 1-2 modelinin eğitim ve test doğrulukları, Tip 1-1 modeline göre sırasıyla yaklaşık %1.48 ve %1.16 daha düşük,
- Tip 1-3 modelinin eğitim ve test doğrulukları, Tip 1-1 modeline göre sırasıyla yaklaşık %8.59 ve %8.42 daha düşüktür.

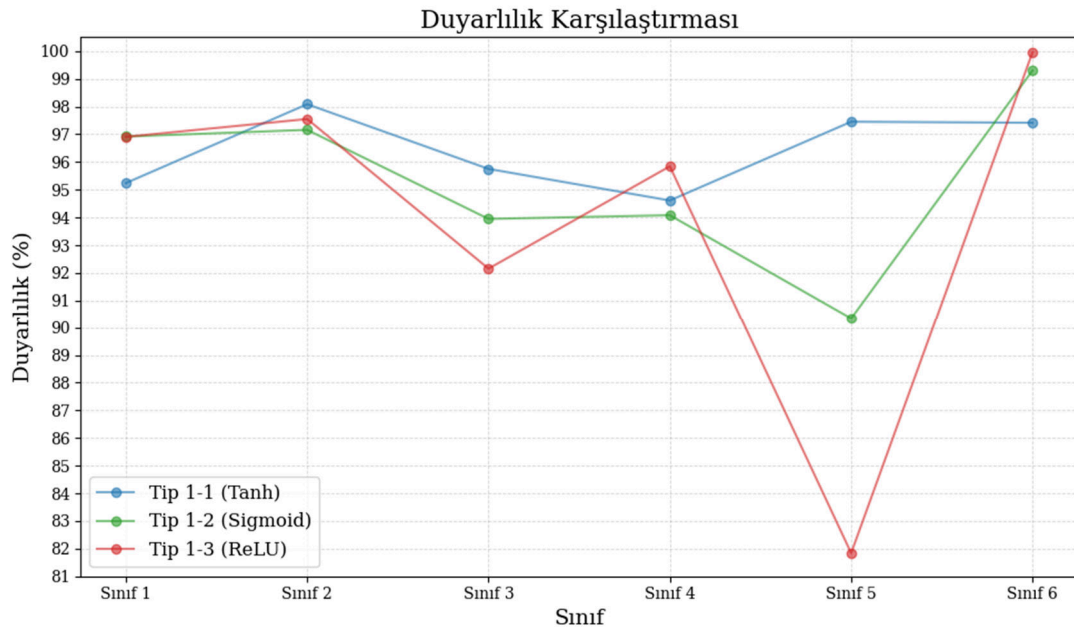
Tablo 5.1: En iyilenmiş Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modelleri için eğitim ve test doğruluk performans indisleri.

YSA Modeli	Gizli Katman Nöron Sayısı	Eğitim Doğruluk	Test Doğruluk
Tip 1-1	30	%82.46	%82.12
Tip 1-2	30	%80.98	%80.96
Tip 1-3	30	%73.87	%73.70

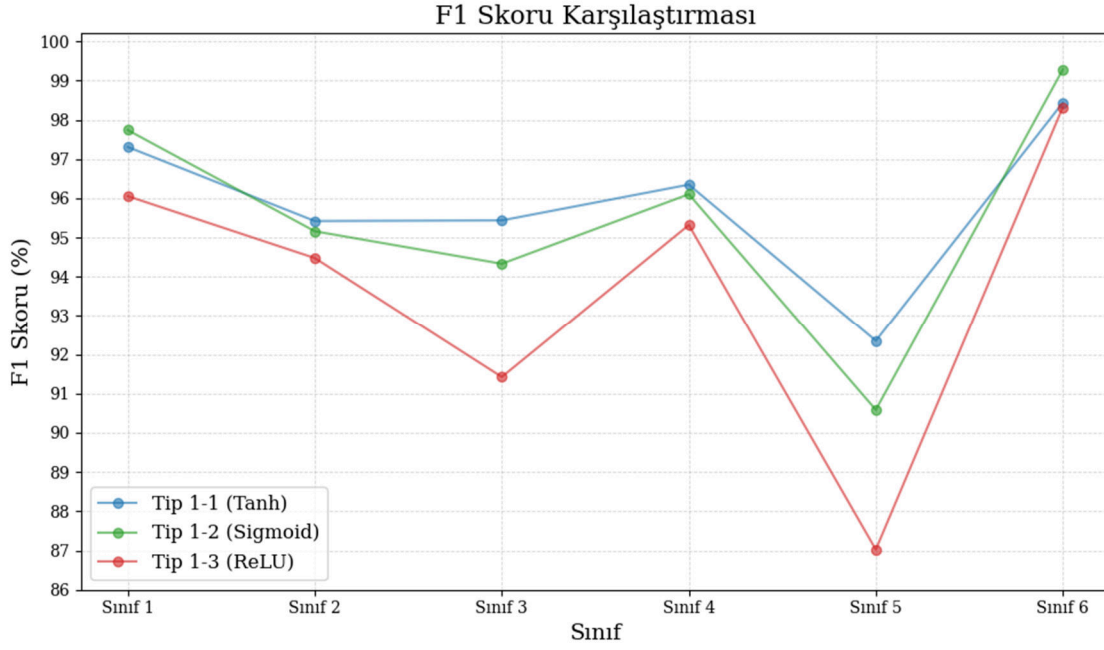
Bu doğruluk karşılaştırmalarına ilaveten, en iyilenmiş Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modellerinin 6 yük sınıfının tespitindeki hassasiyet, duyarlılık ve fl skorları karşılaştırması sırasıyla Şekil 5.19-5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.19: Gizli katman nöron sayısı en iyilenen Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği hassasiyetlerin karşılaştırması.



Şekil 5.20: Gizli katman nöron sayısı en iyilenen Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği duyarlılık karşılaştırması.

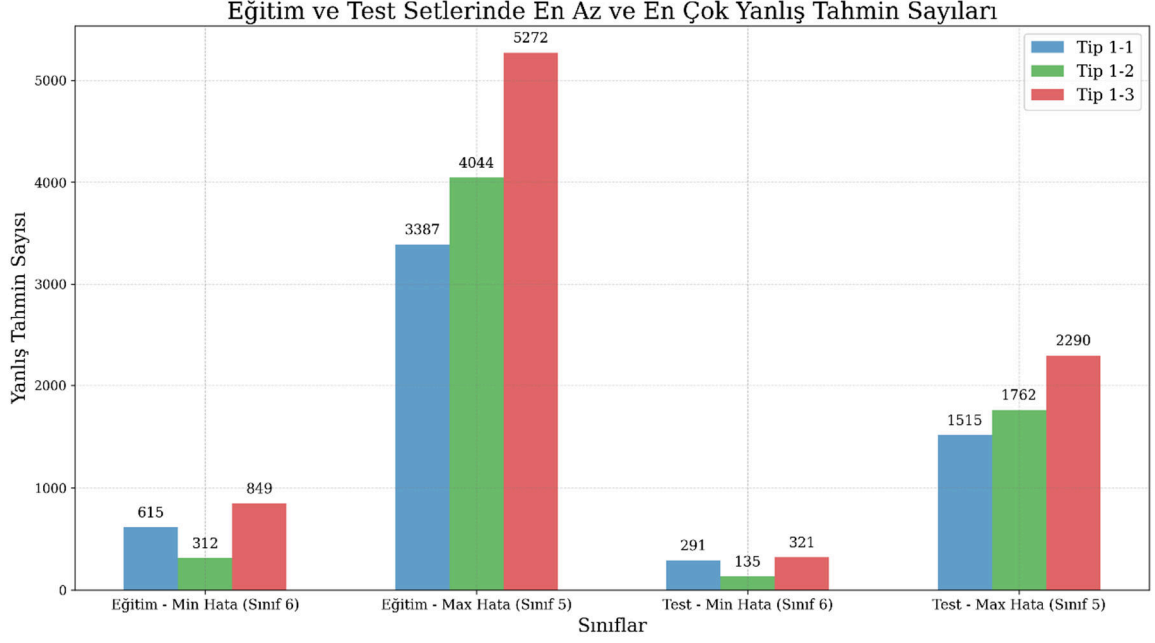


Şekil 5.21: Gizli katman nöron sayısı en iyilenen Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği F1 skorlarının karşılaştırması.

Bu şekillerden, gizli katmanında tanh ve sigmoid aktivasyon fonksiyonlarına sahip Tip 1-1 ve Tip 1-2 YSA modellerinin hassasiyet, duyarlılık ve f1 skorlarının genel olarak birbirine yakın olduğu, ancak bu iki YSA modelinin ReLU aktivasyon fonksiyonuna sahip Tip 1-3 YSA modeliyle hassasiyet, duyarlılık ve f1 skorları bakımından önemli derecede farklılıklar gösterdiği ifade edilmelidir.

Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 için eğitim ve test veri setinde karmaşıklık matrislerinden elde edilmiş maksimum yanlış tahmin ve minimum yanlış tahmin sayılarının karşılaştırması Şekil 5.22’de verilmiştir. Şekil 5.22 değerlendirildiğinde,

- Üç YSA modelinin de aynı yükün (Sınıf 5 veya Yük 5) tespitinde en yüksek yanlış tahmini yaptığı, dolayısıyla bu yükün tespitinin diğerlerine nazaran daha kritik bir durum olduğu,
- Bununla birlikte, en iyilenmiş Tip 1-1 YSA modelinin Sınıf 5 yükün tespitinde diğer ikisine kıyasla daha az sayıda yanlış tahmin yaptığı, Tip 1-3’ün ise aynı yükün tespitinde en fazla yanlış tahmini yaptığı,
- Üç modelin de Yük 6’yı (sınıf 6) diğer yüklere nazaran en iyi şekilde tespit ettiği, sonuçlarına varılmaktadır.



şekil 5.22: En iyi Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modelleri için en yüksek yanlış tahmin ve en düşük yanlış tahmin sayılarının karşılaştırması.

Buraya kadar sunulan sonuçlar bütünüyle ele alındığında, en iyi performansa sahip Tip 1 YSA modelinin en iyilenmiş Tip 1-1 modeli olduğu, en düşük performansa sahip YSA modelinin ise en iyilenmiş Tip 1-3 modeli olduğu söylenebilir.

5.2 Tip 2 Sınıfı YSA Modelleri için En İyi Nöron Sayısının Belirlenmesi

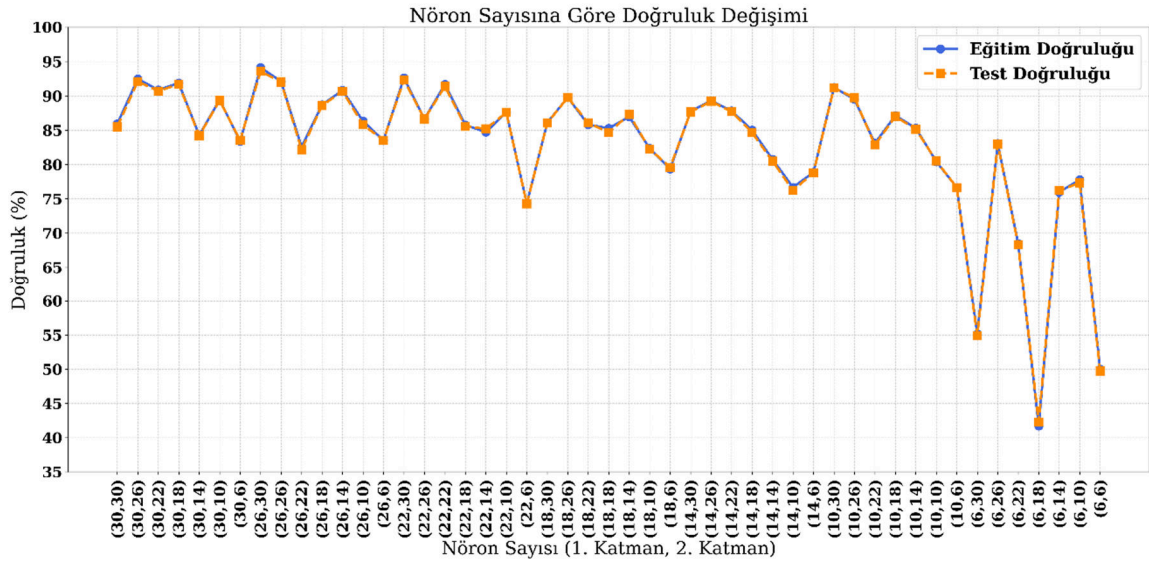
Bu bölümde, iki gizli katmana sahip Tip 2 sınıfı YSA modellerinin gizli katmanlarındaki nöron sayılarının en uygun değerleri, önceki bölümde belirtilen performans göstergeleri dikkate alınarak parametrik analizlerle belirlenecektir.

Analizlerde, Tip 2 sınıfı YSA modelleri üç alt tip olarak ele alınacaktır. Bunlar; gizli katmanlarında Tanh aktivasyon fonksiyonu olan Tip 2-1 modeli, gizli katmanlarında sigmoid aktivasyon fonksiyonu olan Tip 2-2 modeli ve gizli katmanlarında ReLU aktivasyon fonksiyonu olan Tip 3-3 modelidir.

5.2.1 Tip 2-1 YSA Modeli

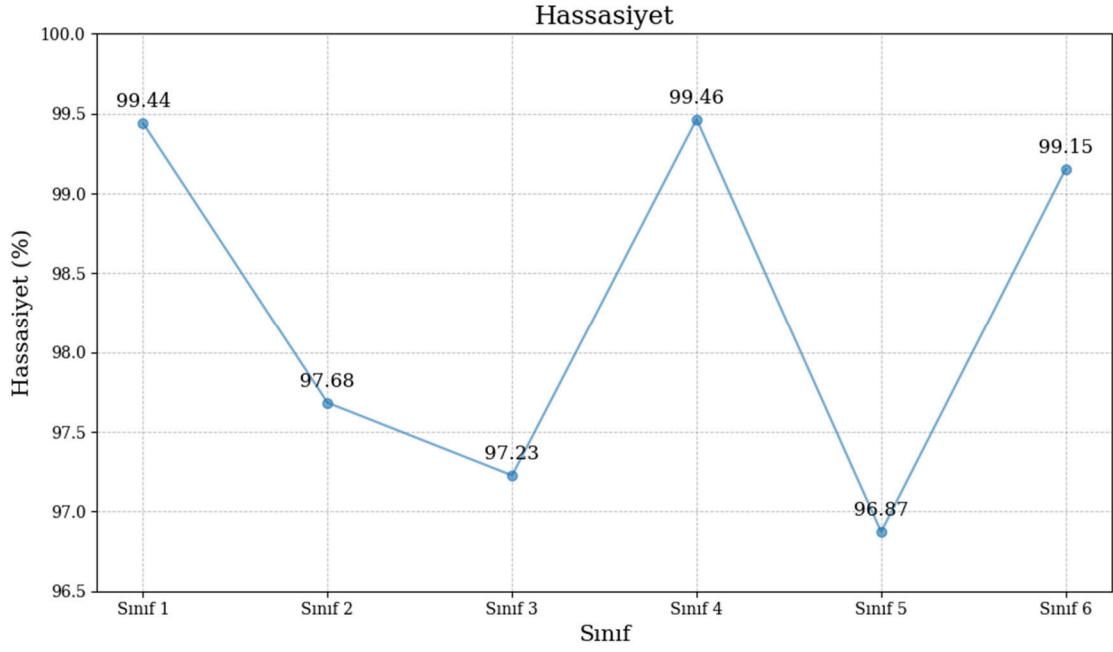
Tip 2-1 sınıfı YSA modelinin nöron sayısına göre eğitim ve test veri setleri için doğruluk değişimi grafiği şekil 5.23'te sunulmuştur.

Şekil 5.23'e bakıldığında dikkate alınan nöron sayısı aralığı için modelin doğruluğunun eğitim ve test veri setlerinde yaklaşık olarak %42 ile %94 aralığında değiştiği görülmektedir. Aynı grafikten en yüksek doğruluğun 1. gizli katmanda 26 nöron ve 2. gizli katmanda 30 nöronun olduğu durumda elde edildiği, en düşük doğruluğun ise 1. gizli katmanda 6 nöron ve 2. gizli katmanda 18 nöronun olduğu durum için gözlemlendiği ifade edilebilir.

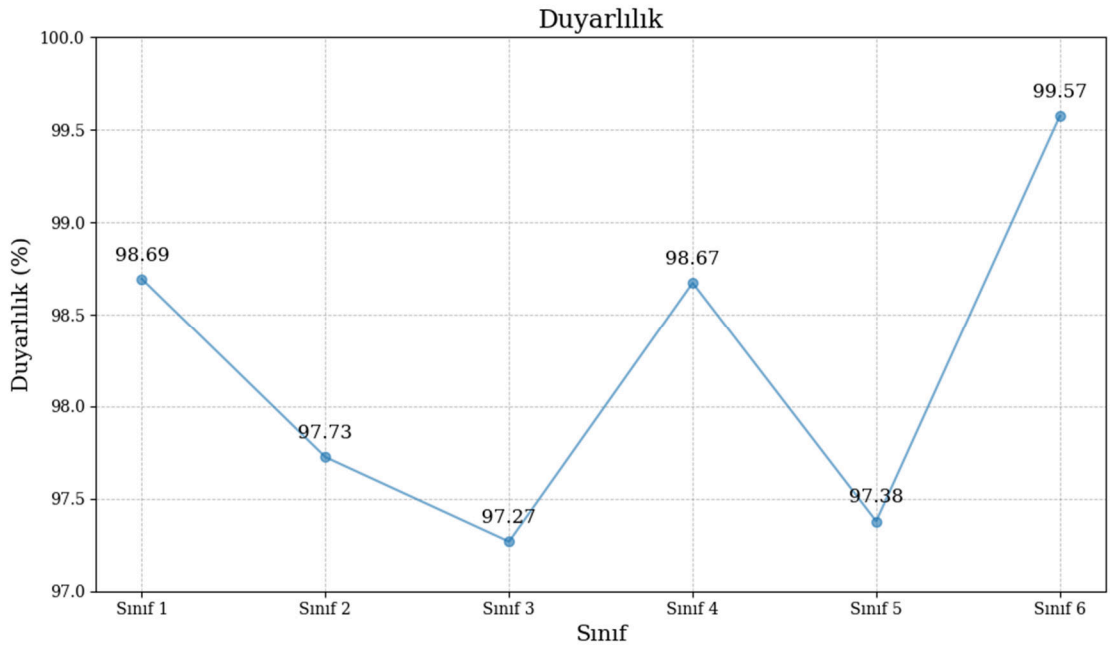


Şekil 5.23: Tip 2-1 YSA için 1. ve 2. gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.

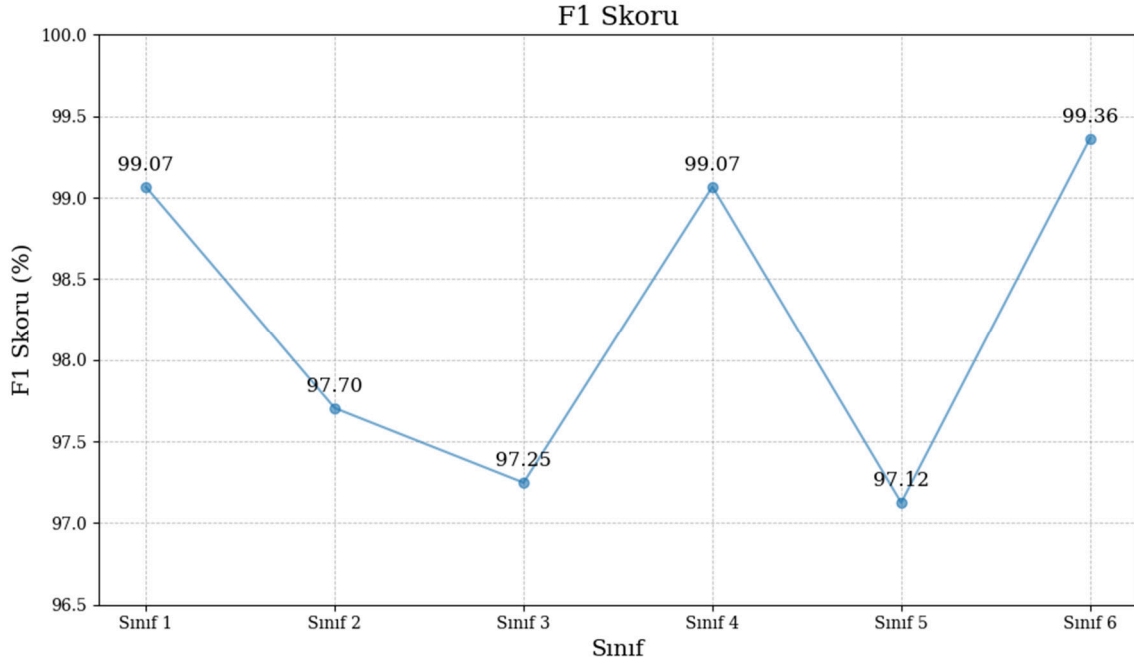
En iyi nöron sayılarına sahip Tip 2-1 YSA modelinde test veri setinde sırasıyla her bir yük sınıfı için hassasiyet, duyarlılık ve f1 skoru değerleri Şekil 5.24-Şekil 5.26 arasındaki şekillerde sunulmuştur. Bu şekiller incelendiğinde, en iyi doğruluktaki Tip 2-1 YSA modelinin, dikkate alınan yüklerin (Yük 1-Yük 6) sınıflandırmasında test veri seti için hassasiyet değerlerinin sırasıyla %99.44, %97.68, %97.23, %99.46, %96.87 ve %99.15 olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı yük sıralaması için testlerde görülen duyarlılık değerleri %98.69, %97.73, %97.27, %98.67, %97.38 ve %99.57 ve f1 skoru değerleri %99.07, %97.70, %97.25, %99.07, %97.12 ve %99.36'dır. Bu sonuçlardan, modelin Yük 6 sınıfını tespit etmede en yüksek performansa ve Yük 5 sınıfını tespit etmede ise en düşük performansa sahip olduğu belirtilebilir.



Şekil 5.24: En iyi Tip 2-1 YSA'nın test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.

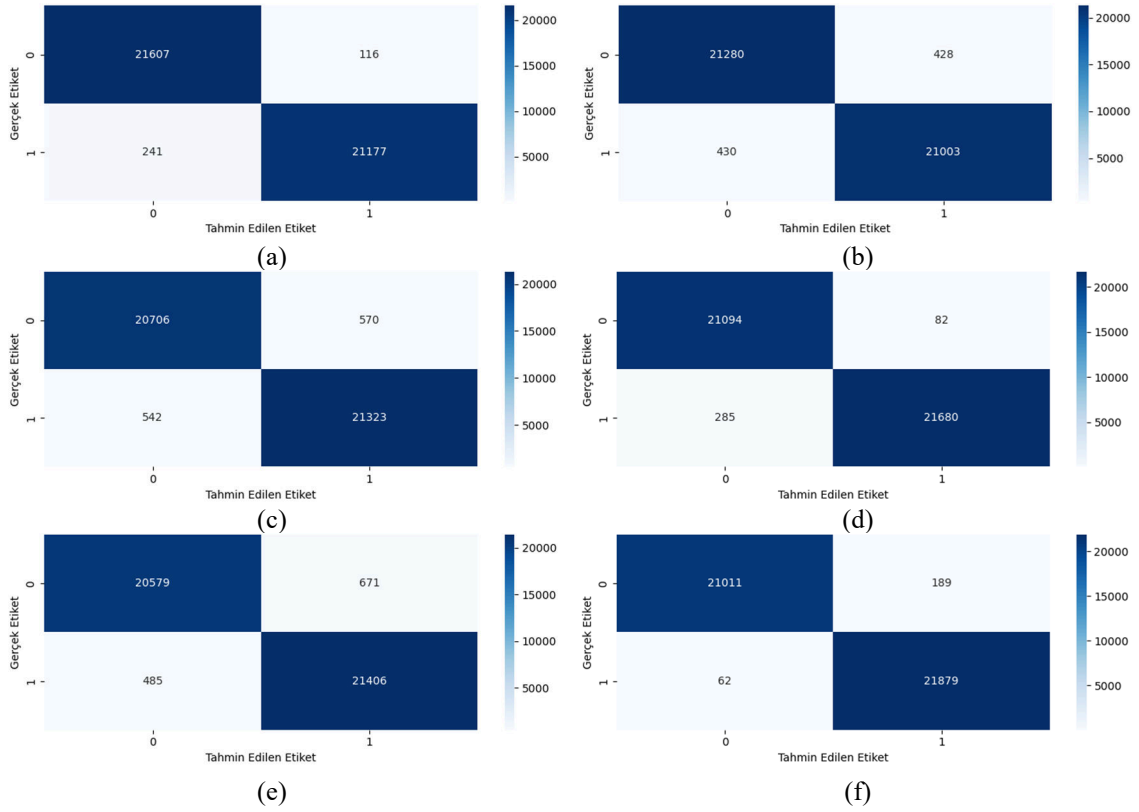


Şekil 5.25: En iyi Tip 2-1 YSA'nın test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.

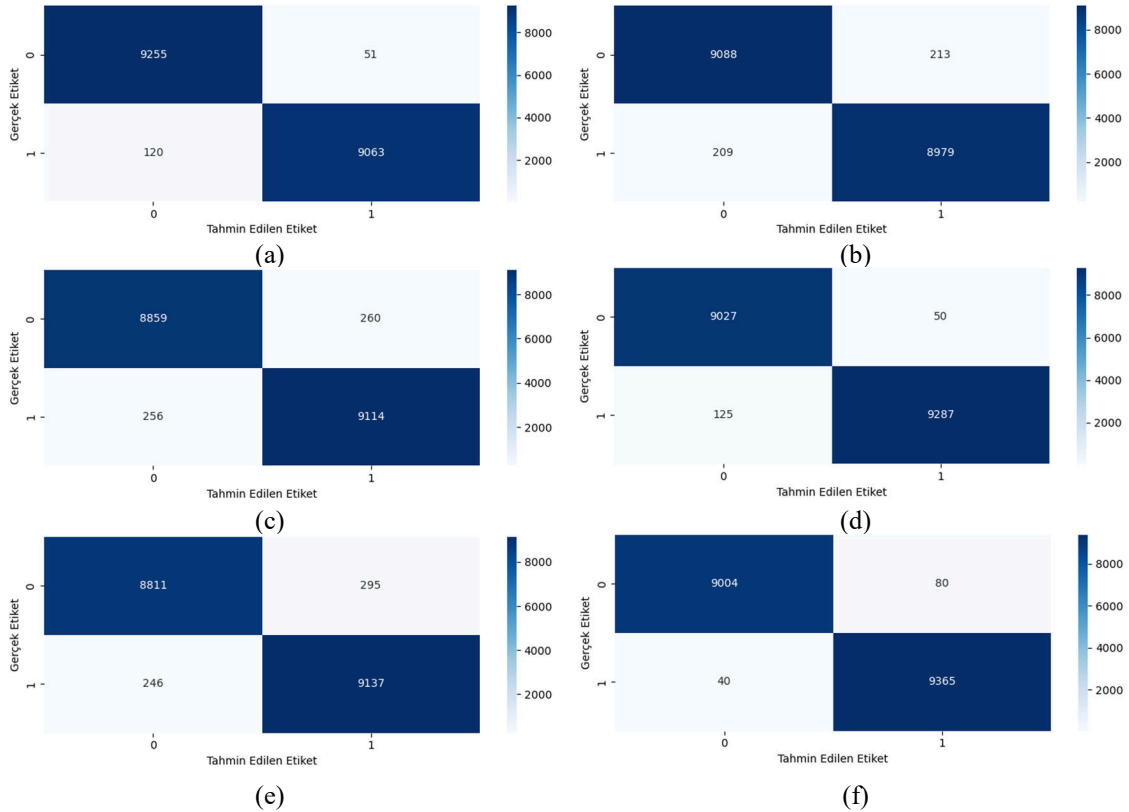


Şekil 5.26: En iyi Tip 2-1 YSA'nın test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için f1 skoru değerleri.

Son olarak, en iyi Tip 2-1 YSA modelin, 6 yük sınıfına ait karmaşıklık matrisleri eğitim veri seti için Şekil 5.27 ve test veri seti için Şekil 5.28'de sunulmuştur. Şekil 5.27'den görüldüğü üzere; eğitim sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı toplam 251 yanlış tahmin sayısı ile Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfı ise toplam 1156 yanlış tahmin sayısı ile Yük 5'tir (Sınıf 5). Şekil 5.28'den ise test sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının toplam 120 yanlış tahmin sayısı ile Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının toplam 541 yanlış tahmin sayısı ile Yük 5 (Sınıf 5) olduğu görülmektedir.



Şekil 5.27: En iyi Tıp 2-1 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.

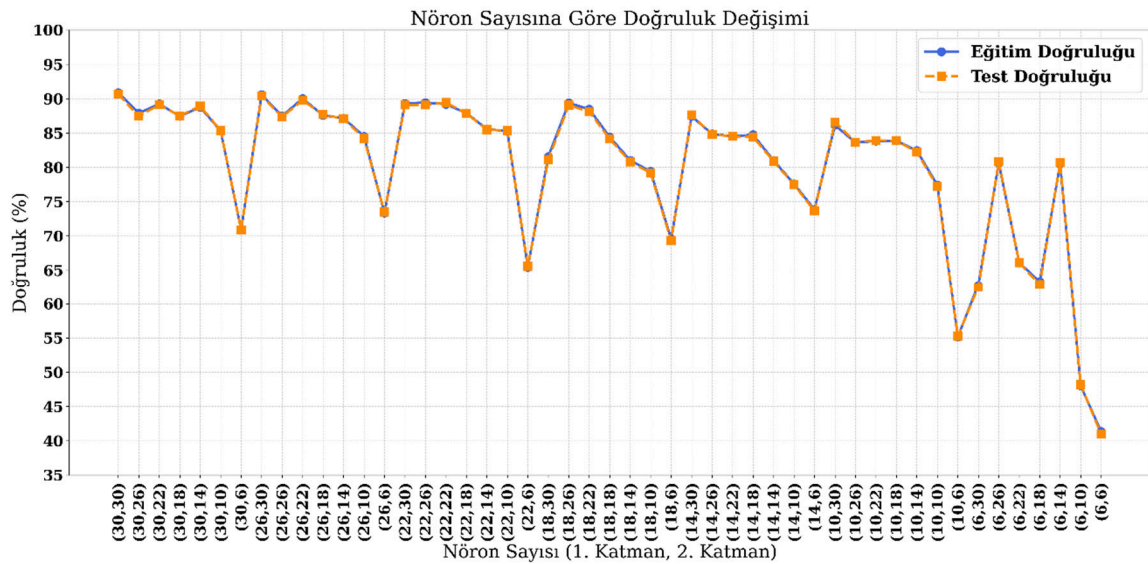


Şekil 5.28: En iyi Tıp 2-1 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.

5.2.2 Tip 2-2 YSA Modeli

Tip 2-2 sınıfı YSA modelinin nöron sayısına göre eğitim ve test veri setleri için doğruluk değişimi grafiği Şekil 5.29'da sunulmuştur.

Şekil 5.29'a bakıldığında dikkate alınan nöron sayısı aralığı için modelin doğruluğunun eğitim ve test veri setlerinde yaklaşık olarak %41 ile %91 aralığında değiştiği görülmektedir. Aynı grafikten en yüksek doğruluğun her iki gizli katmanda 30'ar nöronun olduğu durumda elde edildiği, en düşük doğruluğun ise her iki gizli katmanda 6'şar nöronun olduğu durum için görüldüğü ifade edilebilir.

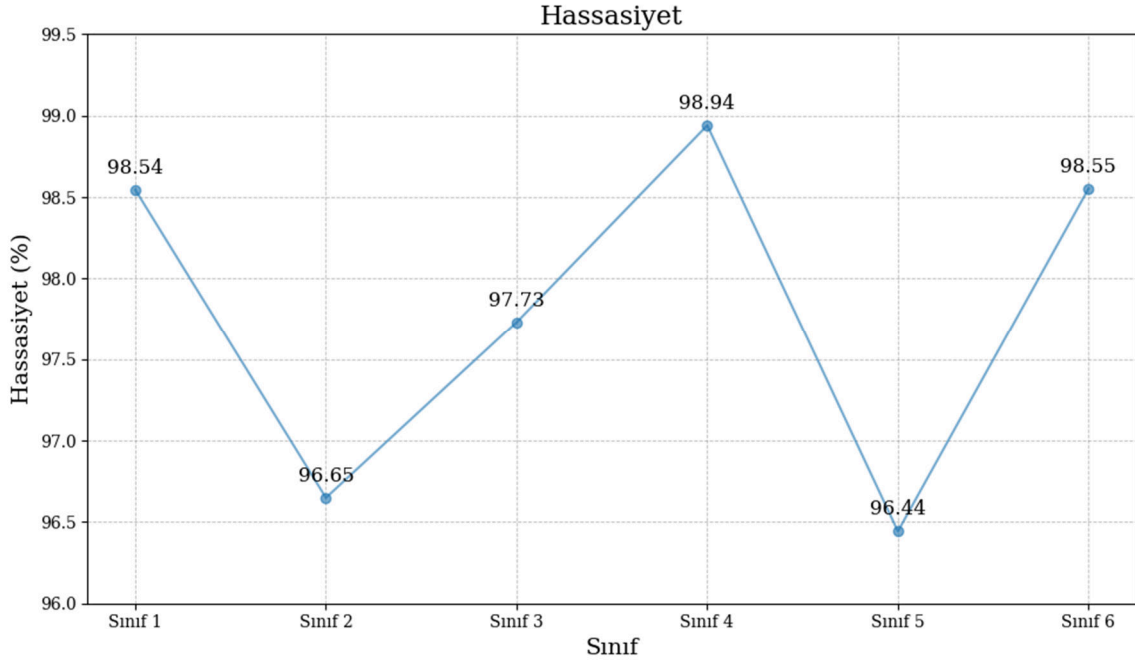


Şekil 5.29: Tip 2-2 YSA için 1. ve 2. gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.

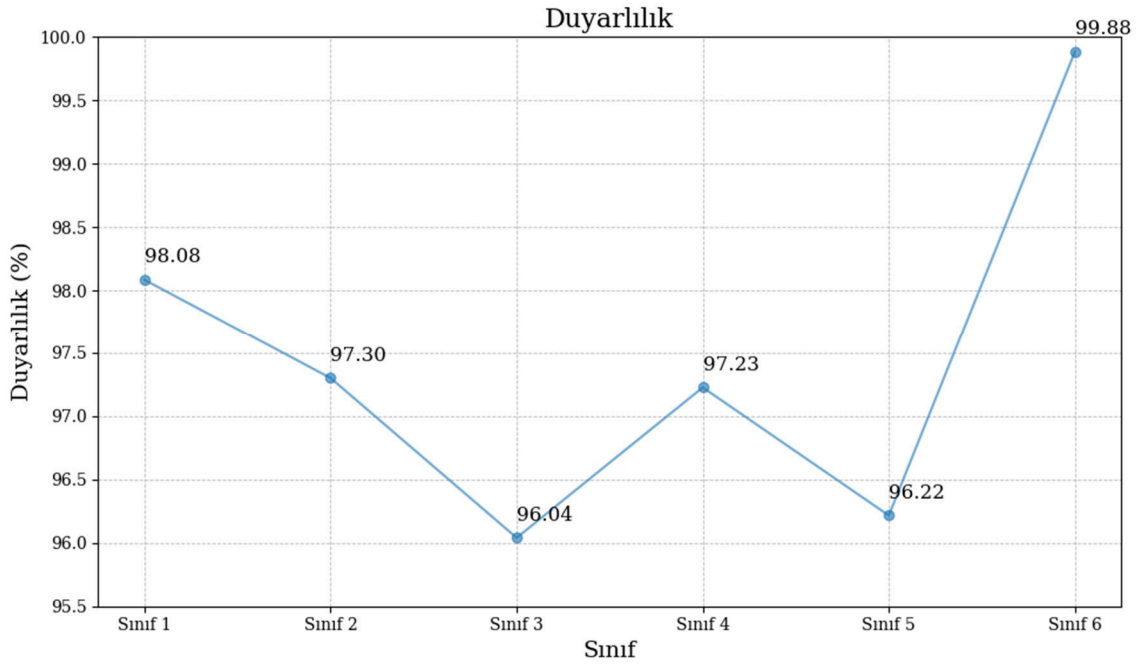
En iyi nöron sayılarına sahip Tip 2-2 YSA modelinde test veri setinde sırasıyla her bir yük sınıfı için hassasiyet, duyarlılık ve f1 skoru değerleri Şekil 5.30-Şekil 5.32 arasındaki şekillerde sunulmuştur.

Şekil 5.30-Şekil 5.32 arasındaki grafikler incelendiğinde, en iyi doğruluğundaki Tip 2-2 YSA modelinin, Yük 1 ile Yük 6 arasındaki 6 çeşit yükün sınıflandırmasında test veri seti için hassasiyet değerlerinin sırasıyla %98.54, %96.65, %97.73, %98.94, %96.44 ve %98.55 olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı yük sıralaması için testlerde görülen duyarlılık değerleri %98.08, %97.30, %96.04, %97.23, %96.22 ve %99.88 ve f1 skoru değerleri %98.31,

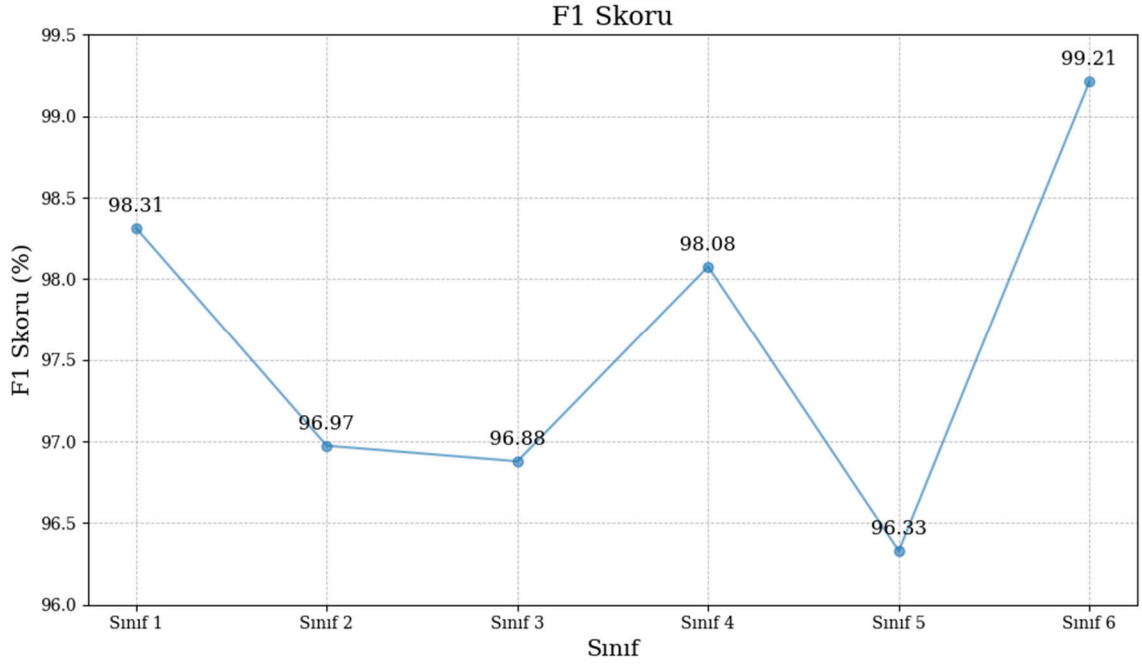
%96.97, %96.88, %98.08, %96.33 ve %99.21'dir. Bu sonuçlardan, modelin Yük 6'yı (sınıf 6) tespit etmede en yüksek performansa ve Yük 5'i (sınıf 5) tespit etmede ise en düşük performansa sahip olduğu belirtilebilir.



Şekil 5.30: En iyi Tip 2-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.

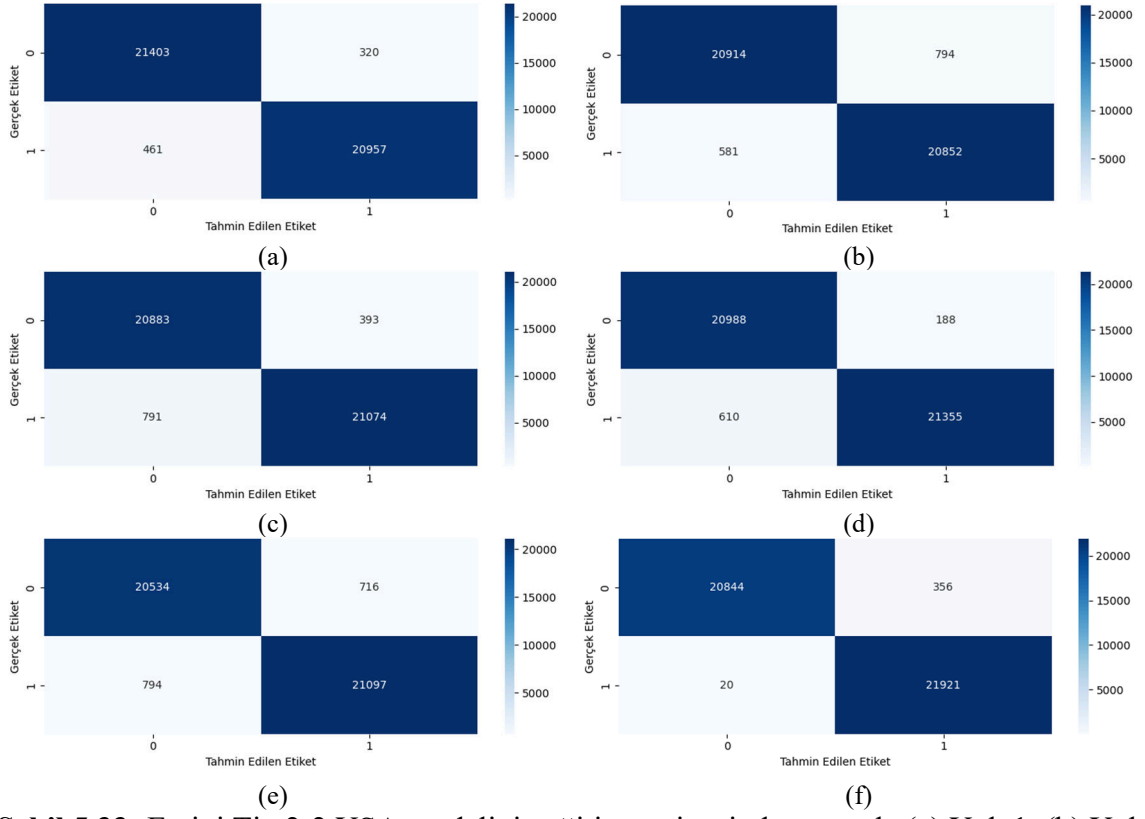


Şekil 5.31: En iyi Tip 2-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.

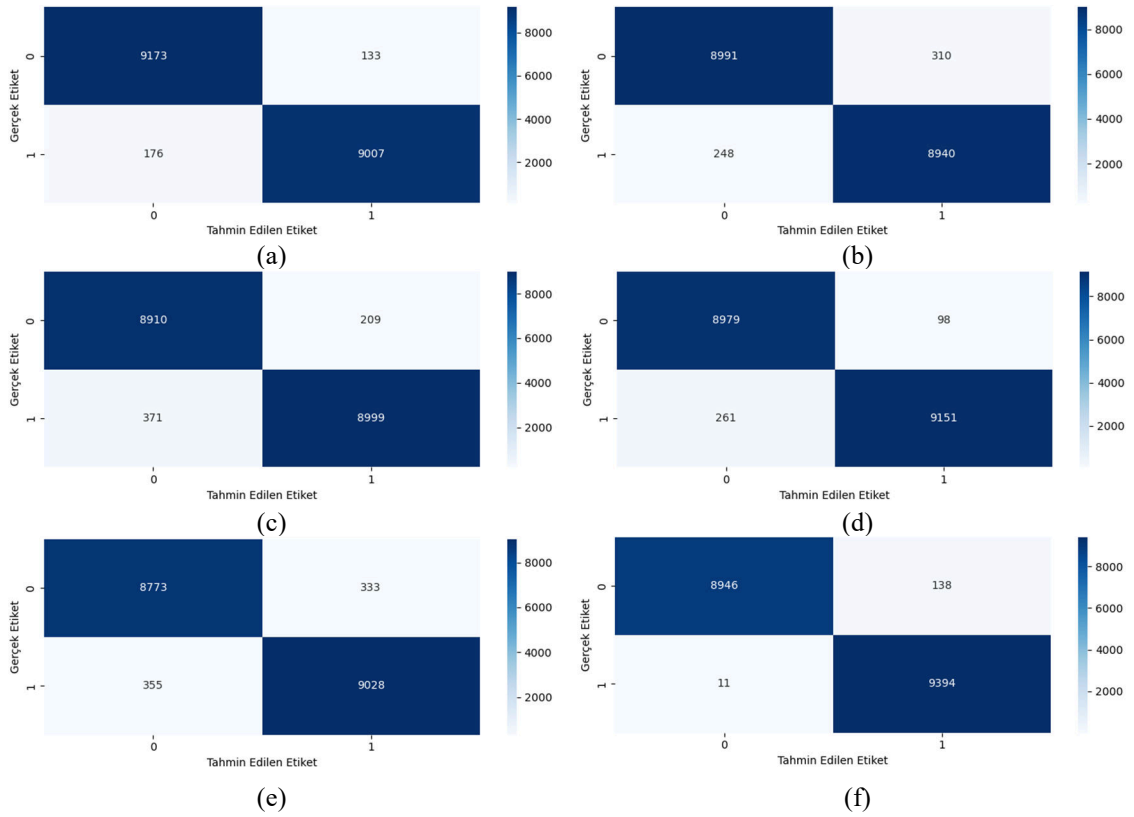


Şekil 5.32: En iyi Tip 2-2 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için fl skoru değerleri.

Son olarak, en iyi Tip 2-2 YSA modelin, 6 yük sınıfına ait karmaşıklık matrisleri eğitim veri seti için Şekil 5.33 ve test veri seti için Şekil 5.34'te sunulmuştur. Şekil 5.33'ten eğitim sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının toplam 376 yanlış tahmin sayısıyla Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının ise toplam 1510 yanlış tahmin sayısıyla Yük 5 (Sınıf 5) olduğu ifade edilebilir. Şekil 5.34'ten test sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının toplam 149 yanlış tahmin sayısıyla Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının toplam 688 yanlış tahmin sayısıyla Yük 5 (Sınıf 5) olduğu görülmektedir.



Şekil 5.33: En iyi Tip 2-2 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.

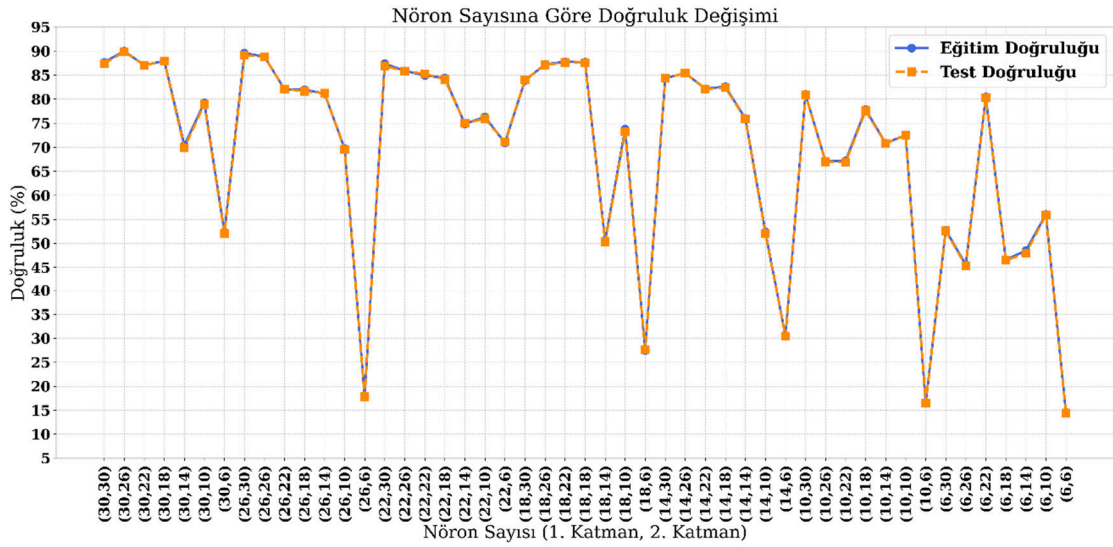


Şekil 5.34: En iyi Tip 2-2 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.

5.2.3 Tip 2-3 YSA Modeli

Tip 2-3 YSA modelinin nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinin doğruluk değişimi grafiği Şekil 5.35'te sunulmuştur.

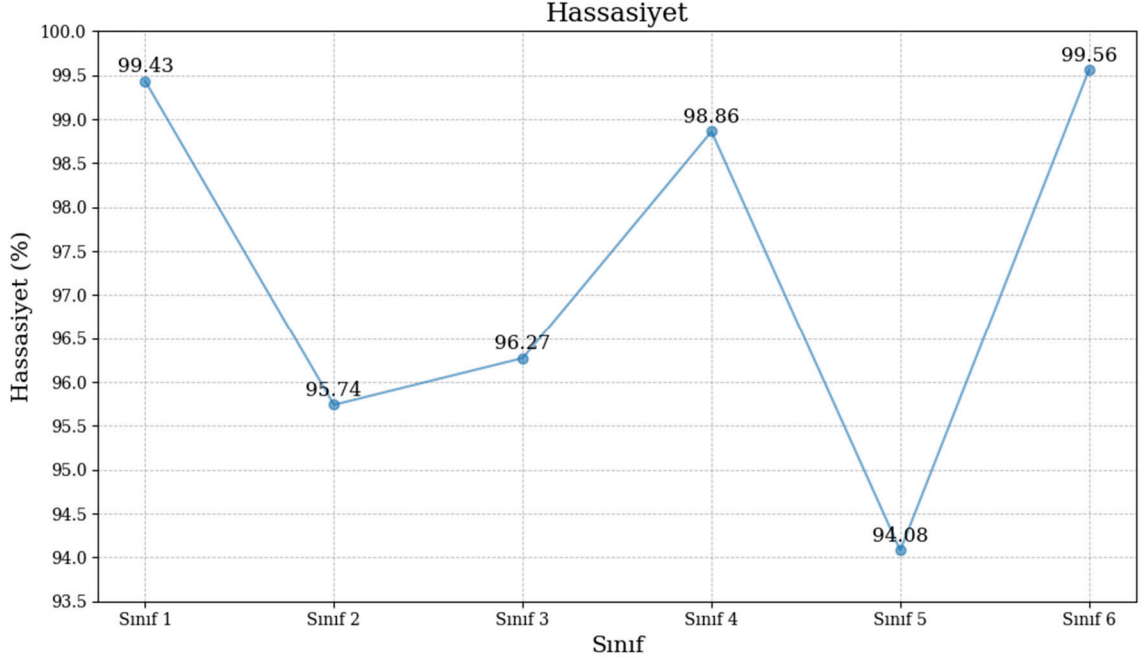
Şekil 5.35'e bakıldığında dikkate alınan nöron sayısı aralığı için modelin doğruluğunun eğitim ve test veri setlerinde yaklaşık olarak %14 ile %90 aralığında değiştiği görülmektedir. Aynı grafikten en yüksek doğruluğun 1. gizli katmanda 30 nöron ve 2. gizli katmanda 26 nöronun olduğu durumda elde edildiği, en düşük doğruluğun ise 1. gizli katmanda 6 nöron ve 2. gizli katmanda 6 nöronun olduğu durum için gözlemlendiği ifade edilebilir.



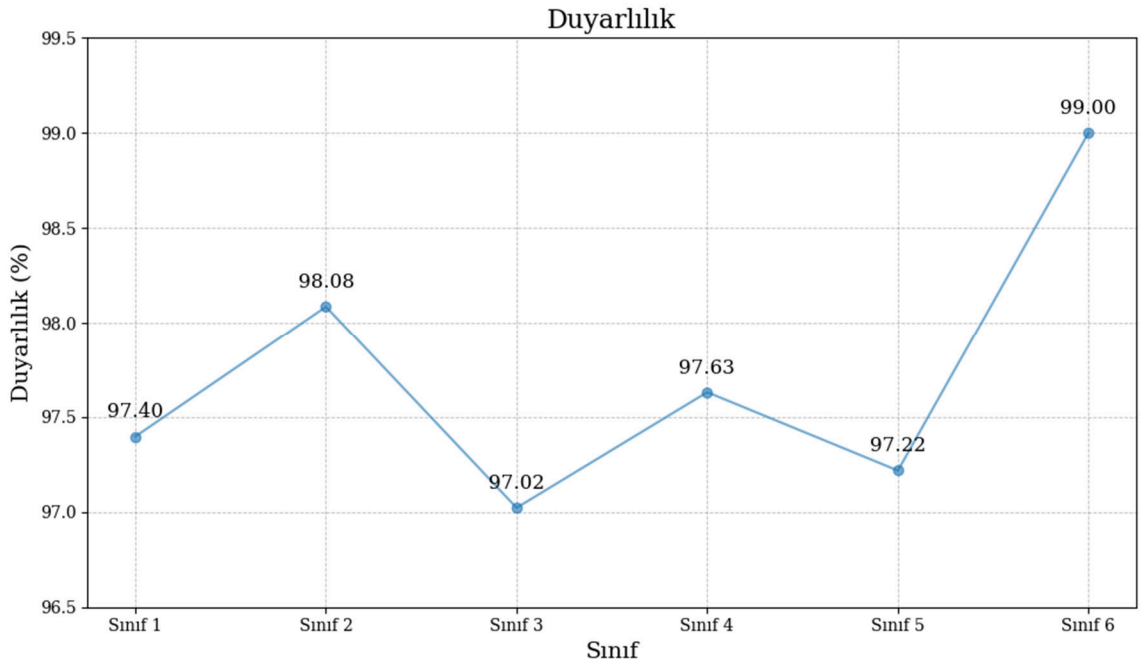
Şekil 5.35: Tip 2-3 YSA için 1. ve 2. gizli katman nöron sayısına göre eğitim ve test veri setlerinde tahmin doğruluğunun değişimi.

En iyi nöron sayılarına sahip Tip 2-3 YSA modelinde test veri setinde sırasıyla her bir yük sınıfı için hassasiyet, duyarlılık ve f1 skoru değerleri Şekil 5.36-Şekil 5.38 arasındaki şekillerde sunulmuştur. Bu şekiller incelendiğinde, en iyi doğruluktaki Tip 2-3 YSA modelinin, Yük 1 ile Yük 6 arasındaki yüklerin sınıflandırmasında test veri seti için hassasiyet değerlerinin sırasıyla %99.43, %95.74, %96.27, %98.86, %94.08 ve %99.56 olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı yük sıralaması için testlerde görülen duyarlılık değerleri %97.40, %98.08, %97.02, %97.63, %97.22 ve %99.00 ve f1 skoru değerleri %98.40, %96.90, %96.65, %98.24, %95.62 ve %99.28'dir. Bu sonuçlardan, modelin Yük 6 sınıfını

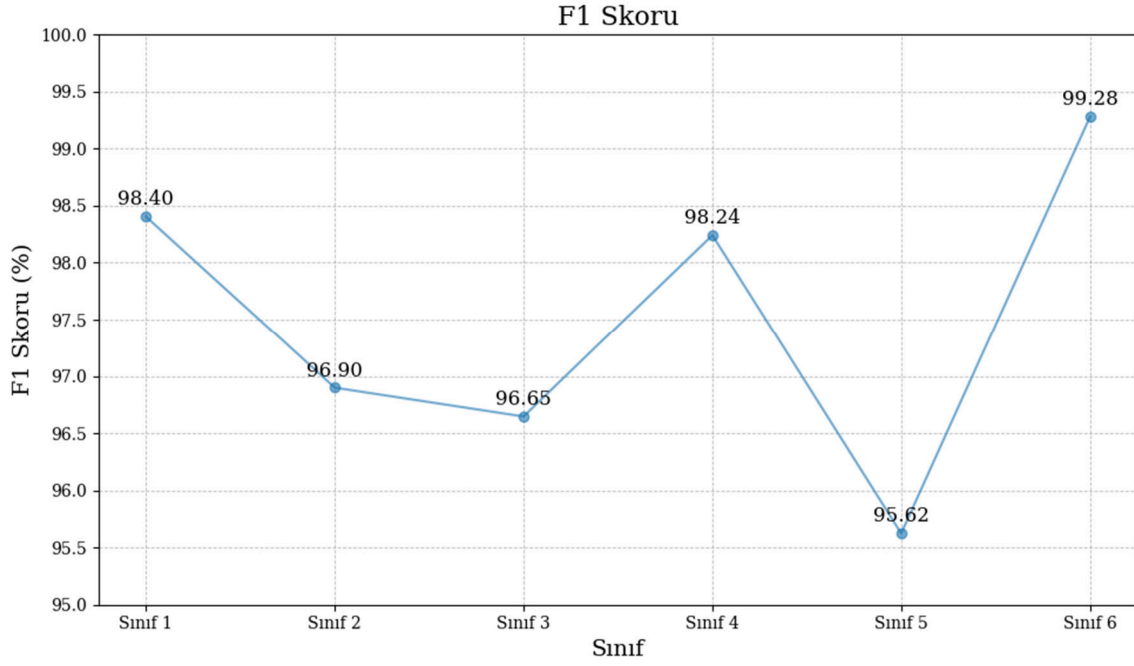
tespit etmede en yüksek performansa ve Yük 5 sınıfını tespit etmede ise en düşük performansa sahip olduğu belirtilebilir.



Şekil 5.36: En iyi Tip 2-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için hassasiyet değerleri.

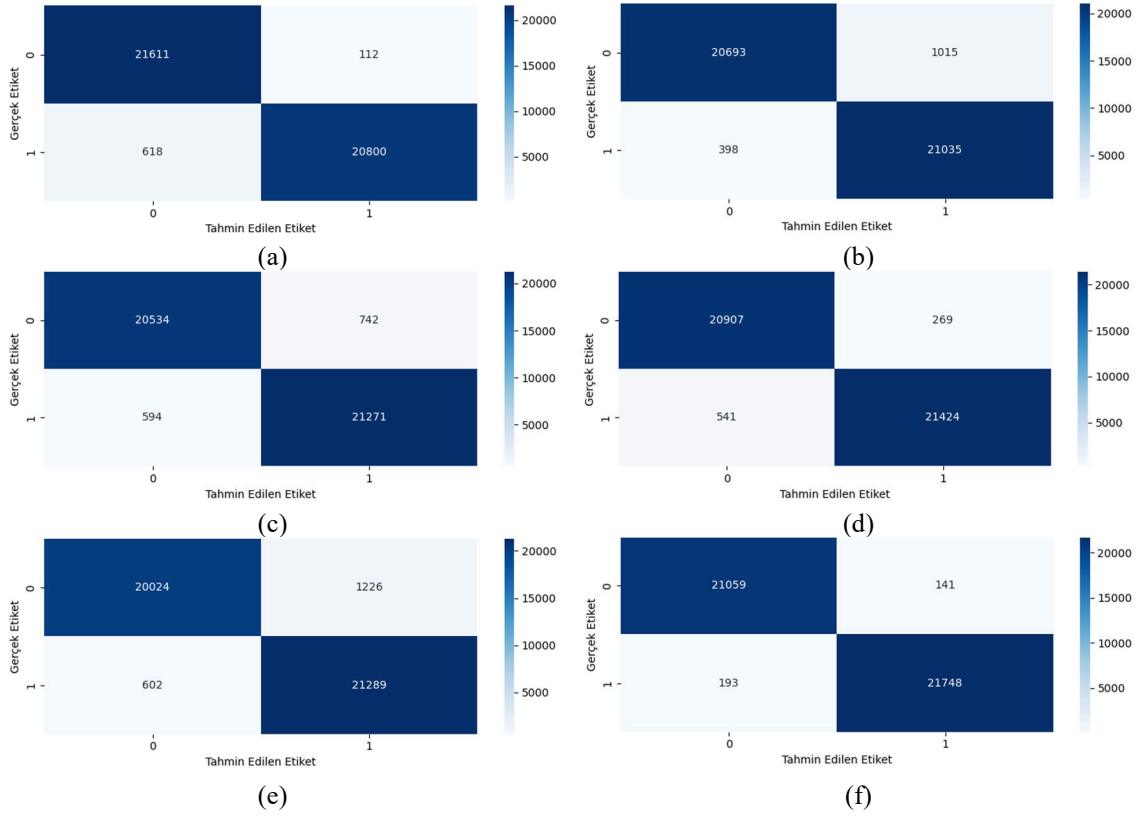


Şekil 5.37: En iyi Tip 2-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için duyarlılık değerleri.

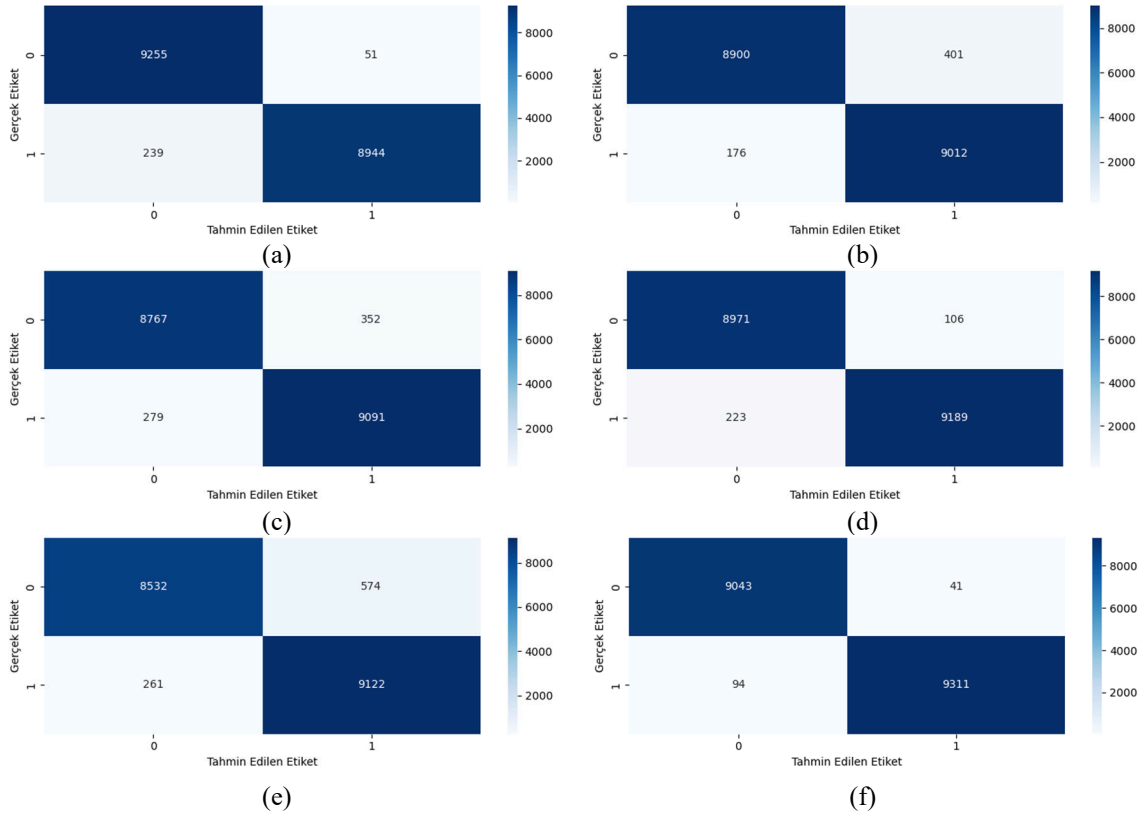


Şekil 5.38: En iyi Tip 2-3 YSA modelinin test veri setinde 6 farklı yük sınıfı için f1 skoru değerleri.

Son olarak, en iyi Tip 2-3 YSA modelin, 6 çıkış (yük) sınıfına ait karmaşıklık matrisleri eğitim veri seti için Şekil 5.39 ve test veri seti için Şekil 5.40'ta sunulmuştur. Şekil 5.39'dan eğitim sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının toplam 334 yanlış tahmin sayısı ile Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının ise toplam 1828 yanlış tahmin sayısı ile Yük 5 (Sınıf 5) olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 5.40'dan test sırasında en az yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının toplam 135 yanlış tahmin sayısı ile Yük 6 (Sınıf 6), en çok yanlış tahmin sayısına sahip yük sınıfının ise toplam 835 yanlış tahmin sayısı ile Yük 5 (Sınıf 5) olduğu ifade edilebilir.



Şekil 5.39: En iyi Tip 2-3 YSA modelinin eğitim veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.



Şekil 5.40: En iyi Tip 2-3 YSA modelinin test veri setinde sırasıyla (a) Yük 1, (b) Yük 2, (c) Yük 3, (d) Yük 4, (e) Yük 5 ve (f) Yük 6 için karmaşıklık matrisleri.

5.2.4 Gizli Katman Nöron Sayısı En İyilenen Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA

Modellerinin Performanslarının Karşılaştırmalı Analizi

Bu kısımda, iki gizli katmanlı ve gizli katmanlarında tanh, sigmoid ve ReLU aktivasyon fonksiyonlarına sahip en iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modellerinin kendi aralarında performans karşılaştırmasını yaparak, hem aktivasyon fonksiyonunun Tip 2 YSA modelinin performansına etkisini analiz etmek hem de en iyi Tip 2 YSA modelini belirlemek amaçlanmıştır.

Bu doğrultuda, Tip 2 sınıfına ait üç farklı YSA modelinin eğitim ve test doğrulukları Tablo 5.2’de sunulmuştur. Tabloya göre, hem eğitim hem de test aşamalarında en yüksek doğruluğa ulaşan model, gizli katmanlarında tanh aktivasyon fonksiyonu kullanılan Tip 2-1 modelidir. Bununla birlikte;

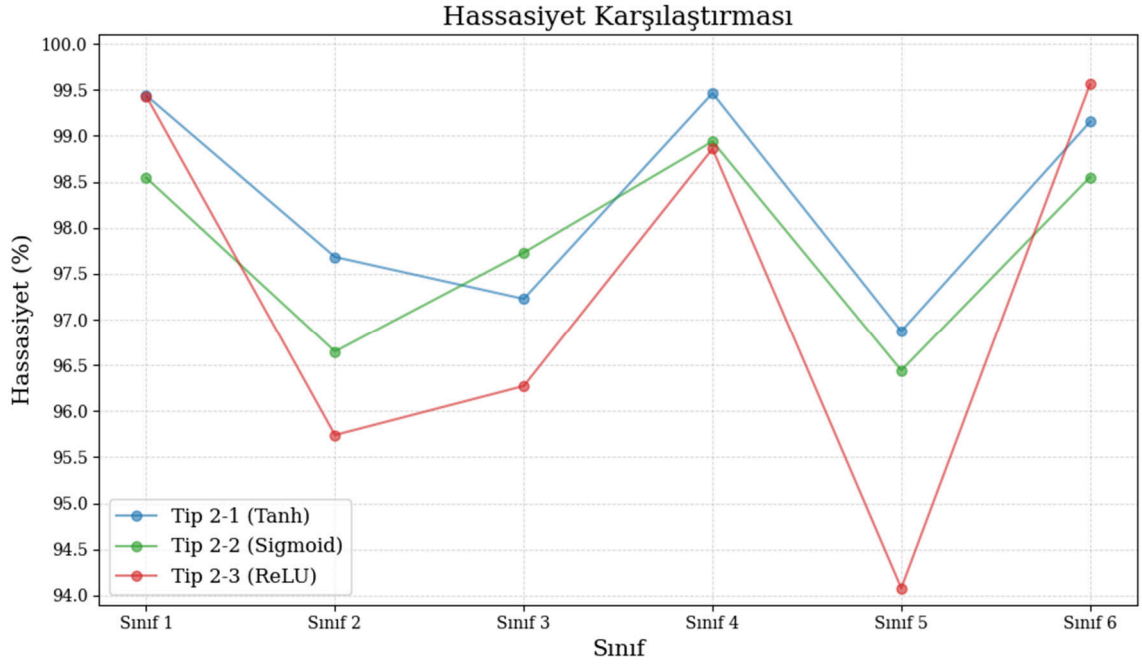
- Tip 2-2 modelinin eğitim ve test doğrulukları, Tip 2-1 modeline göre sırasıyla yaklaşık %3.25 ve %2.93 daha düşük,
- Tip 2-3 modelinin eğitim ve test doğrulukları, Tip 2-1 modeline göre sırasıyla yaklaşık %4.13 ve %3.69 daha düşüktür.

Tablo 5.2: En iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modelleri için eğitim ve test doğruluk performansları.

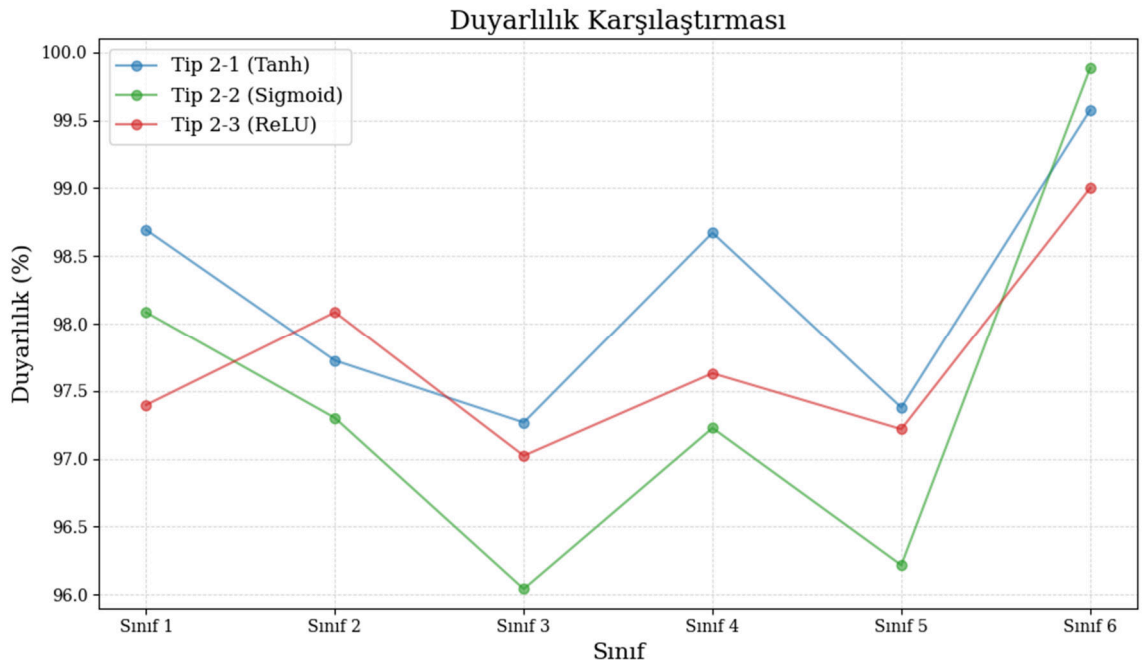
YSA Modeli	1. Gizli Katman Nöron Sayısı	2. Gizli Katman Nöron Sayısı	Eğitim Doğruluk	Test Doğruluk
Tip 2-1	26	30	%94.11	%93.56
Tip 2-2	30	30	%90.86	%90.63
Tip 2-3	30	26	%89.98	%89.87

Bu doğruluk karşılaştırmalarına ilaveten, en iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modellerinin 6 yük sınıfının tespitindeki hassasiyet, duyarlılık ve f1 skorları karşılaştırması sırasıyla Şekil 5.41-5.43’de verilmiştir.

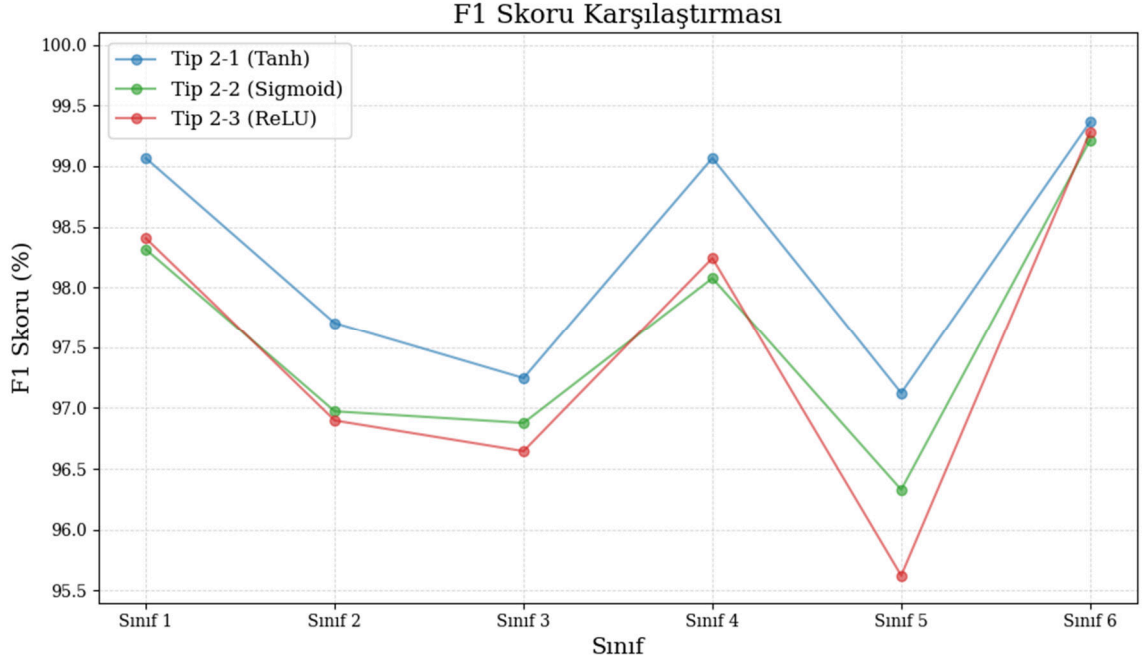
Bu şekillerden, gizli katmanında tanh aktivasyon fonksiyonuna sahip Tip 2-1 YSA modelinin diğer iki modele kıyasla hassasiyet, duyarlılık ve f1 skorları bakımından daha iyi performans gösterdiği ifade edilebilir.



Şekil 5.41: Gizli katman nöron sayıları en iyilenen Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği hassasiyetlerin karşılaştırması.



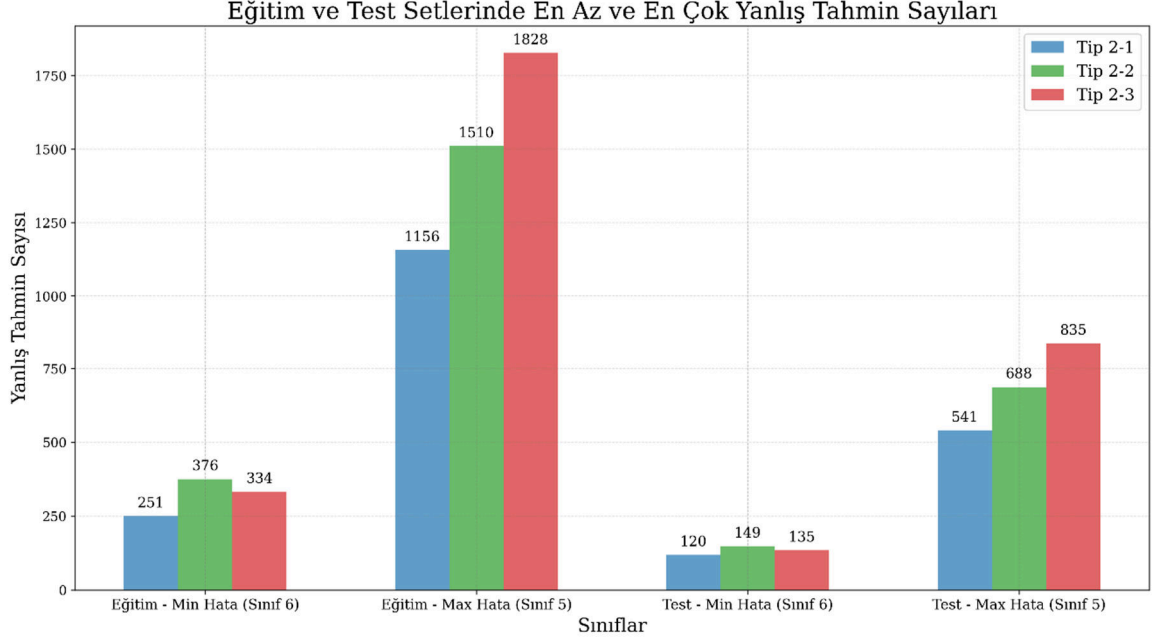
Şekil 5.42: Gizli katman nöron sayıları en iyilenen Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği duyarlılık karşılaştırması.



Şekil 5.43: Gizli katman nöron sayıları en iyilenen Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modellerinin 6 yük tipinin sınıflandırmasında gösterdiği F1 skorlarının karşılaştırması.

Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 için eğitim ve test veri setinde karmaşıklık matrislerinden elde edilmiş maksimum yanlış tahmin ve minimum yanlış tahmin sayılarının karşılaştırması ise Şekil 5.44'te verilmiştir. Şekil 5.44 değerlendirildiğinde,

- Üç YSA modelinin de aynı yükün (Sınıf 5 veya Yük 5) tespitinde en yüksek yanlış tahmini yaptığı, dolayısıyla bu yükün tespitinin diğerlerine nazaran daha kritik bir durum olduğu,
- Bununla birlikte, en iyilenmiş Tip 2-1 YSA modelinin Sınıf 5 yükün tespitinde diğer ikisine kıyasla daha az sayıda yanlış tahmin yaptığı, Tip 2-3'ün ise aynı yükün tespitinde en fazla yanlış tahmini yaptığı,
- Üç modelin de Yük 6'yı (sınıf 6) diğer yüklere nazaran en iyi şekilde tespit ettiği, sonuçlarına varılmaktadır.



şekil 5.44: En iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modelleri için en yüksek yanlış tahmin ve en düşük yanlış tahmin sayılarının karşılaştırması.

Buraya kadar sunulan sonuçlar bütünüyle ele alındığında, en iyi performansa sahip Tip 2 YSA modelinin en iyilenmiş Tip 2-1 modeli olduğu, en düşük performansa sahip YSA modelinin ise en iyilenmiş Tip 2-3 modeli olduğu söylenebilir.

5.3 Sonuç

Bu bölümde, öncelikle, 4. bölümde tanımlanan Tip 1-1 (1 gizli katmanlı ve gizli katmanında tanh aktivasyon fonksiyonu olan), Tip 1-2 (1 gizli katmanlı ve gizli katmanında sigmoid aktivasyon fonksiyonu olan) ve Tip 1-3 (1 gizli katmanlı ve gizli katmanında ReLU aktivasyon fonksiyonu olan) YSA modellerinin gizli katmanındaki nöron sayısı 6 ile 30 arasında değiştirilmiştir. Elde edilen çok sayıda Tip 1 YSA modellerinin performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu analizlerden,

- Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modellerinde en iyi gizli katman nöron sayılarının 30 olduğu,
- En iyilenmiş Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 (gizli katman nöron sayısı 30 olan) YSA modellerinin hassasiyet, duyarlılık ve f1 skorlarına bakıldığında, en iyi tespit

performanslarını Sınıf 6'da (ısıtıcı yük) ve en düşük tespit performanslarını da Sınıf 5'de (daimi kondansatörlü asenkron motor) gösterdikleri,

- En iyilenmiş Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 için maksimum yanlış tahmin ve minimum yanlış tahmin sayılarına bakıldığında, Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3'ün minimum yanlış tahmin sayısına Sınıf 6'da, maksimum yanlış tahmin sayısına Sınıf 5'de ulaştıkları,
- En iyilenmiş Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modelleri için eğitim doğruluk değerlerinin sırasıyla %82.46, %80.98, %73.87, test doğruluk değerlerinin sırasıyla %82.12, %80.96, %73.70 olduğu,
- Dolayısıyla tanh aktivasyon fonksiyonununun 1 gizli katmanlı YSA modeli (Tip 1) için diğer iki aktivasyon fonksiyonuna kıyasla daha iyi sonuç verdiği,

görülmüştür.

Bu sonuçlar değerlendirilerek Tip 1 (1 gizli katmanlı) YSA modellerinden elde edilen sonuçlar yeterli seviyede bulunmamıştır. Devamında, daha yüksek performans elde etmek için Tip 2-1 (2 gizli katmanlı ve gizli katmanlarında tanh aktivasyon fonksiyonu olan), Tip 2-2 (2 gizli katmanlı ve gizli katmanlarında sigmoid aktivasyon fonksiyonu olan) ve Tip 2-3 (2 gizli katmanlı ve gizli katmanlarında ReLU aktivasyon fonksiyonu olan) YSA modellerinde gizli katmanlardaki nöron sayıları 6 ile 30 arasında değiştirilmiştir. Elde edilen çok sayıda Tip 2 YSA modellerinin performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu analizlerden de;

- Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modellerinde en iyi 1. gizli katman nöron sayısının sırasıyla 26, 30 ve 30, en iyi 2. gizli katman nöron sayısının sırasıyla 30, 30 ve 26 olduğu,
- En iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3'ün hassasiyet, duyarlılık ve f1 skorlarına bakıldığında, en iyi performanslarını Sınıf 6 yükte en düşük performanslarını da Sınıf 5 yükte gösterdikleri,
- En iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 için maksimum yanlış tahmin ve minimum yanlış tahmin sayılarına bakıldığında, Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3'ün minimum yanlış tahmin sayısına Sınıf 6 yükte, maksimum yanlış tahmin sayısına Sınıf 5 yükte ulaştıkları,

- En iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modelleri için eğitim doğruluk değerlerinin sırasıyla %94.11, %90.86, %89.98, test doğruluk değerlerinin sırasıyla %93.56, %90.63, %89.87 olduğu, dolayısıyla tanh aktivasyon fonksiyonunun diğer iki aktivasyon fonksiyonuna kıyasla daha iyi sonuç verdiği,
 - Tip 2 modellerinin Tip 1 modellerine göre yüklerin tespitinde daha başarılı sonuçlar verdiği,
 - Bütün YSA modelleri genel olarak değerlendirildiğinde, en iyi performans gösteren YSA modelinin, %94.11 eğitim doğruluğu ve %93.56 test doğruluğuna sahip 2 gizli katmanlı, gizli katmanlarında tanh aktivasyon fonksiyonu olan, 1. gizli katmanında 26 nöron ve 2. gizli katmanında 30 nöron bulunan Tip 2-1 modeli olduğu,
- sonuçlarına ulaşılmıştır.

6. GENEL SONUÇ VE TARTIŞMA

Günümüz güç sistemlerinde harmonik bozulmaya sebep olan doğrusal olmayan karakterde güç elektroniği arayüzlü yükler ve yenilenebilir enerji temelli üretim birimlerinin sayıları ve güçleri artmıştır. Harmonik bozulma olayı, güç sistem elemanlarının özellikle enerji verimliliği, ömrü ve işletilmesi üzerinde olumsuz etkileri olan bir güç kalitesi sorunudur.

Bundan dolayı, harmonik üreten yüklerin tespiti ve sınıflandırması,

- En uygun sayıda ve güçte harmonik filtrelerin ve güç kalitesi iyileştirme elemanlarının tasarlanarak yine sistemde en uygun yerlere yerleştirilmesi,
- Ve böylece harmonik kirliliğin standartlarda belirlenen kabul edilebilir seviyelere düşürülmesi,

bakımından literatürde ilgi çeken bir konu haline almıştır.

Bunun neticesinde, literatürde, harmonik üreten yüklerin tespiti ve sınıflandırılması üzerine çeşitli yöntemler önerilmiştir. Harmonik sınıflandırma için literatürde önerilen yöntemler genel itibariyle yapay zeka temelli yöntemlerdir. Ancak, ulaşılabilen literatürde kaynak geriliminin harmonik bileşenlerinin genlikleri ve açılarının rassal olarak değiştiği sistem şartlarında, harmonik üreten yük tiplerinin sınıflandırılması probleminin çözümüne yönelik bir çalışmaya rastlanmadığı ifade edilebilir.

Bu tez çalışmasında,

- Kaynak geriliminin harmonik bileşenlerinin rassal bir şekilde değiştiği sistem şartları için,
- Gerilim harmonik bozulmasının yük akımı harmonik bozulmasına etkilerini dikkate alarak,

harmonik üreten evsel yük tiplerinin sınıflandırmasında kullanılmak üzere YSA temelli bir model geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda, bozulmuş kaynak gerilimine sahip olan ve yüklerin akım harmonik bozulmasının gerilim harmonik bozulmasına bağımlılığının dikkate alındığı bir sistem modeli zaman tanım bölgesinde oluşturulmuştur. Bu model oluşturulurken Matlab/SIMULINK yazılımı kullanılmıştır. Sistem modeline, rezistif yük besleyen tam dalga doğrultucu (Yük 1), rezistif yük besleyen yarım dalga doğrultucu (Yük 2), rezistif yük

besleyen AA kıyıcı veya dimmer devresi (Yük 3), batarya şarj eden tam dalga doğrultucu (Yük 4), daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motor (Yük 5) ve ısıtıcı yük (Yük 6) modelleri dahil edilmiştir. Böylece, beşi doğrusal olmayan karakterde olan altı farklı ev tipi yükün bozulmuş gerilimler altında sınıflandırması tez kapsamında dikkate alınmıştır.

Tez çalışmasında ilk olarak, rassal şekilde türetilen farklı spektrumlarda ve toplam harmonik bozulma değerleri %3.99 ile %7.36 arasında değişen 1000 adet bozulmuş gerilim altında, modellenen sistemdeki yüklerin harmonik ve diğer güç kalitesi indislerinin davranışı istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen çıktılar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- İlk dört yük önemli derecede akım harmonik bozulmasına sahip olup bunların sinüzoidal gerilim altında toplam akım harmonik bozulma (THDI) değerleri sırasıyla %146, %207, %63 ve %45'tir.
- Yük 1, 3 ve 4'ün sinüzoidal gerilim altındaki karakteristik akım harmonikleri tek numaralı olup Yük 2'nin sinüzoidal gerilim altında çektiği akım hem tek hem de çift numaralı harmoniklere sahiptir.
- Bununla birlikte, Yük 2 diğer yüklerden farklı olarak yüksek değerde DA bileşenine ($I_{DA}/I_1=0.72$) de sahiptir.
- Diğer taraftan, Yük 5'in sinüzoidal gerilim altında çektiği akım ihmal edilebilir harmonik bozulmaya sahipken, Yük 6 saf rezistif bir yük olması sebebiyle sinüzoidal gerilim altında akımı sinüzoidal dalga formuna sahiptir.
- Modellenen yüklerin sinüzoidal gerilim altında sırasıyla akım tepe faktörü (CFI) değerleri 3.22, 4.37, 2.03, 1.05, 1.41 ve 1.41, temel frekans güç faktörü (DPF) değerleri 0.997, 0.993, 0.840, 0.995, 0.913 ve 1.000, güç faktörü (PF) değerleri ise 0.561, 0.413, 0.710, 0.908, 0.913 ve 1.000'dır. Bu sonuçlardan CFI ve PF indislerinin yükün cinsine göre önemli oranda farklı değerler aldıkları sonucuna varılmıştır.
- Ayrıca, kaynak geriliminin bozulmuş dalga formuna sahip olduğu durumlarda, tüm yüklerin THDI, akım harmonik spektrum, CFI ve PF değerlerinin değişim gösterdiği, bu değişimlerin özellikle de Yük 1 ve 2 için çok geniş aralıklarda olduğu ifade edilebilir.
- Bununla birlikte, Yük 1, 3 ve 4'ün sinüzoidal olmayan kaynak gerilimleri altında atipik olarak çift numaralı harmonik akımları çektiği görülmüştür.

- Sinüzoidal anma gerilim şartlarında ihmal edilebilir akım harmonik bozulmasına sahip daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun bozulmuş gerilimler altında THDI değeri %15 seviyesine ulaşmıştır.

Tezde ikinci olarak; rassal şekilde üretilen 1000 adet bozulmuş gerilim ve 1 adet sinüzoidal gerilimin her birinde 6 farklı yükün sistemde olup olmama durumuna göre 63 (2^6-1) farklı yük kombinasyonu için 63063 (1001x63) adet ortak bağlantı noktası akımı verisi türetilmiş ve harmonik indisleri hesaplanmıştır. Devamında, Pearson korelasyonu ısı haritası yardımıyla, I_{dc} , I , THDI, CFI, DPF, I_3 , I_5 , I_6 , I_{12} , I_{13} , I_{15} , I_{16} , I_{17} , I_{19} ve I_{20} büyüklükleri sınıflandırma için özellik olarak belirlenmiştir. Ayrıca, veri setinde olan sonsuz (Inf) ve tanımsız (NaN) değerlerin bulunduğu satırlar çıkarıldıktan sonra, kutu yöntemi uygulanarak veri ön işleme yapılmıştır.

Tezde üçüncü adımda, çalışılacak YSA modellerinin tasarım özellikleri;

- Harmonikli yük sınıflandırma için önerilecek YSA modellerinin farklı kombinasyonlar ile denenmesi, buna göre Tip 1 YSA modelinin 1 giriş katmanı, 1 gizli katman ve 1 çıkış katmanından oluşması ve Tip 2 YSA modelinin 1 giriş katmanı, 2 gizli katman ve 1 çıkış katmanından oluşması,
- Bu YSA modellerinin giriş sayısının 15 ve çıkış sayısının 6 olması,
- Çıkış katmanında aktivasyon fonksiyonu olarak ilgili yüklerin sistemde var olup olmadığını ifade eden ikili (0 veya 1) sınıflandırmaya uygun olan sigmoid aktivasyon fonksiyonunun kullanımı,
- Tip 1 YSA modellerinde gizli katmandaki nöron sayısının 6 ile 30 arasında 4'er adım aralıklarla artırılarak denenmesi,
- Tip 2 YSA modelinde 1. ve 2. gizli katmanlardaki nöron sayılarının 6 ile 30 arasında 4'er adım artırılarak taranması ve bu aralıkta olası tüm nöron sayısı çiftlerinin göz önüne alınması,
- Tip 1 YSA modelinde gizli katmanda tanh, sigmoid ve ReLU aktivasyon fonksiyonlarının denenmesi,
- Tip 1 YSA gizli katmanında dikkate alınan aktivasyon fonksiyonlarının Tip 2 YSA gizli katmanlarında da dikkate alınması (tanh-tanh, sigmoid-sigmoid, ReLU-ReLU), olarak belirlenmiştir.

Bunlara ilaveten, aynı adımda, YSA modellerinin eğitimi ve testi için izlenecek yöntemlere ilişkin olarak,

- Kayıp (Hata) fonksiyonunu en düşük seviyeye indirgeyebilmek için Adam optimizasyon yönteminin uygulanmasına,
- Kayıp fonksiyonu olarak, ikili çapraz entropi fonksiyonunun kullanılmasına,
- Eğitim sürecinde, modelin doğru sınıflandırma oranını ölçmek ve model performansını değerlendirebilmek için doğruluk (accuracy) indisinin dikkate alınmasına,
- Eğitimlerin, 200 devir (epochs) boyunca 8 yığın boyutuyla (batch size) gerçekleştirilmesine,
- Sigmoid aktivasyon fonksiyonu çıkışının $[0,1]$ aralığındaki olasılık değerini, ikili (0 veya 1) değerlerine dönüştürebilmek için eşik değerinin 0.5 olarak belirlenmesine,
- Test aşamasında, doğruluk, duyarlılık, hassasiyet ve f1 skoru indisleri ile karmaşıklık matrislerinin performans değerlendirme aracı olarak dikkate alınmasına,

karar verilmiştir.

Son adımda, Tip 1-1 (1 gizli katmanlı ve gizli katmanında tanh aktivasyon fonksiyonu olan), Tip 1-2 (1 gizli katmanlı ve gizli katmanında sigmoid aktivasyon fonksiyonu olan) ve Tip 1-3 (1 gizli katmanlı ve gizli katmanında ReLU aktivasyon fonksiyonu olan) YSA modellerinin gizli katmanındaki nöron sayısı 6 ile 30 arasında değiştirilmiştir. Elde edilen çok sayıda Tip 1 YSA modellerinin performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu analizlerden,

- Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modellerinde en iyi gizli katman nöron sayılarının 30 olduğu,
- En iyilenmiş Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 (gizli katman nöron sayısı 30 olan) YSA modellerinin hassasiyet, duyarlılık ve f1 skorlarına bakıldığında, en iyi tespit performanslarını Sınıf 6'da (ısıtıcı yük) ve en düşük tespit performanslarını da Sınıf 5'de (daimi kondansatörlü asenkron motor) gösterdikleri,

- En iyilenmiş Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 için maksimum yanlış tahmin ve minimum yanlış tahmin sayılarına bakıldığında, Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3'ün minimum yanlış tahmin sayısına Sınıf 6'da, maksimum yanlış tahmin sayısına Sınıf 5'de ulaştıkları,
- En iyilenmiş Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3 YSA modelleri için eğitim doğruluk değerlerinin sırasıyla %82.46, %80.98, %73.87, test doğruluk değerlerinin sırasıyla %82.12, %80.96, %73.70 olduğu,
- Dolayısıyla tanh aktivasyon fonksiyonunun 1 gizli katmanlı YSA modeli (Tip 1) için diğer iki aktivasyon fonksiyonuna kıyasla daha iyi sonuç verdiği,

görülmüştür.

Bu sonuçlar değerlendirilerek Tip 1 (1 gizli katmanlı) YSA modellerinden elde edilen sonuçlar yeterli seviyede bulunmamıştır. Devamında, daha yüksek performans elde etmek için Tip 2-1 (2 gizli katmanlı ve gizli katmanlarında tanh aktivasyon fonksiyonu olan), Tip 2-2 (2 gizli katmanlı ve gizli katmanlarında sigmoid aktivasyon fonksiyonu olan) ve Tip 2-3 (2 gizli katmanlı ve gizli katmanlarında ReLU aktivasyon fonksiyonu olan) YSA modellerinde gizli katmanlardaki nöron sayıları 6 ile 30 arasında değiştirilmiştir. Elde edilen çok sayıda Tip 2 YSA modellerinin performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu analizlerden de;

- Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modellerinde en iyi 1. gizli katman nöron sayılarının sırasıyla 26, 30 ve 30, en iyi 2. gizli katman nöron sayılarının sırasıyla 30, 30 ve 26 olduğu,
- En iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3'ün hassasiyet, duyarlılık ve f1 skorlarına bakıldığında, en iyi performanslarını Sınıf 6 yükte en düşük performanslarını da Sınıf 5 yükte gösterdikleri,
- En iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 için maksimum yanlış tahmin ve minimum yanlış tahmin sayılarına bakıldığında, Tip 1-1, Tip 1-2 ve Tip 1-3'ün minimum yanlış tahmin sayısına Sınıf 6 yükte, maksimum yanlış tahmin sayısına Sınıf 5 yükte ulaştıkları,
- En iyilenmiş Tip 2-1, Tip 2-2 ve Tip 2-3 YSA modelleri için eğitim doğruluk değerlerinin sırasıyla %94.11, %90.86, %89.98, test doğruluk değerlerinin sırasıyla

%93.56, %90.63, %89.87 olduğu, dolayısıyla tanh aktivasyon fonksiyonunun diğer iki aktivasyon fonksiyonuna kıyasla daha iyi sonuç verdiği,

- Tip 2 modellerinin Tip 1 modellerine göre yüklerin tespitinde daha başarılı sonuçlar verdiği,
- Bütün YSA modelleri genel olarak değerlendirildiğinde, en iyi performans gösteren YSA modelinin, %94.11 eğitim doğruluğu ve %93.56 test doğruluğuna sahip 2 gizli katmanlı, gizli katmanlarında tanh aktivasyon fonksiyonu olan, 1. gizli katmanında 26 nöron ve 2. gizli katmanında 30 nöron bulunan Tip 2-1 modeli olduğu,

sonuçlarına ulaşılmıştır.

Yukarıda özetlenen çıktıların elde edildiği bu tez çalışmasının devamı niteliğinde, derin öğrenme algoritmalarının tez kapsamında dikkate alınan sistem ve şartlar için harmonik üreten yüklerin sınıflandırmasında kullanımının gelecekte çalışılması amalanmaktadır.

7. KAYNAKLAR

- [1] A. F. Zobaa, S. H. E. Abdel Aleem, M. E. Balci, “Introductory chapter: power system harmonics- analysis, effects and mitigation solutions for power quality improvement,” *Power System Harmonics: Analysis, Effects and Mitigation Solutions for Power Quality Improvement*, UK: IntechOpen, 2018, pp. 1-12.
- [2] M. E. Balci, D. Ozturk, O. Karacasu, M. H. Hocaoglu, “Experimental verification of harmonic load models,” *2008 43rd International Universities Power Engineering Conference*, Padua, Italy, 2008, pp. 1-4.
- [3] A. Karadeniz, O. Ozturk, A. Koksoy, M. B. Atsever, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu, “Accuracy assessment of frequency-domain models for harmonic analysis of residential type photovoltaic-distributed generation units,” *Solar Energy*, vol. 233, pp. 182-195, Feb. 2022.
- [4] A. Karadeniz, M. B. Atsever, A. Köksoy, O. Öztürk, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu, “Fotovoltaik dağıtık üretim birimleri için harmonik modellerin ölçüm temelli istatistiksel hassasiyet analizi,” *ENRES 2018*, Antalya, Turkey, 31 Ekim-2 Kasım 2018, syf. 346-356.
- [5] A. Karadeniz, M. E. Balci, “Fotovoltaik dağıtık üretim birimleri (FV-DÜB): güç kalitesine etkileri, uluslararası güç kalitesi standartları ve FV-DÜB barındıran dağıtım sistemleri için güç kalitesi iyileştirme yöntemleri,” *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, cilt 21, sayı 2, s. 882-903, Aralık 2019.
- [6] S. A. Papathanassiou and M. P. Papadopoulos, “Harmonic analysis in a power system with wind generation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 2006-2016, Oct. 2006.
- [7] H. Brantsæter, Ł. Kocewiak, A. R. Årdal, and E. Tedeschi, “Passive filter design and offshore wind turbine modelling for system level harmonic studies,” *Energy Procedia*, vol. 80, pp. 401–410, Jan. 2015.
- [8] G. K. Singh, “Power system harmonics research: a survey,” *European Transactions on Electrical Power*, vol. 19, no. 2, pp. 151–172, Mar. 2009.
- [9] IEEE Std C57.110™-2018 (Revision of IEEE Std C57.110-2008), “IEEE Recommended practice for establishing liquid-immersed and dry-type power and distribution transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents,” 31 Oct. 2018.

- [10] E. Arslan, Ş. Cantürk, M. E. Balci, "Transformatörlerin sinüzoidal olmayan şartlarda azami yüklenme oranı hesabı kısım 1: geliştirilen algoritma," *EEMKON 2015*, İstanbul, Türkiye, 19-21 Kasım2015, s. 38-42.
- [11] E. Arslan, Ş. Cantürk, M. E. Balci, "Transformatörlerin sinüzoidal olmayan şartlarda azami yüklenme oranı hesabı kısım 2: analiz sonuçları," *EEMKON 2015*, İstanbul, Türkiye, 19-21 Kasım2015, s. 43-47.
- [12] E. Arslan, M. E. Balci and M. H. Hocaoglu, "An analysis into the effect of voltage harmonics on the maximum loading capability of transformers," *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bucharest, Romania, 25-28 May 2014, pp. 616-620.
- [13] C. Demoulias, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, and K. Gouramanis, "Ampacity of low-voltage power cables under nonsinusoidal currents," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 584-594, Jan. 2007.
- [14] H. Wang, W. Zhou, K. Qian, and S. Meng, "Modelling of ampacity and temperature of MV cables in presence of harmonic currents due to EVs charging in electrical distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 112, pp. 127–136, Nov. 2019.
- [15] T. Drabek, "Derating of squirrel-cage induction motor due to rotating harmonics in power voltage supply," *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 735, Jan. 2023.
- [16] C. Debruyne, J. Desmet, S. Derammelaere and L. Vandeveldel, "Derating factors for direct online induction machines when supplied with voltage harmonics: A critical view," *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Niagara Falls, ON, Canada, 15-18 May 2011, pp. 1048-1052.
- [17] M. E. Balci, A. E. Emanuel, "Apparent power definitions: a comparison study", *IEEE*, vol. 6, pp. 2713-2722, Jan. 2011.
- [18] M. E. Balci, M. H. Hocaoglu, "New power decomposition for sinusoidal and nonsinusoidal conditions," *Proc. of IEEE ICHQP 2006*, Cascais, Portugal, 1-5 Oct. 2006, pp.1-6.
- [19] M. E. Balci, M. H. Hocaoglu, "Effects of source voltage harmonics on power factor compensation in ac chopper circuits," *Electrical Power Quality and Utilisation. Journal*, vol. 14, no.1, pp.53-60, Jan. 2008.
- [20] S. Yıldız, M. H. Hocaoglu, "Akım transformatörlerinin sinüzoidal olmayan şartlarda performansının simülasyon ile incelenmesi," *Elektrik, Elektronik, Bil. Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, İstanbul, 22-25 Eylül 2005, s. 437-441.

- [21] A. Cataliotti et al., “Metrological performances of voltage and current instrument transformers in harmonics measurements,” *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Houston, TX, USA, 14-17 May 2018, pp. 1-6.
- [22] M. E. Balci, H. Cemek, M. H. Hocaoglu, “Reaktif sayaçların sinüzoidal olmayan şartlarda performans analizi”, *Elektrik, Elektronik, Bil. Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, İstanbul, 22-25 Eylül 2005, s. 259-263.
- [23] B. Elmaslar, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu, “Aktif enerji ölçen sayaçların sinüzoidal olmayan şartlarda performans analizi”, *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK) 2005*, Kocaeli, 17-18 Mayıs 2005, s. 178-182.
- [24] W. Xu, “Comparisons and comments on harmonic standards IEC 1000-3-6 and IEEE Std. 519,” *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.00EX441)*, Orlando, FL, USA, 01-04 Oct. 2000, pp. 260-263.
- [25] M. E. Balci, “Optimal C-type filter design to maximize transformer’s loading capability under non-sinusoidal conditions,” *Electric power components and systems*, vol. 42, no. 14, pp. 1565–1575, Sep. 2014.
- [26] F. Z. Peng, “Harmonic sources and filtering approaches,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 18–25, July-Aug. 2001.
- [27] Z. Salam, P. C. Tan, A. Jusoh, “Harmonics mitigation using active power filter: A technological review,” *Elektrika Journal of Electrical Engineering*, vol. 8, no.2, pp. 17-26, 2006.
- [28] D. Kumar and F. Zare, “Analysis of harmonic mitigations using hybrid passive filters,” *2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, Antalya, Turkey, 21-24 Sep. 2014, pp. 945-951.
- [29] G. T. Heydt, “Identification of harmonic sources by a state estimation technique,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 569-576, Jan. 1989.
- [30] F. Mei and H. Sha, “Classification of the type of harmonic source based on image-matrix transformation and deep convolutional neural network,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 170854-170863, 2019.
- [31] M. E. Balci, O. Karacasu and M. H. Hocaoglu, “A detection method for harmonic producing loads,” *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009*, Bursa, Turkey, 05-08 Nov. 2009, pp. I-149-I-15.

- [32] M. E. Balci, M. H. Hocaoglu, “Frequency-domain power theory and metering of harmonic-pollution responsibility,” *Power Quality in Future Electrical Power Systems*, UK: IET, Mar. 2017, pp. 29-75.
- [33] F. Safargholi, K. Malekian and W. Schufft, “On the dominant harmonic source identification— part I: review of methods,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 3, pp. 1268-1277, June 2018.
- [34] N. Locci, C. Muscas, S. Sulis, “Multi-point measurement techniques for harmonic pollution monitoring: a comparative analysis,” *Proc. 6th Int. Workshop Power Definitions and Measurements Under Non-sinusoidal Conditions*, Milano, Italy, Oct. 2003, pp. 103-107.
- [35] F. Xu, C. Wang, K. Guo, Q. Shu, Z. Ma and H. Zheng, “Harmonic sources’ location and emission estimation in underdetermined measurement system,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-11, May 2021.
- [36] M. H. Jopri, A. R. Abdullah, J. Too, T. Sutikno, S. Nikolovski, and M. Manap, “Support-vector machine and naïve bayes based diagnostic analytic of harmonic source identification,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 20, no. 1, pp. 1-8, Oct. 2020.
- [37] A. Eslami, M. Negnevitsky, E. Franklin, and S. Lyden, “Review of AI applications in harmonic analysis in power systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 154, p. 111897, Feb. 2022.
- [38] M. H. Jopri, M. R. Ab Ghani, A. R. Abdullah, M. Manap, T. Sutikno, and J. Too, “K-nearest neighbor and naïve Bayes based diagnostic analytic of harmonic source identification,” *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 9, no. 6, pp. 2650–2657, Dec. 2021.
- [39] C. R. van Niekerk, A. P. J. Rens and A. J. Hoffman, “Identification of types of distortion sources in power systems by applying neural networks,” *IEEE AFRICON. 6th Africon Conference in Africa*, George, South Africa, 02-04 Oct. 2002, pp. 829-834.
- [40] S. Varadan and E. B. Makram, “Practical considerations in the application of neural networks to the identification of harmonic loads,” *Electric Power Systems Research*, vol. 30, no. 2, pp. 103–106, Jul. 1994.
- [41] D. Srinivasan, W. S. Ng and A. C. Liew, “Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 398-405, Jan. 2006.

- [42] A. F. Mubarak, T. Octavira, I. Sudiharto, E. Wahjono, and D. O. Anggriawan, "Identification of harmonic loads using fast fourier transform and radial basis Function Neural Network," *2017 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA)*, Surabaya, Indonesia, 26-27 Sep. 2017, pp. 198-20.
- [43] C. -H. Huang, C. -H. Lin, and T. -C. Ou, "Wavelets hybrid neural network for harmonic sources recognition with the V-I characteristics," *2009 Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC)*, Kaohsiung, Taiwan, 07-09 Dec. 2009, pp. 930-933.
- [44] C.-H. Huang and C.-H. Lin, "Multiple harmonic-source classification using a Self-Organization Feature Map network with voltage–current wavelet transformation patterns," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, no. 19, pp. 5849–5861, Oct. 2015.
- [45] A. Moradifar, A. Akbari Foroud, and M. Fouladi, "Identification of multiple harmonic sources in power system containing inverter-based distribution generations using empirical mode decomposition," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 8, pp. 1401–1413, Apr. 2019.
- [46] S. Z. Motlagh and A. A. Foroud, "Multiple harmonic sources identification including inverter-based distributed generations using empirical Fourier decomposition," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 17, no. 8, pp. 1932–1954, Mar. 2023.
- [47] W. Zhou, et al. "Review on the battery model and SOC estimation method", *Processes*, vol. 9, no. 9, p. 1685, Sep. 2021.
- [48] M. E. Balci, "Sinüzoidal olmayan şartlarda güç tanımları ve yük modelleri", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2004.
- [49] A. Gülmez ve S. Huseynli, "Enerji ihracatı ve ekonomik büyüme ilişkisi: Azerbaycan örneği," *Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, cilt. 5, sayı. 1, s. 9-23, Mart 2019.
- [50] H. D. Ovla ve B. Taşdelen, "Aykırı değer yönetimi," *Mersin Üniv Sağlık Bilim Dergisi*, cilt. 5, sayı. 3, s. 1-8, Eylül 2012.
- [51] M. Yılmaz and E. Arslan, "Effect of increasing number of neurons using artificial neural network to estimate geoid heights," *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 529-533, Feb. 2011, doi: 10.5897/IJPS10.626.

- [52] C. Bircanoğlu and N. Arıca, "A comparison of activation functions in artificial neural networks," *2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Izmir, Turkey, May 2018, pp. 1-4.
- [53] I. Akgül, "Activation functions used in artificial neural networks," *Academic Studies in Engineering*, Gece Kitaplığı, Ankara, Turkey, Oct. 2023.
- [54] A. A. Alkhouly, A. Mohammed, and H. A. Hefny, "Improving the performance of deep neural networks using two proposed activation functions," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 82249-82263, Jun. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3085855.
- [55] D. Lepadatu, L. Judele, and A.-R. Rosu, "Applying artificial neural networks to estimate the energy performance of buildings," *Int. J. Civil Struct. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 1-10, Apr. 2015, doi: 10.5897/IJPS10.626.
- [56] Q. H. Nguyen et al., "Influence of data splitting on performance of machine learning models in prediction of shear strength of soil," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2021, pp. 1-15, Feb. 2021, doi: 10.1155/2021/4832864.
- [57] G. Panchal, A. Ganatra, Y. P. Kosta, and D. Panchal, "Behaviour analysis of multilayer perceptrons with multiple hidden neurons and hidden layers," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 332-337, Apr. 2011, doi: 10.7763/IJCTE.2011.V3.288.
- [58] K. G. Sheela and S. N. Deepa, "Review on methods to fix number of hidden neurons in neural networks," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, pp. 1-11, Jun. 2013, doi: 10.1155/2013/425740.
- [59] A. Eladağ, "Korelasyona dayalı aykırılık saptama ve kestirimci bakım," Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2020.
- [60] G. Ser ve C.T. Bati, "Derin sinir ağları ile en iyi modelin belirlenmesi: mantar verileri üzerine keram uygulaması," *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, cilt. 29, no. 3, ss. 406-417, Ekim 2019.
- [61] I. Atli and O. S. Gedik, "VESUNETDeep: A fully convolutional deep learning architecture for automated vessel segmentation," *2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Sivas, Turkey, 24-26 Apr. 2019, pp. 1-4.
- [62] Y. Ho and S. Wookey, "The real-world-weight cross-entropy loss function: modeling the costs of mislabeling," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 4806-4813, 2020.
- [63] S. Ghosh, A. Dasgupta, and A. Swetapadma, "A study on support vector machine based linear and non-linear pattern classification," in *2019 International Conference*

on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), Palladam, India, Feb. 2019, pp. 613-618.
doi: 10.1109/ISS1.2019.8389465.

- [64] A. Luque, A. Carrasco, A. Martín, and A. de las Heras, “The impact of class imbalance in classification performance metrics based on the binary confusion matrix,” *Pattern Recognition*, vol. 91, pp. 216–231, Jul. 2019.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Damla AĞAÇA

Doğum tarihi ve yeri : 13.11.1998 ve Bursa

e-posta : dagacaa@gmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2022-2025
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2017-2021
Lise	Karacabey Anadolu Lisesi	2013-2017

Yayın Listesi

D. Ağaça, O. Karakaya, Ş. Cantürk, ve M. Balcı, “Çeşitli konut tipi yüklerin bozulmuş gerilimler altında akım harmonik bozulmasının istatistiksel analizi”, *BAUN Fen. Bil. Enst. Dergisi*, c. 27, sy. 1, ss. 282–296, 2025, doi: 10.25092/baunfbed.1593516.