

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİLİŞİM SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**OPTİMİZE EDİLMİŞ DERİN ÖĞRENME MODELLERİYLE
YORUMLANABİLİR VE DOĞRU AKILLI ŞEBEKE
KARARLILIĞI TAHMİNİ**

TÜRKÜCAN ERDEM

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİLİŞİM SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OPTİMİZE EDİLMİŞ DERİN ÖĞRENME MODELLERİYLE
YORUMLANABİLİR VE DOĞRU AKILLI ŞEBEKE
KARARLILIĞI TAHMİNİ

TÜRKÜCAN ERDEM

Doç.Dr. Süleyman EKEN
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Doç.Dr. Serdar SOLAK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Khalid YAYHA
Jüri Üyesi, İstanbul Gelişim Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 15.10.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik ve sosyal anlamda bana örnek olan ve doğru yolu gösteren akademik danışmanım Doç. Dr. Süleyman Eken hocama teşekkür ederim.

Aileme, arkadaşlarıma desteklerini esirgemedikleri ve yanımda oldukları için teşekkür ederim.

Tezimin savunma jürisine katılıp değerli yorumları ile destek olan Doç.Dr. Serdar Solak ve Dr. Öğr. Üyesi Khalid Yayha hocalarıma teşekkür ederim.

Eylül 2021

Türkücan ERDEM

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLOLAR DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR TARAMASI.....	6
1.1. Akıllı Şehirler	6
1.2. Akıllı Şebekelerde Büyük Veri Analizi ve Akıllı Şebeke Kararlılığı	10
1.3. AI Açıklanabilirliği ve Yorumlanabilirliği	18
2. AKILLI ŞEBEKE KARARLILIĞININ OPTİMİZE DERİN ÖĞRENME MODELLERİ İLE TAHMİNİ	23
2.1. Veri Seti Açıklaması	23
2.2. Optimize Derin Öğrenme Modelleri	25
3. AKILLI ŞEBEKE KARARLILIĞI TAHMİNİ İÇİN DENEYSEL SONUÇLAR.....	28
3.1. Model Tanımı ve Uygulaması.....	28
3.2. Deney Düzenegi	29
3.3. Performans Metrikleri	30
3.4. Performans Sonuçları	30
3.5. Son Teknoloji Çalışmalar ile Karşılaştırma	33
4. DERİN ÖĞRENME MODELİ ÜZERİNDE AÇIKLANABİLİRLİK VE YORUMLANABİLİRLİK İÇİN LRP	34
4.1. Deney Düzenegi	35
4.2. LRP İçin Modellerin Karşılaştırılması	35
4.3. Alakalık Skorları ile Modelin Yorumlaması	38
5. SONUÇLAR	40
5.1. Tez Kısıtları.....	42
5.2. İleriki Çalışmalar	42
KAYNAKLAR	43
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	47
ÖZGEÇMİŞ	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Önerilen Strateji İçin Akış Şeması.....	23
Şekil 2.2. Dört Düğümlü Yıldız Mimarisi.	24
Şekil 2.3. Veri Kümesi Nitelikleri İçin Korelasyon Matrisi.	26
Şekil 3.1. 24x24x12x1 Mimarisi.	28
Şekil 4.1. Bileşik LRP uygulaması.	34
Şekil 4.2. Farklı LRP Kurallarının karşılaştırılması.	37
Şekil 4.3. LRP-Epsilon İçin Alakalık Skorları.....	38



TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Artırılmış Veri Seti İçin Sonuçlar	31
Tablo 3.2. Orijinal Veri Seti İçin Sonuçlar.	32
Tablo 3.3. Farklı Teknikler Kullanarak Tahmin Doğruluğunun Karşılaştırılması.	32



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

6LoWPAN	:	IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (Düşük Güçlü Kablosuz Kişisel Alan Ağları Üzerinden IPv6)
AB	:	Avrupa Birliği
AI	:	Artificial Intelligence (Yapay Zekâ)
ANN-DT	:	Artificial neural-network decision tree (Yapay Sinir Ağı Karar Ağacı)
BoW	:	Bag of Words (Kelime Çantası)
BR	:	Bayesian Rate (Bayesian Olasılık)
CART	:	Classification And Regression Tree (Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı)
CEO	:	Chief Executive Officer (Baş yönetici)
CNN	:	Convolutional Neural Network (Evrışimli Sinir Ağları)
CoAP	:	Constrained Application Protocol (Kısıtlanmış Uygulama Protokolü)
ConCo	:	Power-consuming company (Enerji tüketen Firma)
DCP	:	Dominance Classifier and Predictor (Baskın Sınıflayıcısı ve Tahmin Edici)
DL	:	Deep Learning (Derin Öğrenme)
DMM	:	Dynamic Market Mechanism (Dinamik Market Mekanizması)
DNN	:	Deep Neural Network (Derin Sinir Ağı)
DNRC	:	Decentralized Nonlinear Robust Controller (Dağıtılmış Doğrusal Olmayan Dirençli Kontrolcü)
DoS	:	Denial-of-service (Hizmet reddi)
DR	:	Demand Response (Talep Yanıtı)
DSGC	:	Decentral Smart Grid Control (Merkezi Olmayan Akıllı Şebeke Kontrolü)
DT	:	Decision Tree (Karar Ağacı)
ED	:	Economic Dispatch (Ekonomik Teklif)
ENN	:	Extended Nearest Neighbor (Genişletilmiş En Yakın Komşu)
FNN	:	Feedforward Neural Network (İleri Beslemeli Sinir Ağı)
GBM	:	Gradient Boosted Machines (Gradyent Destekli Makineler)
GDP	:	Gross Domestic Product (Gayri safi yurtiçi Hasıla)
GenCo	:	Power-generating company (Enerji üreten firma)
GIS	:	Geographic Information System (Coğrafik Bilgi Sistemi)
GPRS	:	General Packet Radio Service (Genel Paket Radyo Hizmeti)
GPS	:	Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)
GPU	:	Graphics processing unit (Grafik İşleme Birimi)
GSM	:	Global System for Mobile Communication (Mobil İletişim için Küresel Sistem)
IBM	:	International Business Machines (Uluslararası İş Makinaları)

ICT	: Information and Communication Technologies (Bilgi ve İletişim Teknolojisi) Sistem)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	: Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
IP	: Internet Protocol (İnternet Protokolü)
IPSO	: Internet Protocol for Smart Objects (Akıllı Nesnelere için İnternet Protokolü)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Organizasyonu)
LED	: Light-emitting diode (Işık yayan diyot)
LRP	: Layer-Wise Relevance Propagation (Katmana göre Alakalık Geri Yayımı)
LSTM	: Long Short Term Memory (Uzun Kısa Süreli Bellek)
ML	: Machine Learning (Makine Öğrenmesi)
MOR	: Model Order Reduction (Model Mertebe Düşürme)
MPDP	: Marginal Packet Delivery Probability (Marjinal Paket Teslim Olasılığı)
NCS	: Network Controlled Sistem (Ağlı Kontrol Sistemleri)
NE	: New England
NETS	: New England Test System (New England Test Sistemi)
NN	: Neural Network (Sinir Ağı)
NSGC	: Network Controlled Smart Grids (Ağ Kontrollü Akıllı Şebeke)
NYPS	: New York Power System (New York Güç Sistemi)
OLED	: Organic Light-emitting diode (Organik Işık Yayan Diyot)
PFL	: Parametric Feedback Linearization (Parametrik Geri Besleme Doğrusallaştırma)
PMU	: Phasor Measurement Unit (fazör ölçüm birimi)
POD	: Proper Orthogonal Decomposition (Uygun Ortogonal Ayırıştırma)
PPP	: Purchasing Power Parity (Satınalma gücü paritesi)
RBFNN	: Radial basis function neural network (Radyal Tabanlı Fonksiyon Sinir Ağı)
RELU	: Rectified Linear Unit (Rektifiye Lineer Birim)
REST	: Representational State Transfer (Temsili Durum Transferi)
RNN	: Recurrent neural network (Tekrarlayan Sinir Ağı)
RS	: Remote Sensing (Uzaktan Algılama)
SA	: Situational Awareness (Durumsal Farkındalık)
SEM	: Smart Energy Measurement (Akıllı Enerji Ölçümü)
SG	: Smart Grid (Akıllı Şebeke)
SGD	: Stochastic Gradient Descent (Stokastik Gradyan İniş)
SIM	: Subscriber Identification Module (Abone Tanımlayıcı Modülü)
SVD	: Singular Value Decomposition (Tek değer Ayırıştırma)
SVM	: Support Vector Machines (Destek Vektör Makinesi)
SW	: Sliding Windows (Kayan Pencere)
SWM	: Smart Water Measurement (Akıllı Su ölçümü)
TCP	: Transmission Control Protocol (Aktarım Kontrol Protokolü)
TSA	: Transient Stability Assessment (Geçici Kararlılık Değerlendirmesi)
TU-Berlin	: Technische Universität Berlin (Berlin Teknik Üniversitesi)
UDP	: User Datagram Protocol (Kullanıcı Veri Birimi Protokolü)
VM	: Voting Method (Oylama Yöntemi)

WAC	:	Wide Area Controller (Geniş Alan Kontrolcüsü)
WAM	:	Wide Area Monitoring (Geniş Alan İzleme)
WAMS	:	Wide Area Measurement Systems (Geniş Alan Ölçüm Sistemleri)
WBCD	:	Wisconsin Breast Cancer Data Set (Wisconsin Meme Kanseri Veri Seti)
WECC	:	Western Electricity Coordinating Council
WM	:	Wireless Metering (Kablosuz Ölçüm)
WSN	:	Wireless Sensor Network (Kablosuz Sensör Ağı)
XAI	:	Explainable Artificial Intelligence (Açıklanabilir Yapay Zekâ)



OPTİMİZE EDİLMİŞ DERİN ÖĞRENME MODELLERİYLE YORUMLANABİLİR VE DOĞRU AKILLI ŞEBEKE KARARLILIĞI TAHMİNİ

ÖZET

Akıllı Şebekelerde (Smart Grid, SG), kullanıcı bilgileri toplanıp, arz bilgileri ile karşılaştırıldıktan sonra, müşterilerin kullanıma karar vermeleri için fiyat bilgileri gönderilmektedir. Merkezi Olmayan Akıllı Şebeke Kontrolcüsü (Decentral Smart Grid Control, DSGC) sistemleri; şebekenin frekansını, fiyat bilgisine bağlayarak çalışmaktadır ve bunu bir diferansiyel denklem ile temsil etmektedir. DSGC, kullanıcı davranışlarına ilişkin bazı çıkarımlar ile hareket etmektedir. Bu çalışmada, bu çıkarımlardan doğan sabit giriş ve eşitlik sorunlarını çözmek için, optimize edilmiş Derin Öğrenme (DL) modeli kullanımı önerilmektedir. SG'nin kararlılığını tahmin etmek amacıyla, birçok DL modeli ve DL modellerindeki parametreler denenip, karşılaştırılmaktadır. Daha iyi başarımlar elde etmek amacıyla, şebekenin simetrik olması kullanılıp, 10.000 örnekleme sahip veri setinden, arttırılmış, 60.000 örnekleme sahip bir veri seti elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, arttırılmış veri setinin kullanılması ve DL yardımıyla %99,62 doğruluk oranına sahip bir model elde edilmiştir. Optimize edici olarak en iyi sonucu Nadam'ın verdiği gözlemlenmiştir. DL modellerinin kara kutu problemini çözmek için, insan-anlaşılabilir bilgi çıkarımı çıkarmak amacıyla, sunulan DL modelinde Katmana Göre Alakalık Geri Yayımı (Layer-Wise Relevance Propagation, LRP) kullanılmıştır. Farklı katmana göre alakalık geri yayımı kuralları karşılaştırılmıştır. Girdilerin, kararlılık tahmini üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kullanıcıların reaksiyon zamanlarının en önemli etken olduğu, fiyat elastiklik katsayısının buna oranla %15-20 önem taşıdığı ve nominal güç üretim ve tüketiminin göz ardı edilebileceği keşfedilmiştir. Hem yüksek başarımlar gösteren hem de açıklanabilir bir kararlılık tahmin sistemi oluşturularak DL modellerinin, simüle edilmiş sistemlerde yeni öngörüler sunduğu ve dikkate alınması gerektiği gösterilmiştir; sistemin tahmin mekanizmalarının anlaşılması sağlanarak, kara kutu problemine çözüm üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açıklanabilir Yapay Zekâ, Akıllı Şebeke Kararlılığı, Katmana göre Alakalık Geri Yayımı, Merkezi Olmayan Akıllı Şebeke Kontrolcüsü, Optimize Derin Öğrenme.

INTERPRETABLE AND ACCURATE SMART-GRID STABILITY PREDICTION WITH OPTIMIZED DEEP MODELS

ABSTRACT

In a smart grid, consumer demand information is collected, centrally evaluated against current supply conditions and the proposed price information is sent back to customers for them to decide about usage. Decentral Smart Grid Control (DSGC) systems work by tying grid frequency to price data and they are described by a differential equation. DSGC systems assume some user behaviors. In this thesis, we suggested using Deep Learning (DL) models for solving two main problems arising from these assumptions, namely fixed inputs and equality issues. Multiple DL models and parameters for predicting smart grid stability are compared. In order to obtain a better result, the symmetry of the network is leveraged and an augmented data set with 60.000 samples is obtained from the data set with 10.000 samples. As a result of the study, a model with an accuracy rate of 99.62% is found. As for optimizer, nadam is found to give the best results. To solve the black box problem of deep learning models, Layer Relevance Propagation (LRP) is used in the suggested DL model to extract human-intelligible information. Different propagation rules are compared and the effects of the inputs on the stability prediction are examined. It is found that the reaction time of the users is the most relevant factor for smart grid stability. Compared to reaction time, the price elasticity coefficient found to have 15-20% of relevancy. The nominal power generation and consumption found to be irrelevant to smart grid stability. By constructing a stability prediction system that is both high-performance and explainable, it is been shown that DL models offer new insights in simulated systems and should be taken into account; By providing an understanding of the prediction mechanisms of the system, a solution for the black box problem is given.

Keywords: Explainable AI, Smart Grid Stability, Layer-Wise Relevance Propagation, Decentral Smart Grid Control, Optimized Deep Learning.

GİRİŞ

Dünyanın nüfusunun yarısı şehirlerde yaşamaktadır ve kısa bir süre öncesine göre daha fazla olan bu oran hızla yükselmektedir. 2050’de dünya nüfusunun %70’inin şehirlerde yaşaması beklenmektedir. Şehirler, gitgide yeni sorunlar ile karşılaşmaktadır [1]. Teknolojinin hızla ilerlemesi, bu sorunların çözümünü sağlamak için yeni yollar sunmaktadır. Bu çözümlerin sonucunda ortaya çıkan ve daha 50 yıl öncesine kadar önce bilim-kurgu sayılacak akıllı şehir kavramı ise şehirlerde teknoloji kullanılmasından çok daha fazlasını temsil etmektedir. Akıllı şehirler, teknolojiyi ve büyük veriyi kullanarak; vatandaşlarının hayat kalitesini geliştirmeyi, sürdürülebilir bir ekonomi yaratmayı, iklim değişikliği ile savaşmayı ve çok daha fazlasını amaçlamaktadır. Akıllı şehirler, bunu başarmak için Bilgi ve İletişim Teknolojilerini (Information and Communication , ICT), Şeylerin İnterneti (Internet of Things, IoT) gibi fiziksel sistemler ile birleştirmektedir; böylece gerçek zamanlı bilgiye dayalı seçimler yapılmasına olanak sağlanmaktadır [1-3].

Akıllı şehirleri mümkün kılan ve sürdürülebilirliği amaçlayan gelişmeler, aynı zamanda, yenilenebilir enerji kaynaklarının da yükselişine yol açmaktadır. Ancak, nasıl akıllı şehirlerin adaptasyonu beraberinde bazı sorunlar getirmekteyse, yenilenebilir enerji kaynaklarının adaptasyonu da kendi içinde bazı sorunlar ile gelmektedir. Yenilenebilir enerjinin yükselişinden önce, şebekeler, rolü kesin olan az sayıdaki üretici, şebekelerden ve çok sayıdaki tüketicilerden oluşturmaktaydı; bu iki grup arasında ise elektriğin tek yönlü aktığı bağlar vardı. Ancak, güneş enerjisi gibi evlerin bile kendilerine kurabileceği enerji üretim yollarının gelişmesiyle, tüketiciler sadece tüketici olmaktan çıkmış bulunmakta, artık “prosumer” adı verilen hem tüketici hem de üreticiler. Ürettikleri enerjii kendi başlarına kullanabilmenin yanı sıra şebekeye de verebilmektedir. Tek yönlü elektrik hatlarının iki yönlü olmasını gerekli kılan bu değişiklik; üretim, tüketim ve enerji akışını çok daha karmaşık bir hale sokmaktadır [4]. Ayrıca, eski şebekelerde, üretim görevi gören yüksek eylemsizliğe sahip elemanların, güneş enerjisi gibi düşük eylemsizliğe sahip elemanlar ile

değiştirilmesi; bu, daha karmaşık sistemlerin eskisinden de güvenilir olmasını gerekli kılmaktadır [5].

Yeni senaryonun getirdiği gerekliliklerin nasıl çözüleceğine dair araştırmalar bir süredir akademik olarak araştırılmaktadır; akıllı şehir kavramının uygulamalarından biri olan SG'lerin kararlılığına özel bir ilgi duyulmaktadır [6].

SG'ler, tüketici talebi hakkında bilgi toplayıp, bunu o anki arza göre değerlendirip, bu arz talep dengesi üzerinden elektrik için bir ücret çıkarıp bu ücreti kullanıcılara kullanıp kullanmayacaklarına karar vermeleri için yönlendirilmektedir. Bu süreç zaman-bağımlı olduğu için, dinamik olarak SG'nin kararlılığını bulmak kritik önem taşımaktadır. Enerji arz ve talebindeki dalgalanmaları analiz etmek için sistemin teknik kısmı dışında, enerji fiyatlarının üzerindeki diğer ekonomik etkilerin de dikkate alınması gerekmektedir.

DSGC, bunu, şebekenin temel özelliklerinden birini, frekansı, kullanarak çözmeye çalışmaktadır. Aşırı üretim zamanlarında şebekenin frekansı artarken, az üretim zamanlarında ise şebekenin frekansı azalmaktadır. Bu, aslında, enerji fiyatını dinamik olarak bulmak için tüm gerekli bilginin, şebekenin frekansında bulunabileceği anlamına gelmektedir [7]. Her kullanıcıda frekans ölçmek, ağ yöneticisi için gerekli olan tüm bilgiyi vermektedir. Böylece, ağ yöneticisi, enerji fiyat teklifini güncelleyebilir ve kullanıcıları bilgilendirebilir.

Schafer ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki [7] gibi açıklanıp, Sinopoli ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki [8] gibi değerlendirilen DSGC'nin, diferansiyel denklem tabanlı matematiksel modeli; üç tüketim düğümüne enerji sağlayan bir güç kaynağı (merkezi bir üretim düğümü) içeren, referans dört düğümlü yıldız mimarisi için şebeke kararsızlığını belirlemeyi amaçlamaktadır. Model; toplam güç dengesi ile (her bir şebeke düğümünde üretilen veya tüketilen nominal güç) ilgili girdileri, katılımcıların fiyat değişikliklerine tepki olarak tüketimi ve üretimi ayarlamaya yönelik tepki süresi ve enerji fiyat esnekliği girdilerini dikkate almaktadır. Bu, bizi şebeke kararlılığının tahmin edilebileceği bir matematiksel model ile bırakmaktadır. Eğer iş burada bitse, kararlılık için tahmin aracı sağlanmış ve ikili sınıflandırma sorunu çözülmüş olurdu ancak bu model büyük basitleştirmelere dayanmaktadır. Diferansiyel

denklem tabanlı bir modelin kullanımı için yine de yöntemler bulunmaktadır; geleneksel bir yaklaşım, bir değişken alt kümesi için sabit değerlerin ve kalan alt küme için sabit değer dağılımlarının bir birleşimiyle simülasyonları çalıştırmaktan oluşmaktadır. Arzamasov ve arkadaşlarının [9] bahsettiği iki ana soruna; “sabit girdi” ve “eşitlik” sorunlarına açmaktadır. Bu tez çalışmasında, bunların çözümü için optimize DL modellerinin kullanımını önerilmektedir.

Son birkaç on yıl içerisinde DL yöntemleri literatürde yüksek başarımları ile popüler hale gelse de yerini aldıkları karar ağaçları (Decision Tree, DT) gibi yöntemlere göre dezavantajları bulunmaktadır; DL yöntemleri literatürde kapalı kutular olarak geçmektedir. DT gibi verdiği kararlar insan tarafından açıklanabilir ve yorumlanabilir modellerin aksine, kara kutu modellerinin karar mekanizmaları perdenin arkasında saklanmaktadır. Bu ise, bu çalışmadaki gibi çalışma mekanizmalarını bilmenin önem taşıdığı konularda yaygın kullanımı engellemektedir. Bunun için bir süredir literatürde açıklanabilir yapay zekâ (Explainable Artificial Intelligence, XAI) konusuna önem verilmektedir.

XAI daha açıklanabilir modeller üretirken aynı zamanda yapay zekâyı (Artificial Intelligence, AI) en başta ilginç kılan yüksek başarımlarını korumayı amaçlamaktadır; böylece, Gradyent Destekli Makineler (Gradient Boosted Machines, GBM) gibi zayıf öğrencileri, güçlü öğrencilere çeviren ama bu aşamada anlaşılabilirliğin bir kısmını kaybeden yöntemlerden sıyrılmaktadır. DL modeli açıklanabilir kılınarak:

- Değişkenler arasındaki nedensel ilişkiler bulunabilmektedir.
- Sistemin işleyişine dair öngörüler verilebilmektedir.
- Modellerin güvenilebilir açıklamaları, modelin kullanıcılarına güven sunabilmektedir.
- Önyargılar belirlenerek tarafsızlık sağlanabilmektedir.
- Model oluşturma sırasında, geliştiricinin ve disiplin dışı kişilerin daha içli dışı olması sağlanabilmektedir.
- Güvenlik sağlanabilmektedir [10].

XAI için birçok yaklaşım bulunmaktadır; bunlar arasından, bu çalışmada önerilen DL modeli için en uygun yaklaşımı seçmek önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, Bach ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada sunulan LRP yöntemi kullanılmaktadır [11]. Bu yöntem ile DL modelleri üzerinde hangi girişlerin en önemli olduğunu gösterilmektedir.

Tez çalışması kapsamında, Schafer ve arkadaşlarının kullandığı gibi bir şebekede [12] simüle edilmiş sonuçlar üzerinde, SG kararlılığı tespiti için birçok DL modeli ve DL modelleriyle ilgili parametreler denenmiştir; sonuçları diğer son teknoloji yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Deneme sonucu bulunan ve önerilen DL modeli üzerinde LRP uygulanarak; hangi girdilerin SG kararlılığı için en yüksek önem taşıdığı gösterilmiştir ve araştırma yardımı ile sistem yorumlanmıştır.

Bu çalışmanın literatüre katkılarını özetlemek gerekirse;

- Optimize DL modelleri ile SG kararlılığını tahmin etmek için etkili bir yol sunulmaktadır. Sunulan DL modelinin yüksek başarımla DL modellerinin, SG kararlılığı konusunda dikkate alınması gerektiği gösterilmektedir.
- Çalışılan şebekenin simetrik olma özelliği kullanılıp, artırılmış veri seti sunulmaktadır; bu veri seti yardımıyla başarımla yükseltilmektedir.
- SG kararlılığı ve benzeri konularda, DL işle yaygın kullanım arasında duran kara kutu sorununa, DL insan-anlaşılabilir kılınarak, çözüm üretilmektedir.
- Simüle edilmiş bir elektrik şebekesinin çalışma mekanizma dair öngörü sunularak gelecekteki çalışmalar için iyi bir başlangıç noktası sunulmaktadır.

Tezin birinci bölümünde literatür araştırması yapılmıştır. Üç kısma ayrılan bu literatür araştırmasının ilk kısmında, SG'lerin ana konusunu olan akıllı şehirler ile ilgili çalışmalar incelenmiştir. Literatür araştırmasının ikinci kısmında, SG'ler ve SG'lerde kararlılık tahmini ile çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü kısımda ise genel olarak AI açıklanabilirliği ve tez çalışmasında kullanılan yöntem ile ilgili araştırma yapılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde veri setinin açıklaması ile optimize DL modellerine ilişkin bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, ilk kısımda, DL modelleri ile kararlılık tahmini için olan deney düzeneği verilmiştir. İkinci kısımda; modellerin tanımı, nasıl uygulandığı ve parametrelerine dair bilgiler paylaşılmıştır. Üçüncü kısımda bir sonraki kısımda kullanılmak üzere performans metrikleri paylaşılmıştır. Dördüncü kısımda hem arttırılmış hem de orijinal veri seti üzerinde tanıtılan modeller denenmiştir; performansları gösterilmiştir ve bulgular tartışılmıştır. Son kısımda ise literatürdeki diğer son teknoloji çalışmalar ile karşılaştırmaya yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde, bir önceki bölümde en iyi performansa sahip olduğu tespit edilen modelin üzerinde açıklanabilirlik ve yorumlanabilirlik amacıyla LRP uygulanmıştır. İlk kısımda, bunun için gereken deney düzeneğine dair bilgi verilmiştir. İkinci kısımda, LRP'nin farklı çeşitleri karşılaştırılmış ve aralarından ilerlemek için en uygun olanı seçilmiştir. Üçüncü kısımda ise seçilen kural ile girdilerin alakalık skoru alınmış, yorumlanmış ve literatürdeki diğer bulgular ile karşılaştırılmıştır.

Beşinci ve son bölümde ise sonuçlar ile birlikte tezin kısıtlarına ve ileride yapılabilecek çalışmalara değinilmiştir.

1. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde literatür taramasının detayları yer almaktadır. Akıllı şehirler, akıllı elektrik şebekeleri ve AI açıklanabilirliği üzerine araştırma yapılmıştır.

1.1. Akıllı Şehirler

Şehirler sürekli olarak değişim içindedirler ve karmaşık dinamiklere sahiptirler. Dünya çapında, kırsal alanlardan şehirlere büyük bir akım gerçekleşmektedir, şehirlerde yaşayan insanların oranı sürekli olarak yükselmektedir [2]. Şu an dünya nüfusunun yarısı şehirlerde yaşamaktadır, 2050’de bu oranın %70 olması beklenmektedir [1]. Şehirlerin performansı artık sırf fiziksel altyapıya değil, aynı zamanda bilgi iletişimi ve sosyal altyapıya da dayanmaktadır. Bunun için, ortaya atılan “Akıllı Şehirler” kavramı, tüm modern şehir üretim faktörlerini ortak bir çatı altında toplamaktadır. Bu yüzden, akıllı şehirler ve uygulamalarıyla ilgili literatürde birçok araştırma yapılmaktadır.

Caragliu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [2], akıllı şehirlerin ana odağının ICT olduğu sunulmaktadır. Avrupa Birliği (AB) ve diğer uluslararası kurumlar, ICT tabanlı şehir gelişiminin önemine dikkat çekmektedir. Ancak, ICT’nin kalitesi akıllı şehrin tek tanımı değildir; insan kapitalinin ve eğitimin, şehir gelişimi üzerindeki rolü de önem taşımaktadır. Geçmişte kalifiye işçi gücü fazla olan şehirler, daha fazla kalifiye işçi çekmeyi başarmaktadır. Mekânsal homojenliğe önem veren AB politikaları için, bu, sorun oluşturmaktadır. Çalışma, akıllı şehrin karakteristiklerini; ağırlı bir altyapının ekonomik verim ile sosyal/kültürel/şehir yaşamını güçlendirmek için kullanımı, iş ön planda şehir gelişimi, birbirinden fazla sosyal sınıfların katılımına ve teknolojiden ne kadar etkilendiğine odak ve çevresel sürdürülebilirlik olarak vermektedir. Bunları ele alarak; “insan ve sosyal kapital ile geleneksel (taşıma) ve modern (ICT) iletişim altyapısına yapılan yatırımların sürdürülebilir ekonomik gelişim, yüksek bir hayat standartı ve doğal kaynakların akıllı yönetimi beslediği, katılımcı yönetsel şehirler” olarak akıllı şehirleri tanımlamaktadır. Bu şehirlerin akıllılığı için; e-devlet

(e-yönetim), kişi başı gayri safi yurtiçi hasıla- satın alma gücü paritesi (Gross Domestic Prouct – Purchasing power parity, GDP-PPP), eğlence endüstrisinde çalışma oranı, multimodal erişim, toplu taşıma uzunluğu ve insan kapitali şeklinde kriterler verilmektedir. Multimodal erişim, toplu taşıma uzunluğu ve erişilebilirlik ile GDP arasında güçlü bir bağ bulunmaktadır. Eğlence sektörünün uzun sürede şehir gelişimi üzerinde etkisi literatürde tartışmaya açık bir konu olsa da, çalışma, yaratıcı sınıf (problemleri çözmek veya değer yaratmak için yeni bilgi ve fikirlerin yeni birleşiminde uzmanlaşmış meslekler topluluğunda çalışan insanlar) ve yaratıcı işlerde çalışan insan oranı ile GDP per capita arasında hafif bir korelasyon bulmaktadır. E-devlet ile GDP per capita arasında pozitif bir korelasyon da görülmektedir ama çalışma, aynı zamanda, zengin şehirlerin e-devlete daha önem verebildiğine dikkat çekmektedir. Neoklasik teorilere göre insan kapitali, ekonomik performans için güçlü bir göstericidir, ancak çalışma insan kapitali ile GDP per capita arasında kompleks bir ilişki (ikinci dereceden bir eğri) göstermektedir.

2008’de IBM baş yöneticisi (Chief Executive Officer, CEO) Samuel Palmisano, Yabancı İlişkiler Konseyine ‘Akıllı Gezegen’ konseptini öne atan bir konuşma yapmıştır. 2009’da IBM CEO’su aynı konuşmayla ilgili Obama’dan pozitif geri dönüş almıştır. Aynı yılda, IBM’in Çin’deki CEO’su, ‘akıllı gezegen’ konseptini son strateji olarak öne sürmüştür. Zamanın Çin başbakanı Wen Jiabao, Wuxi’deki IoT enstitüsünü ziyaretinde sensor ağının gelişiminin öneminin üzerinde durmuştur. Kehua Su ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre; IBM’in akıllı gezegen konsepti geleceğin bilgi teknolojisini şebekeler, taşıma sistemler, hastaneler gibi yapılar ile birleştirip IoT ile ICT’nin birleşimini sağlamayı amaçlamaktadır. Akıllı şehirler ise akıllı gezegen konseptinin belli bölgelere uygulanmasıdır. Akıllı şehirler; algı, ağ ve uygulama katmanlarından oluşmaktadır. Dijital şehir; uzaktan algılama (Remote Sensing, RS), Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System, GPS), Coğrafik Bilgi Sistemi (Geographic Information System, GIS) gibi bilgileri toplumsal kullanım amacıyla kurulacak coğrafi bilgi platformu için kullanım anlamına gelmektedir. Böylece akıllı şehir, dijital şehir ve IoT’nin birleşimidir. Akıllı şehir için; toplu altyapı kurulumu, platform kurulumu ve aplikasyon sistemlerinin kurulumu arasında özellikle önem taşıyan aplikasyon sistemleri kurulumunu, çalışma; kablosuz şehirlerin kurulması, sensör cihazlarının IoT ile birleştirilip akıllı evlerin kurulması, akıllı taşıma

sistemlerinin kurulması, akıllı sosyal servis ve yönetimin oluşturulması, şehir yönetimi için kablosuz teknolojiler yardımıyla e-devlet gibi sistemler aracılığı ile şebeke kontrol mekanizmalarının oluşturulması, akıllı sağlık hizmetlerinin kurulması, turizm sisteminin akıllılaştırılması olarak özetlemektedir [3].

Oliveira ve Campolargo'nun yapmış olduğu çalışmada [13], dijital toplumun yükselişinin getirdiği; sosyal bağlılık ve sürdürülebilir ekonomiler kurmak arasındaki gerginliğin altı çizilmektedir. Şehirlerin, insan kapitalininin tüm avantajını kullandığında 'İnsan Akıllı Şehirler' haline geleceği savunulmaktadır. Peripheria, CitySDK ve MyNeighbourhood gibi yenilikçi projeler ile gelen yeni yönetim modelleri, şehir sakinlerinin, şehir servisi yönetimi konusunda daha fazla katkıda bulunmasını sağlamaktadır. Çalışma, akıllı şehir konseptinin ICT endüstrisi tarafından yaratıldığını ve endüstrinin ilk başta vatandaşların katılımını sağlamakta başarısız kalan ve otoritelerin sahipliğini üslenmek istemediği başarısız akıllı servisler sürdürdüğünü savunmaktadır. Toplum ve otoritelerin birlikte katılımı için modeller sunmayı amaçlayıp İnsan Akıllı Şehir ismiyle sundukları paradigmayı, şehirlere entegre etmek istemektedirler. Çalışmada, Lisbon, Milan, Aalborg ve Birmingham'da uygulanan MyNeighbourhood projesi örnek olarak verilmektedir; proje mahalle içi sosyal bağları tekrardan yaratmak ve güçlendirmeyi amaçlamaktadır. ICT, lokal seviyede kullanıcı verisini almak için kullanılmaktadır; iş birliği içindeki toplumların, alt seviyeden yukarıya yenilik ortaya koyması hedeflenmektedir. Çözüm; mahalleleri/toplulukları yeniden kurmak, onları güçlendirmek ve değerlerini ölçeklemek şeklinde üç aşamaya dayanmaktadır.

Büyük veri, hükümetler tarafından akıllı şehirlerin sürdürülebilirliği ve gelişimini desteklemek için kullanılmaya başlanmıştır. Şehirleri buna iten, akıllı şehirlerin getirdiği ekonomik, çevresel ve sosyal faydaları kazanmaktır. Nuaimi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre [14], akıllı şehirlerin getirdiği bazı avantajlar; kaynakların verimli kullanımı, daha iyi servisler ile daha verimli iş modelleri ile daha az boşa harcama ile daha iyi yaşam kalitesi sunmak ve veri ile kaynak paylaşımı sağlamaktır. Büyük verinin, akıllı şehirlerde kullanılması sırasında karşılaşılan sorunlar olarak ise; elde edilen büyük verinin, büyük kısmının yapısal olmaması, şehrin farklı bölümlerinin arasındaki veri paylaşımının sağlanması ve yeteri kadar veri

toplanması ile vatandaşların mahremiyet haklarının korunması arasındaki ince çizginin sağlanması, birçok kaynaktan gelen verinin kalitesinin düşük olması, toplanan verilerin bir kısmı gizli olacağı için, bu verilerin izinsiz kullanıma ve saldırılara karşı korunması, şehrin boyutunun büyümesinin getireceği trafik gibi sorunlar ile savaşabilmek olarak verilmiştir. Getirdiği gereklilikler ise; büyük veri yönetimi, veri işleme platformları, akıllı ağ altyapısı, gelişmiş algoritmalar, açık ve standart teknoloji, saklanan veri/iletişim ağları/işleme merkezleri için güvenlik, halkın bilgilendirilmesi, hükümetlerin standartlar oluşturmada rol alması ve bunlar ile birlikte her uygulamanın getireceği fonksiyonel ve işlevsel gereklilikler olarak listelenmiştir.

Akıllı şehirlerin çevresel sürdürülebilirliğe odağı, aydınlatma sistemlerinin bu çatı içinde önemli bir konu olmasına yol açmıştır. Aydınlatma, dünyanın elektrik kullanımının %19'una ve sera gazlarının emisyonunun %6'sına yol açmaktadır. Şehir aydınlatması bir şehir için güvenlikten, toplu kullanım alanlarını mümkün kılmasına kadar birçok sebepten dolayı önem ifade etmektedir. Akıllı aydınlatma sistemleri; daha yüksek verim ve daha az negatif etki amacıyla kontrol teknolojileri ve sensörler yoluyla alanlar için aydınlatma yöntemleri anlamına gelmektedir. LED ve OLED gibi teknolojiler, bu konu için bir devrimi temsil etmektedir. Castro ve arkadaşlarının [1] yapmış olduğu çalışmada, LED teknolojisine tabanlı akıllı sistemlerin avantajı; %50-%70 arası enerji tasarrufu, gelişmiş yönetilebilirlik ve dayanıklılık olarak sunulmaktadır. Kablosuz sistemlerin ortaya çıkması sayesinde düşük masraflı ve basit kurulumlar yapılabildiğinin altı çizilmektedir. Kronolojik planlama, çevreye göre tepki gösterme, özel etkinlikler için özel planlama yapma, alarm durumlarını tespit etme gibi akıllı sistemlere özel avantajlar da listelenmektedir. Daha sonrasında, Akıllı Nesneler İçin İnternet Protokolü (Internet Protocol for Smart Objects, IPSO) uygulama ara yüzü, Kısıtlanmış Uygulama Protokolü (Constrained Application Protocol, CoAP) ve Düşük Güçlü Kablosuz Kişisel Alan Ağları üzerinden IPv6 (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks, 6LoWPAN) gibi standartları kullanarak, akıllı nesneler için basit ama verimli bir RESTful tasarım modeli sunulup, bu ara yüzün akıllı aydınlatma için nasıl kullanılabileceği gösterilmiştir.

Aydınlatma sistemleri dışında akıllı şehir ile öne çıkan bir diğer alan ise akıllı elektrik ölçümüdür. Bu, müşteri davranışlarını değiştirip, farkındalıklarını arttırmak için

kullanılmaktadır. Su şebekeleri için Akıllı Enerji Ölçümü (Smart Energy Measurement, SEM); evlerde su ölçüm cihazlarıyla, borularda algılama cihazlarıyla ve merkez veri tabanına gerçek zamanlı bilgi yollamasıyla Kablosuz Sensör Ağı (Wireless Sensor Network, WSN) oluşturmaktadır. Akıllı Su Ölçümü (Smart Water Measurment, SWM), kullanıcı tarafından bakıldığında beklenmedik durumlar için uyarı sumaktadır. Gabrielli ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [15], SWM düğüm/veri çifti birleştiricisi prototipi oluşturulmuştur. Bu prototip, akıllı su şebekesinin uzak bir düğümü olarak, enerji toplayıcı güç şebekesi kullanarak, algılama için batarya ve elektrik şebekesi kullanımından kaçınılmaktadır. 169 MHz'de çalışan Kablosuz Ölçüm (Wireless Metering, WM) Bus, algılayıcı düğümler ile veri toplayıcısı olarak çalışan geçitler arasında bağ sağlamaktadır ve Mobil İletişim için Küresel Sistem (Global System for Mobile Communication, GSM) /Genel Paket Radyo Hizmeti (General Packet Radio Service, GPRS) ağı ile toplanan veriyi uzaktaki bir platforma iletmektedir. 868 MHz yerine 169 MHz kullanımı veri iletim mesafesini arttırmaktadır. Enerji toplayıcı olarak ticari bir türbin kullanılmaktadır, bu süper kapasitörleri besliyor. Boşalmış süper kapasitörlerin dolması, klasik bir ev kullanıcısının sahip olduğu su akış hızıyla, birkaç dakika sürmektedir, eğer süper kapasitörler gereken voltajın biraz altında ise birkaç saniyede dolmaktadır. Çalışmada, günümüzdeki toplu ağların SIM'siz cihazları kapsamak için uzantısı olan Capillary Network'ün altını çizmektedir. Gelecekteki IoT cihazların SIM içermemesi beklendiğinden, Capillary Network için bir standart olmadığı sürece her işlem için ad hoc bir ağ kurma gerekliliğinin üzerinde durulmaktadır.

1.2. Akıllı Şebekelerde Büyük Veri Analizi ve Akıllı Şebeke Kararlılığı

DSGC modeline özgü basitleştirmelerin üstesinden gelmek için alternatif yaklaşımlar denenmiştir. Venayagamoorthy, yaptığı çalışmada [16], kararlılık bağlamında durumsal farkındalık (Situational awarness, SA) tanıtmaktadır. SA, belli bir zaman ve mekân içinde çevredeki elemanların algılanması anlamına gelmektedir. SA, güvenli ve verimli SG uygulaması için kritik önem taşımaktadır. Daha fazla bilgi toplamak belirsizliği azaltmamaktadır, belirsizlik algılanan veride bulunmaktadır. İstenilen akıllı sistemler için; anlam-verme, karar verme ve uyarılama ajanları ile merkezlerinde bilgi tabanı bulunmaktadır. Zaman kısıtlaması bulunan karmaşık uygulamalar için akıllı

anlam-verme gerekmektedir. Çalışma, akıllı anlam-verme için; NN'leri, bulanık mantık sürü zekâsını ve uyarlanabilir kritik tasarımlarını ümit verici olarak görmektedir. Bulanık mantık tabanlı yaklaşım, aynı zamanda, ağ kararlılığı için de umut verici olarak durmaktadır. Geniş alan izleme (Wide Area Monitoring, WAM) gerekli olarak görünmektedir. Daha fazla ara bağlantı ve havuz veya kaynak gibi davranan tak ve çalıştır öğeleriyle, hücresel sinir ağları (Neural Network, NN) ve stokastik tanımlayıcılar dâhil olmak üzere gelişmiş izleme sistemleri öğrenme işlevlerine ihtiyaç duyulduğu bulunmuştur.

Arzamasov ve arkadaşları hali hazırdaki altyapıya büyük değişiklikler gerekmeden talep yanıtı (Demand Response, DR) uygulayan bir sistem önermiştir [9]. Bu sistem büyük miktar veri toplama ve işleme gerektirmemektedir. Elektrik fiyatını şebekenin frekansına bağlamaktadır. Önerilen ara yüz, eşitlik sorunu ve sabit girdi sorunu gibi bazı varsayımlara sahiptir. Bu iki sorun ile ilgilenmek için sistem, farklı dizayn noktaları ile incelenmektedir ve sonuçlara DT uygulanmaktadır. Büyük girdiler ile baş etmek için girdiler özelliklere toplanmıştır. Yapılan araştırmada, hızlı adaptasyonun kararlılığı geliştirdiği bulunmuştur. 8 sn gecikme için sistem her zaman kararsız olarak bulunmuştur. Ancak, başka kullanıcı hızlı reaksiyon gösterdiği ve ortalama reaksiyon zamanı ortalama olduğu sürece, bir kullanıcının 8 saniyeden fazla reaksiyon zamanına sahip olabileceği ve sistemin kararlı kalacağı gösterilmiştir. Yavaş tepki veren tüketici, bu durumda, avantajlı olarak bulunmuştur. Çalışmada, az tepki zamanlarıyla tepki etkisinden kaçınma ile yüksek tepki zamanlarıyla havzayı arttırma arasındaki takas gösterilmektedir. Yüksek ortalama zamanlarının, kararlılık üzerinde pozitif etkisi olduğu da bulunmuştur. Ancak, daha fazla genelleme için yer olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, çalışmada genel bir bakış için iyi olan, ancak saf kararlılık bölgeleri bulmak için yeterli olmayan %80 başarı oranı sağlanmaktadır. Yapılan analizin, 10 kullanıcı üstündeki büyük şebekelere genişletilmesinin zorluğuna değinilmektedir.

Ağlı Kontrol Sistemleri (Network Controlled System, NCS) paket düşmesi, gecikmesi ve düzensiz varışı gibi performans düşürücü sorunlardan mustarıdır. Enerji sistemleri literatüründe, sinyallerin iletimi; ideal, kayıpsız ve rölesiz olarak ele alınmaktadır. Singh ve arkadaşları bu sorunların etkilerini, Ağ Kontrollü Akıllı Şebeke (Network Controlled Smart Grids, NCSG) üzerinde denemektedir [6]. Bu iş için hem Kullanıcı

Veri Birimi Protokolü (User Datagram Protocol, UDP) hem de Aktarım Kontrol Protokolü (Transmission Control Protocol, TCP) dikkate alınmıştır. Her ne kadar UDP ve benzeri protokoller TCP gibi protokollere göre daha düşük performans verseler de TCP gibi protokollere sahip kontrol mekanizmalarının hem analizinin hem de uygulanmasının zorluğu yüzünden tercih edilmektedir [8]. Eğer gecikme, örnekleme aralığından fazla ise paketlerin geciktiği varsayılmaktadır. Eğer paket kaybı yaşanmıyorsa, döngünün, kararlı sönümlü olduğu varsayılmaktadır. Paket kaybı, çıkış ölçütlerinin kaybına yol açmaktadır ve böylece kontrolcü tahminleri düşmektedir. Çalışmada; birbirine bağlı New England test sistemi (New England Test Sistemi, NETS) ve New York güç sisteminin (New York Power System, NYPS) indirgenmiş eşdeğeri olan 16 makineli 68 bus modeli ile bir vaka çalışması yapılmaktadır. Örnekleme aralığı olarak 0,1 sn seçilmiştir. Minimal paket kaybı ile NCS'nin performansı, Marjinal Paket Teslim Olasılığı (Marginal Packet Delivery Probability, MPDP) ile birlikte bile, ideal sistemin klasik kontrolüne benzer bulunmuştur. Her sistem ideal durumdayken, NCS daha iyi performansa sahip olarak gözlemlenmektedir. NCS, sistemdeki salınımları, daha kısa sürede ve daha az gayret ile sönümleyebilmektedir. Gerçekte beklenen paket teslim kalitesinde, NCS, daha iyi performans göstermektedir. Daha fazla örnekleme oranları, daha iyi paket teslim oranı gerektirmektedir. 0,85 teslim oranı ile NCSG istikrarlı olarak bulunmuştur. NCSG'nin akıllı bir şebeke için salınımlı kararlılık payı sağlama konusunda iyi bir potansiyele sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Ayar ve arkadaşları Dağıtılmış Doğrusal Olmayan Dirençli Kontrolcü (Decentralized Nonlinear Robust Controller, DNRC) önermiştir [5]. SG'ler siber-saldırı risklerini yükseltmektedir ve fiziksel kısıtlamalar ile gelmektedir. Fazör Ölçü Birimi (Phasor Measurement Unit, PMU), kararlılığı ve güvenliği, gerçek zamanlı sistem durumu vererek arttırmaktadır; ancak, büyük boyutta veri birikimine ve olası olarak gecikmeye yol açmaktadır Yüksek süre durumluğa sahip enerji üretim elemanlarının, düşük süre durumluğa sahip elemanlar ile değişmesiyle daha dirençli sistemler gerekmektedir. Büyük girdilere ve iletişim gecikmelerine dirençli, kesin model bilgisi gerekmeyen DNRC sunulmuştur. 100 ms iletişim gecikmesi ve 20 ms kontrol giriş gecikmesi ile, tüm 10 jeneratör, 3.5 sn civarında senkronize hız bölgesine (59.94 Hz ile 60.06 Hz arası) yakınsamaktadır. Pratik sınırlar için kontrol değerlendirilmiştir ve Parametrik

Geri Besleme Doğrusallaştırma (Parametric Feedback Linearization, PFL) kontrolcüsü ile karşılaştırılmıştır. DSS Max güç oranı %10'a varana kadar, oran yükseldikçe sabitlik süresi düşmektedir. PFL kontrolcüsü, gecikmeye benzer seviyede direnç göstermemektedir. 50 ms gecikmeye kadar dengeleme süresi benzer iken 50 ms üzerinde PFL sistemi stabilize edememektedir. Eğer ikisinde de DSS Max güç oranı 5'in üzerinde ise ikisi de stabilize edebilmektedir. Eğer gecikme 100 ms üzerinde ise, PFL, jeneratörleri dengeleyememektedir; önerilen kontrolcü, tüm sistemler için 800 ms altında bunu başarabilmektedir. Önerilen kontrolcü, yüksek gecikme oranlarında, PFL'den daha iyi performans vermektedir. 1 sn gecikme ve 20ms kontrol girişi gecikmesine kadar telafi edebilmektedir.

Sistem bozulmasına yol açan olaylar; hizmet reddi (Denial-of-service, DoS), sahte veri enjeksiyonları, anahtarlama saldırıları ve fiziksel sorunları içermektedir. Farraj ve arkadaşları DoS ve anahtarlama saldırılarına karşı reaktif yaklaşımlar üzerinde durmuşlardır. PFL, depolamadan enerji almak veya depolamaya enerji vermek için EES'yi kullanmaktadır [17]. Voltaj, sinyal kararlılığı ve Geniş Alan Kontrolcüsü (Wide Area Controller, WAC) gibi alakalı sorunlar çalışmaya katılmamıştır. Önerilen kontrolcü, gecikmelere karşı uyarlanabilmektedir ve iletişim gecikmelerine uyum sağlayabilmektedir. New England (NE) 39 bus ve WECC 9 bus sistemleri test olarak kullanılmaktadır. PFL kontrolcülerini, sistem verilerini kullanarak, jeneratörleri kararsız duruma daha agresif şekilde senkronize etmektedir. Siber-fiziksel bir PFL denetleyicisi, kazanç çizelgeleme tasarımına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Lokal sensöre sahip olmayan ajanlar için, DFL kontrolcüsü de sunulmuştur. Uyarlamalı denetleyicinin gecikme süresi 150 ms'nin altında olduğunda; stabilize olduğu, ancak siber-fiziksel FPL denetleyicisi için bu sürenin 225ms olduğu bulunmuştur. Önerilen denetleyici, özellikle yüksek iletişim gecikmesi için uyarlanabilir denetleyiciye göre, büyük bir güç kazancına sahiptir. DFL denetleyicisi ile farklı jeneratörlerin hızlı bir şekilde stabilize olduğu; ancak lokal, sensörleri olmayan jeneratörlerin daha fazla zaman aldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, diğer siber saldırı türleri de dahil olmak üzere, siber bilinçli geniş alan denetleyici şemalarını ve diğer tür denetleyici şemalarını araştırmak önerilmektedir.

Bejestani ve arkadaşları hiyerarşik işlemsel kontrol mimarisi sunmuşlardır [18]. Güç şebekelerinde arz ve talep dengesi, çoklu zaman ölçeklerine sahip hiyerarşik kontrol şemaları kullanılarak sağlanmaktadır; birim seviyesi ana seviye, alan seviyesi ikinci seviye ve Ekonomik Teklif (Economic Dispatch, ED) gerçekleşen üçüncü seviyeye sahiptir. Ana kontrolcü için fiyat yanıtı, DR ve düzenleme yanıtı DR'ı ele almaktadırlar. Çalışmada, düşük gecikmeli iletişim ağı aracılığıyla enerji üreten firma (Power-generating company, GenCo), enerji tüketen firma (Power-consuming company, ConCo) ve ISO bilgi alışverişine dayalı dinamik bir gönderi sistemi önerilmiştir. Piyasa için durum uzayını, duruma bağlı ödeme fonksiyonlarını, eylemleri ve d-adım tahminini kullanan Dinamik Piyasa Mekanizması (Dynamic Market Mechanism, DMM) da tanıtılmıştır. DMM seviyeleri arasındaki koordinasyon ve bir adım ilerisi tahmininden dolayı, rüzgâr enerjisinde dalgalanmalar meydana gelirken, işlemsel kontrol kullanıldığında daha az rezerve ihtiyaç duyulmaktadır. Önerilen kontrolcü, daha büyük takip eden rüzgâr kesintisi ve daha düşük rezerv maliyeti ile sonuçlanmaktadır; daha az üretim maliyeti ve rezerv maliyetinde azalma sağlamaktadır. Önerilen sistemi uygulamanın, sosyal yardımları 97,8 \$/sa'ten 134,2 \$/sa'e yükseltebileceği bulunmuştur. Yinelemeler için gereken çözüm süresi, pratik uygulamalar için yeterince küçük bulunmuştur. Çözüm 4, 30 ve 118 bus sistemlerinde test edilmiştir. 1 mbps veri hızı için, 10^7 yineleme; birçok ISO için ve gerçek zamanlı bir pazar için iyi olan 1,5 sn iletişim süresi sunulmuştur. Jeneratörlerden birinin bağlantısı kesildiğinde sistem bunu telafi edebilmektedir; önerilen kontrolcü olmadan hiçbir restorasyon sağlanmamaktadır.

Bozulma Sonrası Geçici Kararlılık Değerlendirmesi (Transient Stability Assessment, TSA) gerçek zamanlı olarak uygulanabilmektedir. Gerçek zamanlı olarak kabul edilmesi için TSA'nın bir sonraki ölçüm verileri gelmeden sonuçları bulması gerekmektedir. Gerçek zamanlı TSA sisteminde Makine Öğrenmesi (Machine Learning, ML) algoritmaları kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemler çevrimdışı-çevrimiçi olarak kategorize edilebilmekte veya kararlılık için yalnızca bozulma sonrası verileri kullanılabilir. Bunlar, sistemin matematiksel modeline bağlıdır. Yüksek karmaşıklık ve yürütme süreleri, acil durum kontrolünü sınırlanmaktadır. Zaman gecikmeleri, Geniş Alan Ölçüm Sistemlerinde (Wide Area Measurement Systems, WAMS) gürültü eklemektedir. Sonuçların olasılıksal olması, tekrarlılığı

sınırlamaktadır. Bunları çözmek için büyük şebekelerde kullanılmak üzere, Kayan Pencere (Sliding Windows, SW) tabanlı TSA önerilmektedir [19]. Güç sistemi karmaşık olduğundan, doğrusal olmayan Model Mertebe Düşürme (Model Order Reduction, MOR) kullanılmaktadır. MOR için Uygun Ortogonal Ayrıştırma (Proper Orthogonal Decomposition, POD) kullanılmakta ve POD operatörü olarak basitliği ve hızı nedeniyle Rastgele Tek Değer Ayrıştırma (Singular Value Decomposition, SVD) seçilmiştir. SWA-TSA sırasıyla: (i) ölçüm yapmaktadır ve anlık görüntü matrisi oluşturmaktadır, (ii) POD, (iii) düşük boyutlu modeli tahmin etmektedir, (iv) yüksek boyutlu durumları tahmin etmekte ve TSA yapmaktadır (v) gerekirse acil eylem yapmaktadır. SWA-TSA için iki sürgülü pencere kullanılmaktadır; POD için SSW, tahmin için ise PSW. Yöntem, ayrıca, kararsız makineleri de bulmaktadır. 4 makine 11 bus sistemi ve önerilen (AR) yöntemi olmak üzere iki alanda bir durum çalışması yapılmış ve durum uzayı, prony ve polinom modelleri ile karşılaştırılmıştır. Uzay durumu, yönteminin daha iyi bir tahmin oranına sahip olduğunu; ancak, AR'nin daha basit ve daha hızlı olduğu bulunmuştur. NE 10 makine sistemi kullanılmış ve sistem kararlılığının bulunması için TSI-COI ve TSI-RRA test edilmiştir. Çalışmada, TSI-RRA'ya kıyasla TSI-COI'de daha düşük kararsızlık süreleri hesaplanmıştır. Daha sonra ülke çapında sistem test edilmiş ve sadece TSI-COI kullanılmıştır. Bulunan kararsızlık süresi, gerçek zamanlı sistemler için maksimum 5 ms'den azdır. Önerilen sistemin, aynı zamanda, çoklu salınım kararlılığını da tahmin ettiği bulunmuştur. Bulunan kararsızlık süresi, gerçek zamanlı sistemler için maksimum 5 ms'den azdır. Önerilen sistemin aynı zamanda çoklu salınım kararlılığını da tahmin ettiği bulunmuştur. Önerilen algoritma, üç alt sistemden oluşmaktadır; bunlar arasında en büyük maliyete sahip olan SVD için maliyet, makine sayısı ile doğrusal olarak artmaktadır. Çok sayıda makine için Grafik İşleme Filmi (Graphics Processing Unit, GPU) kullanılabilir. SWA-TSA'nın, ayrıca, verilerin eksik olması durumunda kararlılığı ve kararlı makineleri öngördüğü de gösterilmiştir. SWA-TSA bağımsız yinelemelere sahip olduğundan, sistem çalışırken gerekli parametreler değişebilir. Tahmin pencerelerinin de en az 0,2 sn olması gerekmektedir.

Schäfer'in yapmış olduğu çalışmada, şebeke frekans bilgisini kullanarak arz ve talepleri dengelemek için DSGC önerilmektedir [12]. Frekansın fazla üretim zamanlarında artması ve yetersiz üretim zamanlarında azalması ana fikri

oluşturmaktadır. Tüketicilerin elektrik fiyatının, doğrudan şebeke frekansının bir fonksiyonu olduğu bir sistem önerilmekte ve bu sistem için belirli gecikme değerlerinin riskli olduğu gösterilmektedir. Çalışma, bu sorunu çözmek için frekansı ortalamayı önermektedir. Önerilen DSGC, DR'yi gerçekleştirmekte, ekonomik etkileri analiz etmekte ve fiyatları açısız frekans sapmasına göre hesaplamaktadır. Ancak, ölçüm zaman aldığından dolayı önerilen yöntem zaman-ortalama frekans sapması kullanılmaktadır. Verilen ölçümlerde, arz ve talebin aynı özellikleri gösterdiği varsayılmaktadır. Önerilen sistem avantaj olarak; talebi daha düşük fiyatlı zamanlara değiştirebilmekte, DR sistemin küresel maliyetine izin vermekte, DR yüksek güç kullanım tepelerinden kaçınarak sistemin kararlılığını yükseltebilmekte ve sapsmaları azaltarak market performansını iyileştirebilmektedir. İlk olarak, şebekeden daha hızlı olan DR test edilmekte ve bozulmadan sonra geri dönüş süresini her zaman kısalttığı bulunmaktadır. Kontrolün, şebekeden daha yavaş olduğu, daha gerçekçi bir senaryo da test edilmektedir; geri tepme etkilerinin meydana geldiği durumlar bulunmakta, ancak, bu tarz durumların, tüm DR sistemlerinde ortaya çıkabileceğinin altı çizilmektedir. Önerilen sistem, IEEE 9 bus test şebekesinde test edilmektedir. DSGC, benzer zaman ölçümlerinde hareket ettiğinde, iki sistemin birbirine bağımlı hale gelebileceği bulunmaktadır. Bu sorun için, çalışmada, arz ve talep eğrilerini doğrusallaştırılması önerilmektedir. Bu sistem, faza bağılı olarak ya sönmekte ya da güçlenerek artmaktadır. Daha sonra, büyük tedirginliklerden (perturbation) sonraki şebeke dinamikleri göz önünde bulundurulmaktadır. 0,8 sn için, sabit noktanın kararsız olduğu ama 5 sn için, neredeyse mükemmel kararlılığa sahip olduğu bulunmaktadır. Çalışma, gerçek dünya sistemleri için, adaptasyondaki gecikmenin bir kararlılık riski taşıdığını; ancak, sinyalin zaman içinde ortalamasının alınmasının, kararlı çalışmayı garanti ettiğini göstermektedir. Düğümler, ortalama zamanından daha yavaş tüm zaman ölçümlerindeki üretim değişikliklerine uyum sağlayabilmektedirler. Sonuç olarak ya gecikmeli uyarılamadan kaçınılması gerektiği ya da yeterince uzun T periyodu için ortalama alımının yapılması gerektiği gösterilmiştir.

İklim değişikliği bizi yenilenebilir kaynaklara zorlamaktadır; ancak, normal enerji santralleri hala elektrik şebekelerine hâkimdir ve bunlarda iletim hatları, santraller merkezde ve tüketiciler kenarlarda olacak şekilde yerel olarak bir yıldız benzeri topolojiyle bağlanmaktadır. Schäfer ve arkadaşları [12] ortalama almanın DSGC'de

kararlılığını iyileştirdiğini bulmuştur; ancak, bu sadece, küçük şebekelerde test edilmiştir. Schäfer ve arkadaşları [7]; hem doğrusal kararlılığı kullanarak hem de havza değerini belirleyerek topolojilerin kararlılık üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Üretim merkezi olmadığında, şebeke kararlılığının nasıl değiştiği de bu analizde gösterilmiştir. DR'ye dayanan ve diğerine [12] benzer şekilde modellemek için, salıngaç modelini kullanan bir DSGC sistemi önerilmiştir. Tüketiciler karmaşık hareket etseler bile doğrusal bir güç fiyat ilişkisi ile gösterilmiştir. Böyle bir sistemde [12], çıkan riskleri göstermekteydi ve bunu çözmek için ortalama alımı yapılmıştı. Bu çalışmada, homojen ortalama süreleri seçilmekte, bu kontrol parametresi olarak ele alınmakta ve tüm makineler için benzer gecikme zamanları seçilmektedir. Parametrelerin rolünü analiz etmek için, kararlı-hal operasyon etrafındaki, sabit nokta tarafından sürülen dinamik kararlılık incelenmektedir. Daha büyük bozulmalar için, önce bir üretici düğümün bozulmasının simüle edilmesi ve ardından bir tüketici düğümünün bozulmasının simülasyonu ile bir Monte Carlo yöntemi kullanılarak havza hacminin tahmin edilmesi önerilmektedir. Bu simülasyonlar, maliyetli ancak gerekli olarak görülmektedir. Birden fazla durum aynı anda bozulabilmektedir; ancak, ortaya çıkan faz, uzayı örneklemek için uygun olmamaktadır. Önerilen analiz, merkezinde bir üretici bulunan dört düğümlü bir yıldız motifi üzerinde test edilmektedir. Orta düzeydeki gecikmelerin istikrara fayda sağladığı gösterilmektedir. Yıldız topolojilerinin, ortalama zamanına ve gecikmeye büyük ölçüde bağlı olduğu bulunmuştur. Ortalama alımı olmadan, sabit noktaların doğrusal olarak kararsız olduğu gecikme değerleri bulunmuştur. Ayrıca, yeterince yüksek ortalama süreleri ile ve 7 altındaki gecikmeler için, bunların ortadan kalktığı bulunmuştur. Kritik gecikmeden, yüksek gecikme değerleri için geri tepme etkisi oluşmaktadır ve sistem her zaman kararsız olmaktadır. Ancak, kritik gecikmenin, sadece fiyat adaptasyonunun sistemin içsel sönümlesinden fazla olduğu zamanların da var olduğu gösterilmiştir. Kritik değer için yakınsama bulunmakta ve bu buluşlar, havza hacim analizi ile desteklenmektedir. Gecikme değeri 4, havza değeri 1 ve ortalama zamanı 1 ve 2 sn için mükemmel yakın kararlılık bulunmuştur. Havza hacmi, ayrıca, tüketici düğüm bozukluklarının, üreticiye kıyasla, sistemi istikrarsızlaştırma olasılığının daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Merkezi üretimden, merkezi olmayan üretime geçiş, doğrusal kararlılığı artırmaktadır. $4/s^2$ kritik bağlantı için merkezi üretimin

stabilize edilemediği bulunmuştur. Kafes topolojisi gibi, daha bağlı bir topolojinin bu değerinde ve $2/s^2$ değeri ile yüksek ortalama zamanları ile, merkezi üretime izin verdiği ve daha iyi sonuç aldığı gösterilmiştir. 4 ortalama zamanının, DSGC için tüm gecikmeleri stabilize ettiği bulunmuştur. Merkezi olmayan üretimin, tüketicilere daha kısa mesafelerden yararlandığı ve daha kısa ortalama sürelerine izin verdiği bulunmuştur.

Abedinia ve arkadaşları [20] büyük endüstriyel tüketicilerin enerji tedarik sorunu üzerinde çalışmış ve hibrit stokastik-dirençli bir yaklaşım önermiştir. Yükten kaynaklanan belirsizlik, dirençli-optimizasyon ile modellenmiştir. Saeedi ve arkadaşları [21] çoklu-soğutuculu (multi-chiller) sistemde, elektrik güç tüketiminin optimal zamanlaması üzerinde çalışmıştır. Dirençli optimizasyona dayalı sonuçlar, deterministik bir yöntemle karşılaştırılmıştır. Gao ve arkadaşları [22] NN, Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine, SVM) ve Radyal Tabanlı Fonksiyonel Sinir Ağı (Radial Basis Function Neural Network, RBFNN) kullanarak fiyat tahmini için yeni bir tahmin modeli önermiştir. Önerilen füzyon algoritmasını geliştirmek için değiştirilmiş sıralı ağırlıklı ortalama kullanılmıştır. Gaidimi ve arkadaşları [23] Tekrarlayan Sinir Ağı (Recurrent Neural Network, RNN) ve Genişletilmiş En Yakın Komşu'dan (Extended Nearest Neighbor, ENN) oluşan iki aşamalı bir tahmin motoru önermiştir. Hibrit tahmin motorunun eğitimi için etkili bir tahmin modeli sunmuşlardır. Khodaei ve arkadaşları [24] güç ve ısı taleplerini karşılamak için güç ve ısı merkezi modeli önermişlerdir. Pareto çözümlerinden takas çözümünü seçmek için bulanık karar verme yaklaşımı sağlanmıştır. Begal ve arkadaşları [25] belirsizlik modellemesi olmadan deterministik bir yaklaşım ile risk-nötr bir strateji elde etmiştir. Yaptığımız araştırmalar neticesinde, literatürde DL tabanlı tekniklere dayalı SG kararlılık tahmini ve DL modelinin açıklanabilirliğini gösteren bir çalışma bulunmamaktadır.

1.3. AI Açıklanabilirliği ve Yorumlanabilirliği

Derin Sinir Ağı (Deep Neural Network, DNN) gibi 'kara kutu' olarak adlandırılan yöntemler, rakiplerine göre daha yüksek başarı gösterse de DT gibi yöntemler daha açıklanabilir ve insan-anlaşılabilir olmalarıyla ön plana çıkmaktadır. Literatürde

yapılan çalışmalarda, DNN gibi kara kutu modellerinden, anlaşılabilir modeller çıkararak veya bu modellere anlaşılabilirlik için ara yüz yapılarak hem yüksek başarı oranı hem de insan-anlaşılabilirliğin başarabilmesi amaçlanmıştır.

Gregor ve arkadaşlarının 1999'da yaptığı çalışmada [26]; doğrusal olmayan ilişkileri diğer yöntemlere göre daha iyi temsil edebilme, uygulamalarının kolay olması, gürültüye karşı dirençli olmaları ve verilerin dağılımı ile ilgili ön bilgi gerektirmediklerinden dolayı uzun bir süredir, yapay sinir ağlarının (Artificial Neural Network, ANN) popüler olduğu belirtilmiştir. Ancak, sahip olduğu opaklığın; tıp, mühendislik vb. alanlarda kullanılmasının önünde engel yarattığı dile getirilmiştir. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için ağdan kurallar çıkaran sistemler oluşturulmuş olsa da bu sistemler genellikle ağın yetisini kısıtlayan varsayımlar veya özel öğrenim yöntemleri gerektirmektedir. Bu çalışma ise, bu kısıtlamalara sahip olmayan bir yöntem sunmaktadır. ANN'den kural çıkarmak için kullanılan yöntemler; ayrıştırıcı, pedagojik ve eklektik olarak üçe ayrılabilir. Pedagojik yöntemler, NN'yi, kara kutu olarak ele alıp, girişleri çıkışa bağlayan kuralları çok katmanlı ağlar için bile direkt olarak çıkarmaktadır. Çalışmada sunulan Yapay Sinir Ağı Karar Ağacı'nın (Artificial neural-network decision tree, ANN-DT) yapısı pedagojik olarak ele alınabilmektedir. Sunulan algoritma, eğitilmiş ağdan tek değişkenli DT oluşturmaya yaramaktadır. Her düğüm için algoritma, hangi değişken ile veri setini böleceğine karar vermektedir. Çok sayıda kural oluşturmamak için örnekleme kullanılmaktadır. Düğümlerde nitelik ve eşlik seçimi için; ağırlıklı varyans minimizasyonu kullanan ANN-DT(e) ile nitelik önem analizini kullanan ANN-DT(s) şeklinde iki varyasyon oluşturulmuştur. İki algoritma da açgözlü budama kullanmaktadır. Sinüs ve kosinüs eğrileri, denizkulağı veri seti ve öz suyu akış oranı veri seti üzerinde Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı (Classification And Regression Tree, CART) ile karşılaştırılıp olumlu sonuçlar bulunmaktadır. Sunulan algoritmanın bir avantajı; masrafının, NN boyutu ile sadece doğrusal olarak büyümesidir.

Zilke ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [27], 1990'larda yapılan, yukarıdaki gibi araştırmaların sadece tek katmanlı NN'ler üzerinde çalışmasına değinilmektedir. Bu çalışmada sunulan DeepRED algoritması, DNN'lerden kural çıkarmaya yaramaktadır. Ayrıştırıcı olan bu algoritma; her sınıf için kuralları çıkarmakta, her sınıf

için katmanı azalan sıralamadan işlemekte ve her katmanın davranışını bir önceki katman cinsinden bulmaktadır. En sonunda ise her katmanda çıkardığı kuralları birleştirmektedir; nu sayede gizli özellikleri ortaya koyma yetisine sahiptir. DeepRED'in temelini, DNN'lere uygulanamayan CRED algoritması oluşturmaktadır. Ön işleme tekniği için ise RxREN'den budama tekniği ödünç alınmaktadır. Algoritma; sınıf hakimiyet parametresi ve minimum sınıf veri tabanı parametresi ile kontrol edilmektedir. Sonuç olarak, DeepRED; başarı ile kural çekmekte, karışık problemler için çektiği kurallar insan anlaşılabilir olmakta, RxREN budaması daha anlaşılabilir kurallar yaratmasında yardımcı olmakta ve eğitim veri seti boyutundan bağımsız kaliteli kurallar yaratabilmektedir.

Kovalerchuk ve Neunhaus'un 2018'deki çalışmasında [28], sağlık sektörü gibi alanlarda açıklanabilirliğin, ML'nin başka bir boyutu olması yerine tüm diğer boyutların ona bağlı olduğu ana bir boyut olduğunu savunulmaktadır. Baskın Sınıflayıcısı ve Tahmin Edici (Dominance Classifier and Predictor, DCP) adı altında, görsel bilgi keşfi ve analitik hesaplama için yeni yollar açan bir algoritma sunulmaktadır. Önerilen algoritma, matematiksel veya doğal dilsel yazılı açıklamaların yanı sıra görsel açıklama da sunmaya yaramaktadır. Veri seti olarak ise Wisconsin Breast Cancer veri seti (Wisconsin Breast Cancer Data Set, WBCD) kullanılmaktadır. Önerilen algoritma; sınıf hakimiyet aralıklarını oluşturmak, oylama yöntemleri ile aralıkları birleştirmek, parametrelerini öğrenmek, hakimiyet yapısını görselleştirmek ve tahmini açıklamak şeklinde 5 aşamadan oluşmaktadır. Hakimiyet seviyesi, bir sınıfın diğer sınıflar içinde dominant olması için gereken oranı belirlemektedir. Çalışmada, VM1-4 arası 4 oylama yöntemi (Voting Method, VM) sunulmaktadır. En yanıtıcı olan; oy sayısının, sınıfta olanların olmayana oranına göre belirlendiği, oy sayısının sınırlandırıldığı ve izin verilecek minimum aralık belirlendiği VM4, en iyi başarı oranını sergilemektedir. Görselleştirme kısmında ise her boyut ayrı bir sütun olarak temsil edilmekte; çoğunluğun iyi veya kötü huylu olduğu aralıklar ile eğitim setindeki boşluklar gösterilmektedir. Algoritma SVM ve ANN kadar yüksek başarı oranına ulaşmasa da diğer açıklanabilir modellere göre daha yüksek bir başarı oranı sunmaktadır.

Bach ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [11], bilgisayar görüşü alanında resimleri piksellere ayrıştırarak, her pikselin sınıflama üzerindeki katkısını gösterecek, LRP isminde bir konsept sunulmaktadır. Kelime Çantası (Bag of Words, BoW) ve NN modelleri üzerinde denenen bu modelin temeli; sınıflandırıcıların birden fazla katmana ayrıştırılabileceği varsayımına dayanmaktadır. Bu katmanlar, nitelik çıkarımı veya hesaplanmış nitelikler üzerinde çalışan algoritma parçaları olabilmektedir. Bu varsayımın; BoW, lineer olmayan SVM ve NN üzerinde doğruluğu gösterilmektedir. İleri beslemeli ağa tanıtılan LRP her boyut için alakalık skoru R olduğunu varsaymakta ve giriş katmanına daha yakın olan, bir sonraki katmanda R skorunu bulmak için çalışmaktadır. LRP belli bir algoritma yerine; katmandan katmana alakalık skoru korunması ve düğümden giren ve çıkan alakalık skoru toplamlarının aynı olması kısıtlamalarının toplamadır. Ayrıştırma için Taylor yaklaşımı verilmekte; NN'lerde ayrıştırmaya alternatif olarak ise, geri yayılım sırasında, her katmanın alakalığını hesaplamak verilmektedir; bu yöntem giriş resminden başka bir başlangıç noktasına ihtiyaç duymamaktadır. Bunun sonucunda ısı haritası oluşmaktadır; bu ısı haritası sınıf alakalı özelliklerin, kenarlar, kornerler gibi yapısal parçalar, belli renge sahip alanlar, lokal özellikler gibi birçok şey olabileceğini göstermektedir.

Amarasinghe ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [29], anomali tespiti için model tabanlı yöntemlerin ön bilgi ve matematiksel bilgi gerektirdiği sunulmaktadır. Bu yüzden, veri-tabanlı sistemler bu alanda öne çıkmakta, bu sistemler arasından da DNN'ler öne çıkmaktadır. Ancak DNN'lerin yüksek başarımlarının doğru sebeplerden mi yoksa veri setindeki bazı eserlerden dolayı olduğunu mu bilmek hayati önem taşımaktadır. Çalışma, bunun için DNN'e bir ara yüz sunmaktadır. Bu ara yüz, aykırılık tespitinin yansıra; tespit güven oranı, yazılı açıklaması ve tespit altındaki önemli faktörleri sunmaktadır. Bu ara yüz, offline olarak kullanılarak, sistem kurulmadan önce yetkili kişinin sistemi kontrol etmesi beklenmektedir. Önerilen algoritma, bunu başarmak için, LRP ile DNN'i birleşik fonksiyonunu ayırmakta ve her girişin ortalama ilişkisini göstermektedir.

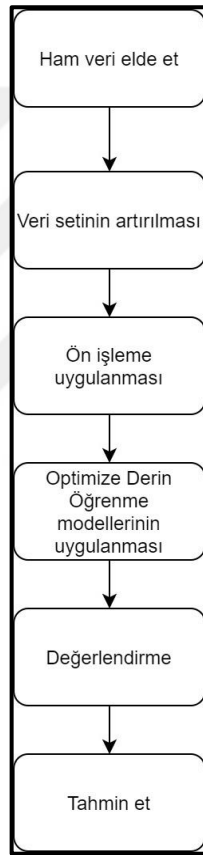
İzinsiz Giriş Tespiti, fiziksel sistemler üzerinde yapılan kötü niyetli saldırı tespiti için kilit önem taşımaktadır. Ancak, kara kutu kısıtlamasından dolayı, yanlış sınıflandırmaların sebebini öğrenmek, gelecek saldırıları engellemek için

gerekmektedir. Marino ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [30] bunun için bir AI ara yüzü sunulmaktadır; düşman (adversial) ML'yi tespitlere açıklama sağlamak için kullanmaktadır. Değiştirilmiş ve orijinal örnek arasındaki farktan, hangi girişlerin en fazla yanlış sınıflandırmaya yol açtığı bilgisi bulunmaktadır. Bu farklılıklar görselleştirilerek, 'Normal örnekler DoS olarak sınıflandırıldı çünkü' şeklinde çıkarımlar yapılabilmektedir.

LRP'nin erken uygulamalarında, tüm katmanlara aynı ayrıştırma kuralı uygulanıyorken, son zamanlarda, NN'deki pozisyon ve katmanlara göre ayrıştırma kuralı atamak daha popüler hale gelmiştir. Bileşik strateji ile kurulan kuralların, gradyan tahribine karşı koruma sağladığı ve obje ayrımcılığını sağladığı öne sürülmektedir. Kohlbrenner ve arkadaşlarının yaptığı çalışma, bu iddiaları ImageNet ve PascalVOC veri setlerinin üzerinde nicel olarak ölçmek için yola çıkmaktadır [31]. Hem bileşik hem de ortodoks model için hesaplama haritaları yaratılmaktadır. Çalışma sonucunda, bileşik uygulamaya sahip LRP modelinin sadece daha iyi temsil edici nitelik haritaları sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda eski çözümlerin sahip olduğu gradyan tahribi sorununu çözdüğü ve nesne lokalizasyona ve nitelik sınıf ayırımına dair özellikleri geliştirdiği görülmektedir. Aynı zamanda, bileşik yöntem tek bir değiştirilmiş geri yayılım ile sınıf-çelişkili özelliklere negatif alakalık skoru atayabilmektedir.

2. AKILLI ŞEBEKE KARARLILIĞININ OPTİMİZE DERİN ÖĞRENME MODELLERİ İLE TAHMİNİ

Bu bölümde, SG kararlılığını tahmin etmek için önerilen optimize DL modeli verilecektir. Şekil 2.1.'de verilen akış şeması, sağlanan stratejinin nasıl çalışacağını göstermektedir.

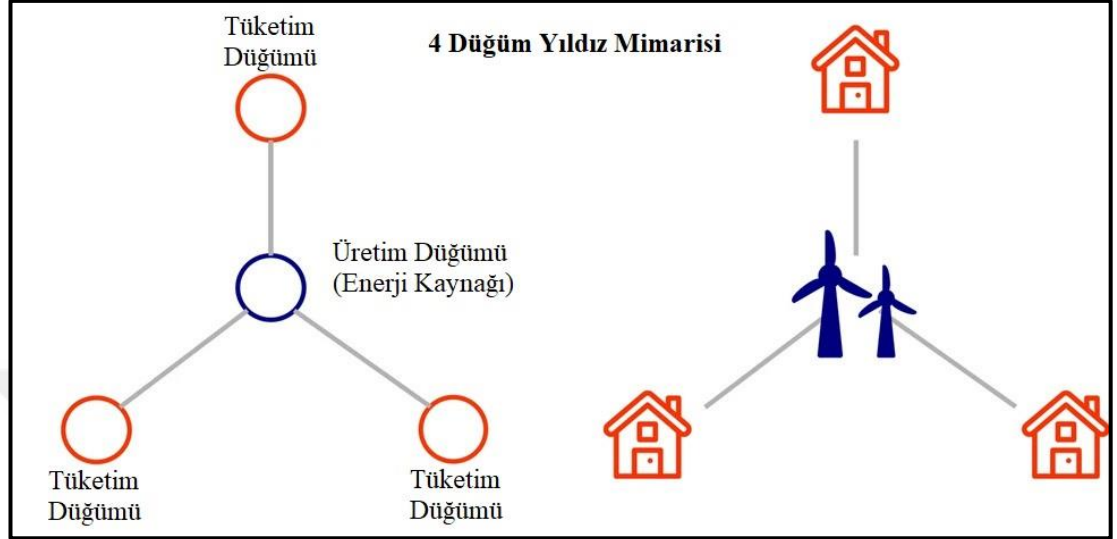


Şekil 2.1. Önerilen Strateji İçin Akış Şeması

2.1. Veri Seti Açıklaması

Veri seti, şekil 2.2'de görüldüğü ve Schafer ve arkadaşlarının anlattığı gibi [12], 4-düğümlü, yıldız topolojisine sahip bir ağın üzerinde yapılmış şebeke kararlılığı simülasyonlarından elde edilmiş sonuçlardan oluşmaktadır ve sentetiktir. 12 tahmin edici niteliğe ve 2 bağlı değişkene sahiptir. Örnekleme boyutu 10.000'dir. Kararlılık

simülasyonlarında kullanılan şebeke, simetrik bir yapıya sahip olduğundan dolayı orijinal veri seti 3! (6) kat arttırılabilmektedir. Arttırılmış veri seti 60.000 örnekten oluşmaktadır.



Şekil 2.2. Dört Düğümlü Yıldız Mimarisi

Veri seti için tahmin edici nitelikler:

- ‘tau1’ den ‘tau4’e kadar: Her ağ katılımcısının tepki zamanı. 0,5-10 aralığında gerçek bir değer. ‘tau1’ enerji sağlayıcı düğüme karşılık geliyorken ‘tau2’ den ‘tau4’ e kadar olan nitelikler tüketici düğümlere karşılık geliyor.
- ‘p1’ den ‘p4’ e kadar: Her ağ katılımcısı tarafından üretilen (pozitif) veya tüketilen (negatif) nominal güç. Tüketiciler (‘p2’ den ‘p4’e kadar olan nitelikler) için -2,0’den – 0,5 ‘e kadar bir değer. Tüketilen güç değeri üretilen güç değerine eşit olacağından aşağıdaki gibi olacaktır:

$$p1(\text{üretici düğüm}) = -(p2 + p3 + p4) \quad (2.1)$$

- ‘g1’ den ‘g4’e kadar: Her ağ katılımcısı için fiyat esneklik katsayısı, 0,05 ile 1,00 arasında gerçek bir değer. (‘g1’ üretici düğüm, ‘g2’ den ‘g4’e kadar olanlar ise tüketici düğüm; ‘g’, ‘gamma’ anlamına geliyor.)

Bağlı değişkenler:

- ‘stab’ : Karakteristik diferansiyel denklem kökünün maksimum gerçek kısmı. Eğer pozitif ise sistem doğrusal olarak kararsız, eğer negatif ise sistem doğrusal olarak kararlı.
- ‘stabf’ : ‘stab’ değişkeninden elde edilmiş kategorik etiket (‘kararlı’ veya ‘kararsız’)

Eğer ‘stab’ değişkeni 0’dan yüksek ise ‘stabf’ değişkeni 0 olmaktadır; eğer tam tersi ise ‘stabf’ değişkeni 1 olmaktadır. Bu, iki değişken arasında direkt bir ilişki olduğu anlamına gelmektedir. Tez çalışması kapsamında, ‘stab’ değişkeni düşürülüp, ‘stabf’ değişkeni tek bağılı değişken olarak kullanılmaya karar verilmiştir. Nitelik, gerçek hayattan alınmış veriler yerine simülasyonlardan geldiği için eksik değerlere sahip değildir; bu ve veri setinin sadece sayısal değerlerden oluşmuş olması klasik ön-işleme aşamalarının es geçilmesini ve direkt olarak model oluşturma kısmına geçilmesini sağlamaktadır. Tüm değişkenler için dağılımları ve seçilen bağılı değişken ile korelasyonları gösterilmiştir. Veri setinin, simülasyondan gelmesinin bir diğer avantajı ise tüm niteliklerin sınırlı aralıklara sahip olması ve ‘p1’ istisnası ile tekdüze dağılıma sahip olmalarıdır. ‘p1’ ise çarpıklık değeri -0,013’e sahip normal bir dağılımı izlemektedir.

Her nümerik nitelik ve bağımlı değişken arasındaki korelasyonu doğrulamak ve potansiyel olarak istenmeyen doğrusallığa yol açan sayısal nitelik arasındaki korelasyonu incelemek hayati önem taşımaktadır. Şekil 2.3’te, seçilen bağımlı değişken ile sayısal nitelikler arasındaki korelasyon gösterilmektedir. Bu, sayısal nitelikler arasındaki korelasyonun eş-doğrusallığa (co-linearity) yol açabileceği düşünüldüğünde gereklidir. Veri setinden çıkarılan ve seçilen bağımlı değişken arasında önemli bir korelasyon (-0,83) gözlemlenmektedir. Ayrıca, ‘p1’ ile oluşturduğu bileşenler arasında ortalamanın üzerinde bir korelasyon görünmektedir ama bunun ‘p1’i kaldırmaya yetecek kadar ciddi olduğunu düşünülmemiştir.

2.2. Optimize Derin Öğrenme Modelleri

Mevcut duruma göre, araştırmacıların çoğu çalışmalarını DL üzerine yoğunlaştırmıştır; çünkü DL, diğer makine öğrenme yöntemlerinin başarısız olduğu büyük miktarda veriyi işlemek ve özellik çıkarmak için ortaya çıkan alanlardan biri

olarak görülmektedir. Elektrik veri analizi için endüstriler; tam elektrik talebini tahmin etmek için makine öğrenimi, bulanık mantık, veri madenciliği, ANN, SVM ve genetik algoritma vb. gibi yeni yöntemler benimsemiştir ve bu yöntemleri enerji tüketim ve üretim tahminleri yapmak için kullanmıştır. Tüm bu yöntemler arasında DL, SG uygulamalarında hayati bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, SG kararlılığını tahmin etmek için farklı optimize edilmiş DL modelleri kullanılmıştır. Ayrıntılar bir sonraki bölümde verilmiştir.



Şekil 2.3. Veri Kümesi Nitelikleri İçin Korelasyon Matrisi

NN araştırmacıları; öğrenme hızının, model performansını önemli ölçüde etkilediği için, ayarlanması en zor hiper parametrelerden biri olduğunu uzun zamandır fark etmiştir. Maliyet, genellikle parametre uzayındaki bazı yönlerde oldukça duyarlıyken, diğerlerine karşı duyarsızdır. Duyarlılık yönleri biraz eksen-hizalıdır, her parametre için ayrı bir öğrenme oranı kullanmak ve bu öğrenme oranlarını öğrenme süreci boyunca otomatik olarak ayarlamak mantıklı olabilmektedir. Adam ve Nadam

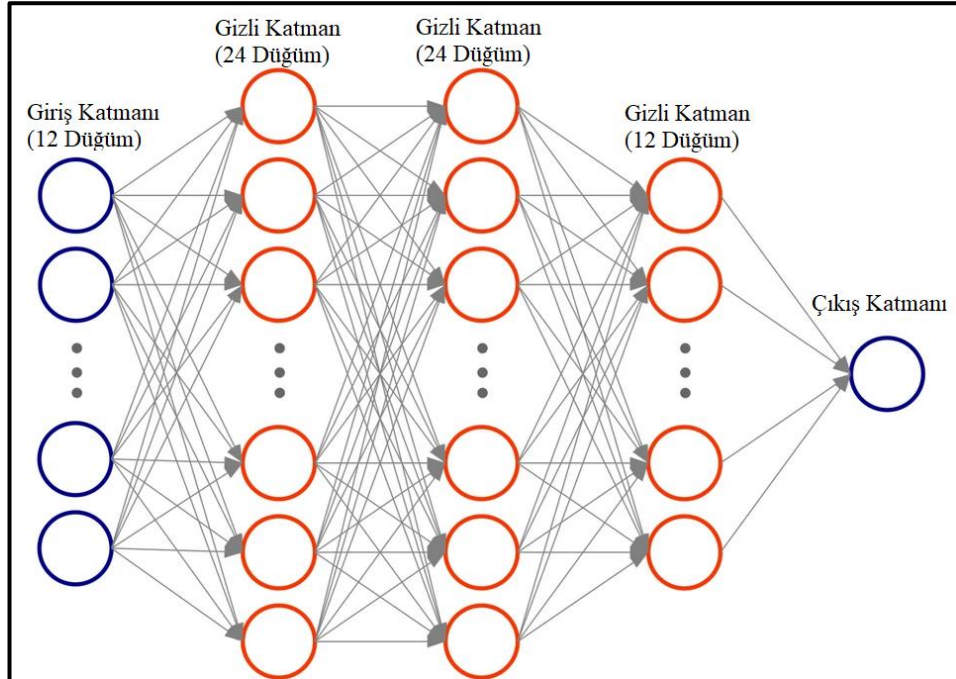
optimize edicileri gibi, model parametrelerinin öğrenme oranlarını uyarlayan, bir dizi artımlı (veya mini batch-tabanlı) yöntemler tanıtılmıştır.



3. AKILLI ŞEBEKE KARARLILIĞI TAHMİNİ İÇİN DENEYSEL SONUÇLAR

3.1. Model Tanımı ve Uygulaması

Makine öğrenimine hazırlık olarak, eğitim setine göre ölçeklendirme (scaling) yapılmakta ve hem eğitim hem de test setlerine dönüşüm (transform) yoluyla uygulanmaktadır. Karşılaştırma için birden fazla model denenmiştir. Denenen modellerden biri 3.1. şekilde gösterilen; bir giriş katmanı (12 düğüm), üç gizli katman (sırasıyla 24, 24 ve 12 düğüm) ve tek çıkış katmanına sahip modeldir. Gizli katmanlarda 'RELU' aktivasyon fonksiyonu, çıkış katmanında ise 'sigmoid' aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır [32]. Bu çalışmada kullanılan gibi, gerçek sayı türünde olan nitelikler ve ikili (binary) çıkışlar için, kullanılan seçenek, tüm seçenekler arasında literatürde en çok kabul edilendir. Kayıp fonksiyonu (Loss Function) için cross-entropy ve performans metriği olarak doğruluk (Accuracy) seçimleri de aynı mantığı takip etmektedir [33].



Şekil 3.1. 24x24x12x1 Mimarisi

Farklı modellerin yanı sıra farklı optimize ediciler de kullanılmıştır. Kullanılan optimize edicilerden, literatürde en çok kullanılan ikisi:

- Hızlı öğrenme zamanları, adaptif öğrenme oranları ve genel olarak verdiği iyi sonuçlar için 'Adam' [34].
- Bazı durumlarda daha iyi genelleştirme performansı sunduğu için Stokastik Gradyan İniş'dir (Stochastic Gradient Descent, SGD) [35].

Bu iki seçimin yanı sıra NAG ile 'Adam' optimize edicisini birleştiren 'Nadam' optimize edicisi de Nesterov Gradient'in [36] sonuçlarını iyileştirip iyileştiremediğini test etmek amacıyla kullanılmıştır.

Veri kümemiz tekdüze dağılımlı olduğu için çapraz doğrulama (cross-validation) tabanlı bir uydurma (fitting) kullanılmaktadır. Çapraz doğrulama motoru olarak KFold seçilmiştir; K değerleri ise 10 ve 20 olarak alınmıştır. K değeri 10 için epoch sayısı 's' 10, 20 ve 50 olarak alınmakta; K değeri 20 için ise çalışma zamanı iki katına çıktığı için 's' 10 ve 25 olarak alınmaktadır. Farklı modellerin, optimize edicilerin, katlama (fold) ve epoch değerlerinin performansları bir sonraki bölümde tartışılmıştır.

3.2. Deney Düzenegi

Python 3.7 ile proje için sanal ortam kurulmuştur. Tensör manipülasyonu, matematiksel işlemler ve grafik gösterimi için kullanılan geleneksel kütüphaneler dışında; üç scikit-learn modülü (StandardScaler, confusion_matrix ve KFold) ve iki Keras DL nesnesi (Sequential ve Dense) kullanılmaktadır [37]. Bir önceki kısımda elde edilen, orijinal ve artırılmış veri setlerimiz, içe aktarılmıştır. 'stabf' değişkeni 0 ve 1 değerleri ile kodlanmıştır. Son olarak ise 60.000 örneğimiz karıştırılmıştır.

Daha önce belirtildiği gibi bu çalışmada kullanılan veri seti, 12 tahmin için nitelik ile 'stabf' adıyla etiketlenmiş bağımlı değişkeni içermektedir. Karıştırıldıktan sonra, eğitim veri seti olarak ilk 54.000 örnek, test veri seti için de geri kalan 6.000 örnek seçilmiştir. Veri kümesinin yeterince büyük ve iyi halli olduğu düşünülse bile; hem eğitim hem de test kümeleri için 'kararlı' ve 'kararsız' gözlemlerin yüzdesi her iki sette, orijinal dağılımın benzer kaldığından emin olmak için ölçülmekte ve benzer kaldığına emin olunmaktadır.

3.3. Performans Metrikleri

Verilen tüm modeller artırılmış ve orijinal veri seti üzerinde denenmiştir. Her iki veri seti için de farklı denemeler arasında veriler karıştırılmamıştır; bu sayede tüm model/optimize edici kombinasyonları için aynı veri seti kullanılmaktadır. Çıkış değerleri için 0,5 sınırı seçilmiştir; 0,5 üstü her değer ‘kararlı’, bu değer altındaki her değer ise ‘kararsız’ olarak sınıflandırılmaktadır. Sunulan DL mimarilerinin performans ölçümü için; doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), f1-skoru ve bu değerlerin alındığı karışıklık matrisi (confusion matrix) verilmiştir. Bu metriklerin formülleri ise aşağıdaki gibidir:

$$\text{doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (3.1.)$$

$$\text{kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3.2.)$$

$$\text{duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3.3.)$$

$$\text{f1 - skoru} = 2 \times \frac{\text{kesinlik} \times \text{duyarlılık}}{\text{kesinlik} + \text{duyarlılık}} \quad (3.4.)$$

3.4. Performans Sonuçları

Tablo 3.1’de ve Tablo 3.2’de, sırasıyla, artırılmış ve orijinal veri setlerinin sonuçları, en iyi performans kalın olarak yazılmış halde gözükmemektedir. Her test için sonuç olarak elde edilen kararlılık matrisi ile bundan elde edilen; doğruluk, kesinlik ve f-1 skorları verilmiştir. Birden fazla mimari 10,20 ve 50 epoch için 10 fold ile test edilmiştir. Kayda değer bulunan mimarilerde birden fazla optimize edici denenmiştir. Ayrıca, en iyi sonucu gösteren mimari için iki yarısı kadar epoch değeri ile iki katı kadar fold değeri denenmiştir. Mimarilerin yapıları, her bir gizli katmandaki düğüm sayıları ve en sonda da çıkış katmanı olarak gösterilmiştir. Yani, 24-24-12-6-1 mimarisi; ilk gizli katmanında 24, ikinci gizli katmanında 24, üçüncü gizli katmanında 12, dördüncü gizli katmanında 6 düğüm bulunduran ve 1 çıkış düğümüne sahip tam bağlı derin öğrenme modeli olarak değerlendirilmelidir.

Tablo 3.1. Artırılmış Veri Seti İçin Sonuçlar.

Mimari	Optimize Edici	Fold	Epoch	Karışıklık Matrisi		Doğruluk (%)	Kesinlik (%)	F1-Skoru (%)
24-24-12-6-1	Adam	10	10	3746	51	97,55	98,65	98,07
				96	2107			
24-24-12-6-1	Adam	10	20	3804	36	97,60	99,06	98,14
				108	2052			
24-24-12-6-1	Adam	10	50	3762	36	97,68	99,05	98,18
				103	2099			
24-48-24-12-1	Adam	10	10	3802	39	98,13	98,98	98,44
				73	2086			
24-48-24-12-1	Adam	10	20	3792	33	98,22	99,13	98,54
				74	2101			
24-48-24-12-1	Adam	10	50	3770	57	98,02	98,51	98,60
				62	2111			
24-48-48-12-1	Adam	10	10	3836	59	98,08	98,48	98,52
				56	2049			
24-48-48-12-1	Adam	10	20	3770	59	98,33	98,45	98,69
				41	2130			
24-48-48-12-1	Adam	10	50	3840	41	98,25	98,94	98,65
				64	2055			
24-48-48-12-1	SGD	10	10	3784	74	98,25	98,06	98,61
				31	2147			
24-48-48-12-1	SGD	10	20	3821	25	98,23	99,35	98,63
				81	2073			
24-48-48-12-1	SGD	10	50	3721	74	97,88	98,05	98,32
				53	2152			
288-288-24-12-1	Adam	10	10	3800	24	99,23	99,37	99,39
				22	2154			
288-288-24-12-1	Adam	10	20	3763	23	98,68	99,39	98,96
				56	2158			
288-288-24-12-1	Adam	10	50	3790	22	99,35	99,42	99,48
				17	2171			
288-288-24-12-1	Nadam	10	10	3862	37	99,00	99,05	99,22
				23	2068			
288-288-24-12-1	Nadam	10	20	3763	31	98,83	99,18	99,07
				39	2167			
288-288-24-12-1	Nadam	10	50	3791	15	99,62	99,63	99,69
				8	2186			
288-288-24-12-1	Nadam	20	10	3784	31	99,07	99,18	99,26
				25	2160			
288-288-24-12-1	Nadam	20	25	3801	14	99,60	99,60	99,68
				10	2175			
144-144-12-1	Nadam	10	10	3715	71	98,30	98,12	98,64
				3	2183			
144-144-12-1	Nadam	10	20	3742	52	98,70	98,62	98,96
				26	2189			
144-144-12-1	Nadam	10	50	3791	28	98,20	99,26	99,25
				29	2152			
216-216-216-12-1	Nadam	10	10	3867	28	99,13	99,28	99,33
				24	2081			
216-216-216-12-1	Nadam	10	20	3794	23	99,15	99,39	99,33
				28	2155			
216-216-216-12-1	Nadam	10	50	3841	23	99,28	99,40	99,32
				29	2116			

Tablo 3.2. Orijinal Veri Seti İçin Sonuçlar.

Mimari	Optimize Edici	Fold	Epoch	Karışıklık Matrisi		Doğruluk (%)	Kesinlik (%)	F1-Skoru (%)
24-24-12-6-1	Adam	10	10	620	19	94,55	97,02	95,75
				36	325			
24-24-12-6-1	Adam	10	20	597	32	94,92	94,91	95,90
				19	352			
24-24-12-6-1	Adam	10	50	631	10	95,90	98,43	96,85
				31	328			
24-48-24-12-1	Adam	10	10	615	29	95,38	95,49	96,31
				18	338			
24-48-24-12-1	Adam	10	20	607	33	94,21	94,84	95,44
				25	335			
24-48-24-12-1	Adam	10	50	610	12	96,30	98,07	97,05
				25	353			
24-48-48-12-1	Adam	10	10	591	32	92,40	94,86	93,95
				44	332			
24-48-48-12-1	Adam	10	20	642	16	95,35	97,56	96,46
				31	311			
24-48-48-12-1	Adam	10	50	621	24	95,42	96,27	96,42
				22	333			
24-48-48-12-1	SGD	10	10	621	30	94,24	95,39	95,53
				28	321			
24-48-48-12-1	SGD	10	20	603	19	95,65	96,94	96,48
				25	353			
24-48-48-12-1	SGD	10	50	599	19	95,81	96,92	96,61
				23	359			
288-288-24-12-1	Adam	10	10	612	22	96,08	96,52	96,83
				18	348			
288-288-24-12-1	Adam	10	20	627	29	96,60	95,57	96,68
				14	339			
288-288-24-12-1	Adam	10	50	602	18	97,14	97,09	97,64
				11	369			
288-288-24-12-1	Nadam	10	10	627	14	96,93	97,81	97,58
				17	342			
288-288-24-12-1	Nadam	10	20	623	13	96,50	97,95	97,26
				22	342			
288-288-24-12-1	Nadam	10	50	627	11	97,52	98,67	98,24
				14	348			
288-288-24-12-1	Nadam	20	10	614	19	96,77	96,99	97,38
				14	353			
288-288-24-12-1	Nadam	20	25	621	15	96,72	97,64	97,41
				18	346			
144-144-12-1	Nadam	10	10	626	29	95,95	95,57	96,82
				12	333			
144-144-12-1	Nadam	10	20	640	18	96,81	97,26	97,56
				14	328			
144-144-12-1	Nadam	10	50	611	16	97,10	97,44	97,68
				13	360			
216-216-216-12-1	Nadam	10	10	609	25	96,40	96,05	97,12
				11	355			
216-216-216-12-1	Nadam	10	20	641	18	96,94	97,26	97,63
				13	328			
216-216-216-12-1	Nadam	10	50	632	12	97,51	98,13	98,13
				12	348			

Tablo 3.1. ve Tablo 3.2. incelendiğinde; 6 kat veriye sahip olan artırılmış veri seti, orijinal veri setine göre çok daha iyi sonuçlar sunmaktadır. Ayrıca epoch sayısı arttıkça performansın arttığı da gözlemlenmektedir. Bu, model eğitim veri kümesine ne kadar çok maruz kalırsa o kadar iyi sonuç verdiği fikrini desteklemektedir. Fold sayısını iki katına çıkarmak ve epoch sayısını yarıya indirmek, orijinal veri setinde benzer sonuç verirken diğer veri setinde daha kötü sonuçlar veriyor. Modeller incelediğinde en iyi performans veren ve en optimal modelin “288-288-24-12-1” modeli olduğu görülmektedir. Bu ve diğer modeller için “Nadam” optimize edicisi diğer optimize edicilere göre biraz daha yavaş çalışmakta ancak daha iyi başarı oranı göstermektedir. Ancak çalışma zamanlarındaki ufak farklılıklar göz ardı edilebilir.

3.5. Son Teknoloji Çalışmalar ile Karşılaştırma

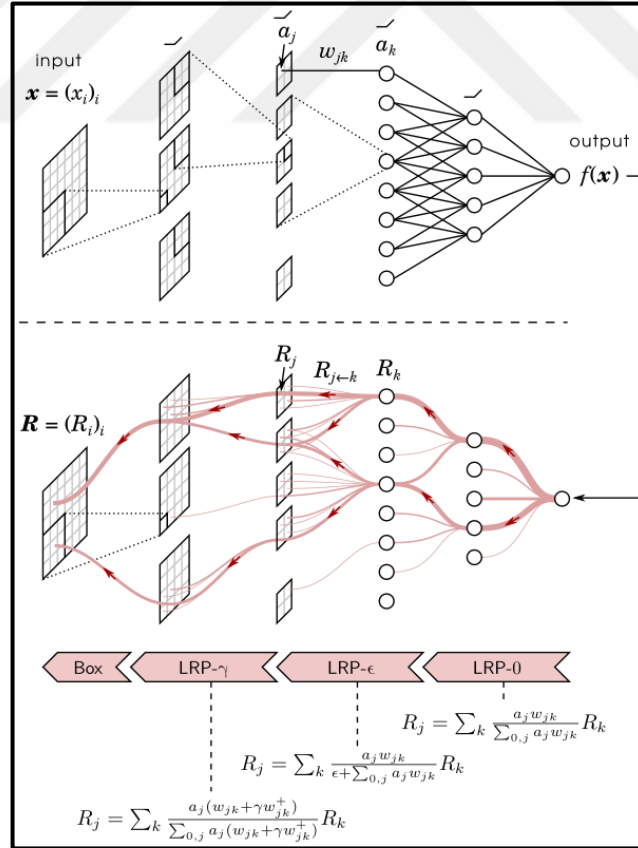
Şebeke kararlılık tespiti konusu önemli bir konudur ve bu alanda uzun süredir birçok çalışma yapılmaktadır. Tablo 3.3 farklı simülasyon sistemleri ile birlikte sonucun bir özetini göstermektedir. Önerdiğimiz optimize DL modeli; kararlılık kontrolünün, lokal (doğrusal) kararlılık analizi açısından ümit verici sonuçlar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Doğrusal kararlılık analizi, şebekenin kararlı durum çalışması etrafındaki dinamik kararlılığını araştırır.

Tablo 3.3. Farklı Teknikler Kullanarak Tahmin Doğruluğunun Karşılaştırılması.

Tahmin Yöntemi	Doğruluk (%)	Kullanılan sistem
XGBoost [39]	97,8	IEEE 39-bus test sistemi
Bayesian oran (Bayesian Rate, BR) [40]	91,6	IEEE 39-bus test sistemi
DT [41]	90,3	IEEE 39-bus test sistemi
Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks, CNN) [42]	89,22	IEEE 118-bus ve IEEE 145-bus sistemleri
Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short Term Memory, LSTM) [43]	99,98	IEEE 39-bus test sistemi ve 162 ile 145 bus sistemleri
FNN-tabanlı geçici kararlılık tahmincisi [44]	99,2	IEEE 39-bus test sistemi
CART [9]	80,0	4-düğüm yıldız mimarisi
Önerilen	99,62	4-düğüm yıldız mimarisi

4. DERİN ÖĞRENME MODELİ ÜZERİNDE AÇIKLANABİLİRLİK VE YORUMLANABİLİRLİK İÇİN LRP

Bir önceki bölümde sunulan model, yeni teknoloji benzer sistemler ile karşılaştırıldığında, başarımları yüksek bir çözüm sunmaktadır. Ancak, önerilen ve benzeri DNN çözümleri “kara kutu” olarak sayılmaktadır [36]. Yani, transparan olmayan, başarımları odaklı çözümler sunmakta ve üzerinde uyguladıkları sistemin çalışma mekanizmasına dair bir iç görü sunmamaktadır. Bu çalışmada, bu sorunun üstesinden gelmek için Bach ve arkadaşlarının sunduğu LRP teknolojisi [11], DNN üzerinde kullanılıp, girdiler için alakalık (relevance) skoru bulunması hedeflenmektedir. LRP'nin çalışma mekanizması şekil 4.1. üzerinde görülebilmektedir.



Şekil 4.1. Bileşik LRP uygulaması [45]

Görseller, yazılar ve diğer şeyler üzerine uygulanabilen LRP; ağın yapmış olduğu tahmini ağ üzerinde geri yayarak önemli niteliklerin belirlenmesine yaramaktadır.

Bunun için özel olarak hazırlanmış lokal geri yayılım kuralları uygulanmaktadır. Bu geri yayılım sırasında; katmandan katmana alakalık skorları korunmakta ve bir nöronun giriş olarak aldığı alakalık skoru, çıkış olarak verdiği alakalık skoruna eşit olmaktadır. Aşağı katmana verilen alakalık skoru, aşağıdaki genel kural ile belli olmaktadır:

$$R_j = \sum_k \frac{z_{jk}}{\sum_j z_{jk}} R_k \quad (4.1.)$$

4.1. Deney Düzenegi

LRP amaçlı kullanım için, Python veya diğer programlama dilleri üzerinde çalışan birkaç kütüphane tercihi bulunmaktadır. Bu tercihler arasından TU-Berlin'den M.Alber ve arkadaşlarının öne sürdükleri “iNNvestigate” [46], bu çalışmada tercih edilmiştir. Bunun sebebi, ortaya atılan ve benzeri Caffé benzeri kütüphane üzerinde çalışmak için yazılmış olan kütüphanelerin [47] aksine, tensorflow tabanlı modellere direkt olarak olanak tanınmasıdır. iNNvestigate, Python 3.6, TensorFlow 1.12 ve Cuda 9.x üzerinde çalıştığından dolayı bu kütüphanelere sahip bir virtualenv oluşturulmuştur. Belirtilen kütüphanelerin yanı sıra; numpy, matplotlib, seaborn, pandas gibi görsel matematiksel işlemler için gereken kütüphaneler de yüklenmiştir.

4.2. LRP İçin Modellerin Karşılaştırılması

LRP spesifik bir algoritma olmak yerine belli kısıtlamaların bütünü olarak tanımlanmaktadır [11]. Bu yüzden, yıllar içinde farklı LRP kullanımlarının yanı sıra farklı LRP kuralları ortaya çıkmıştır [31]. “iNNvestigate” kütüphanesi, bu modeller arasından birçoğunu kullanma ihtimali sunmaktadır Bunlardan bazılarını özetlemek gerekirse:

- LRP-Z (LRP-0): Alakalık skorunu, her girdinin katkı oranıyla nöron aktivasyonuna aşağıdaki kurala göre dağıtır [48]:

$$R_j = \sum_k \frac{a_j w_{jk}}{\sum_{0,j} a_j w_{jk}} R_k \quad (4.2.)$$

- LRP-Epsilon: LRP-0 kuralının üzerine ilk geliştirmedir. Paydaya küçük bir pozitif epsilon değişkeni ekler. Epsilonun rolü hedef nöronun aktivasyonuna katkılar zayıf ve birbirine çakışır olduğunda biraz alakalık emmektir. Epsilon arttırıldıkça sadece en göze batan sonuçlar bu emmeyi geçer hale gelir. Bu da elde edilen sonuçların hem nitelik hem de girdi açısından daha az hem de daha gürültüsüz olmasını sağlamaktadır. Formülü aşağıdaki gibidir [48]:

$$R_j = \sum_k \frac{a_j w_{jk}}{e + \sum_{0,j} a_j w_{jk}} R_k \quad (4.3.)$$

- LRP-Alpha Beta: Dağıtımın aşağıdaki gibi olduğu kuraldır:

$$R_i = \sum_j \left(\alpha \cdot \frac{(x_i w_{ij})^+}{\sum_i (x_i w_{ij})^+} - \beta \cdot \frac{(x_i w_{ij})^+}{\sum_i (x_i w_{ij})^+} \right) R_j \quad (4.4.)$$

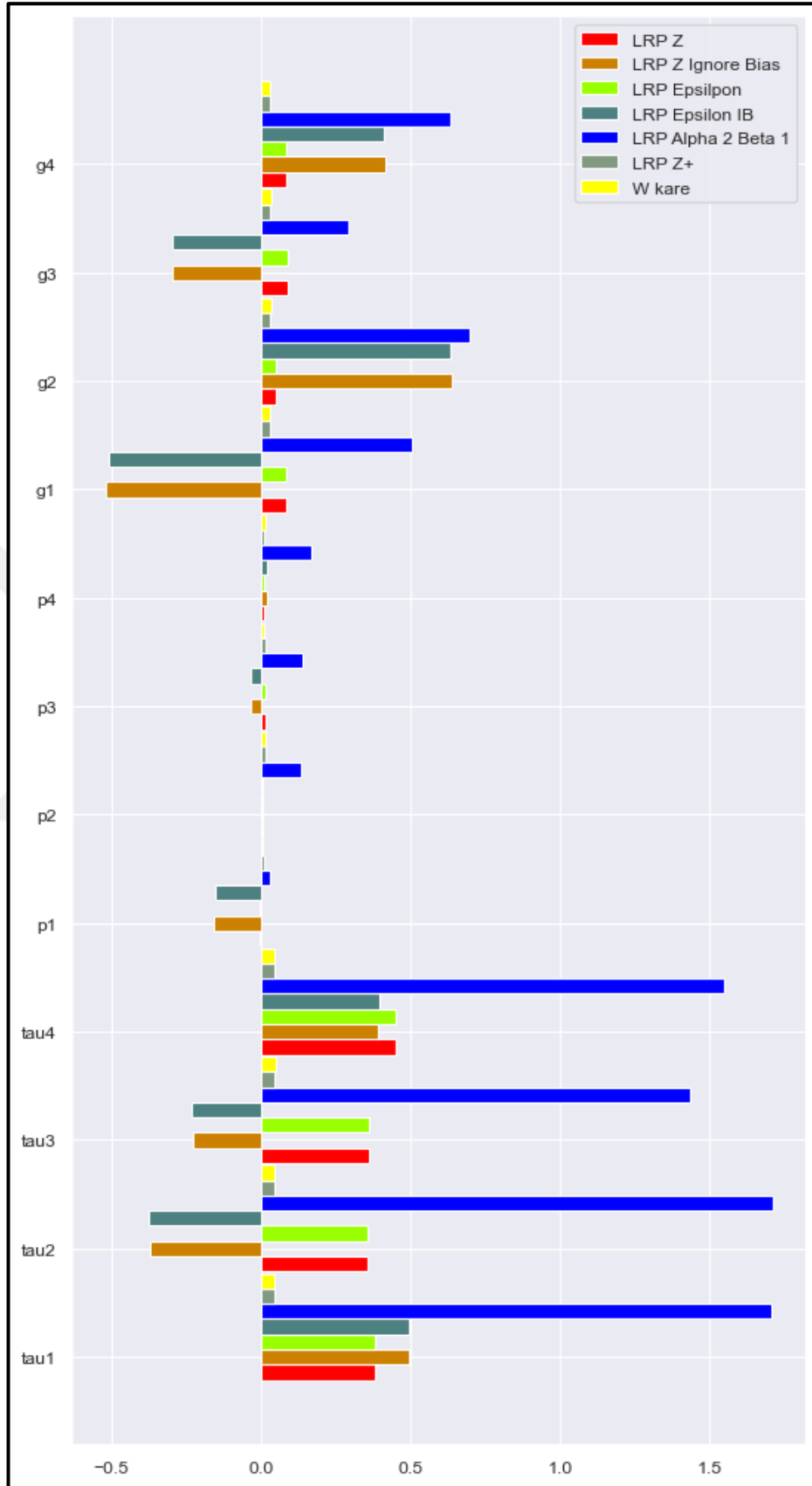
Bu kural için $\alpha - \beta = 1$ olacak şekilde α ve β değerleri seçilerek alakalık koruma kuralı sağlanır. “iNNvestigate” kütüphanesi, bunun için $\alpha = 2$ $\beta = 1$ ve $\alpha = 1$ $\beta = 0$ olacak şekilde iki seçenek sunmaktadır. İkinci seçenek seçildiğinde Z+ kuralı olarak da adlandırılan aşağıdaki kural elde edilmektedir [49]:

$$R_i = \sum_j \frac{(x_i w_{ij})^+}{\sum_i (x_i w_{ij})^+} R_j \quad (4.5.)$$

- Deep Taylor W²: Eğer giriş uzayı kısıtlamasız ise kullanılır. Bu yöntemde en yakın kök noktası, gradyan boyunca araştırılır ve aşağıdaki gibi bir kural elde edilir [50]:

$$[x_j]_i = \frac{w_{ij}^2}{\sum_i w_{ij}^2} x_j. \quad (4.6.)$$

Yukarıda verilen kuralların yanı sıra LRP-Z ve LRP-Epsilon için bias’ların görmezden gelindiği ‘Ignore Bias’ versiyonları Şekil 4.2’deki gibi karşılaştırılmıştır. Şekilde, her kural için alakalık değerleri, girdiler için gruplanarak gösterilmiştir. Şekilde de görülebildiği gibi, alakalık değerleri negatif veya pozitif değerler olabilmektedir.

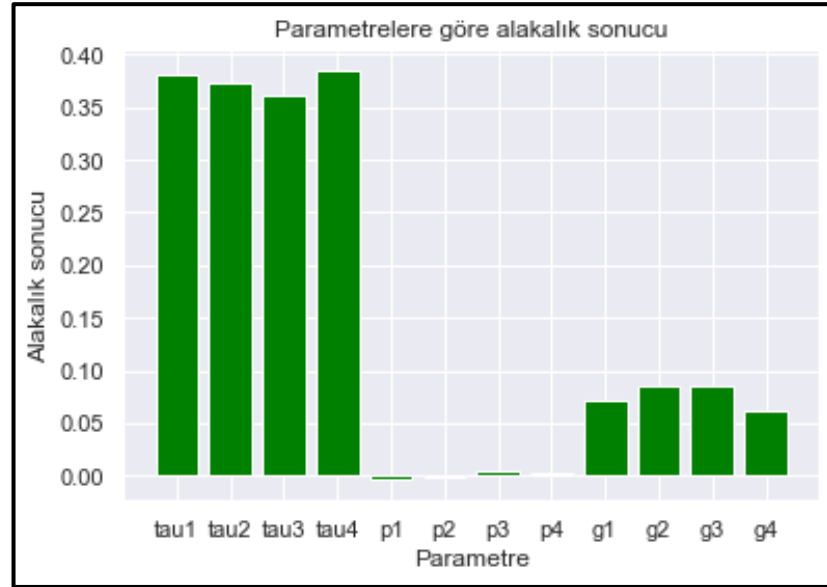


Şekil 4.2. Farklı LRP Kurallarının Karşılaştırılması

Grafik incelendiğinde, LRP Alpha-Beta’da tüm değerlerin çok yüksek alakalık değerlerine sahip olduğu; LRP-Epsilon, LRP-Z gibi yolların değerlerinin yanında çok düşük kaldığı görülmektedir. Ayrıca LRP-Z ve LRP-Epsilon için biaslar göz ardı edildiğinde, ufak farkların çok büyük boyutlara çıktığı görülmektedir. Aralarında bu kadar farklılıklar olmasının sebebi, aslında bu tarz kuralların birbiriyle kullanılmak ve ağın belli kısımlarında bulunmak amacıyla bulunmuş olmasıdır [29]. Şekil 4.1.’de gösterilen ve bileşik denilen bu yöntem, LRP kullanımını için tercih edilen yöntemlerden birisidir; ancak, bu çalışmalar resim ve video gibi girdiler üzerinde olduğundan ve bu çalışmada sunulan ağa göre çok daha fazla gizli katmana sahip olduğundan, bu çalışmada tüm katmanlarda tek bir LRP kuralı kullanımını tercih edilmiştir. Tek bir kural kullanımının sonuçta büyük bir değişikliğe yol açmayacağını ancak zamansal ve hesaplama olarak daha az masrafi olacağı düşünülmektedir. Ağda tek başına kullanım amacıyla, literatürde en çok kabul edilen kurallar LRP-Z ve LRP-Epsilon dur. LRP-Z’nin üstüne geliştirme amacıyla bulunmuş olmasından dolayı, bu çalışmada, ilerleyen bölümlerde LRP-Epsilon kullanılması tercih edilmiştir.

4.3. Alakalık Skorları ile Modelin Yorumlaması

Şekil 4.2.’de, bir önceki kısımda tanıtilen DL modeli için tüm katmanlarda LRP-Epsilon kullanımını ile bulunmuş alakalık skorları verilmiştir.



Şekil 4.3. LRP-Epsilon İçin Alakalık Skorları

Grafik incelendiğinde, ‘tau’ yani ağdaki katılımcıların reaksiyon zamanının alakalık skorlarının en yüksek olduğu gözlenmektedir. (‘tau1’ = 0,3809; ‘tau2’ = 0,3731; ‘tau3’ = 0,3614; ‘tau4’ = 0,3857) Bir sonraki en yüksek skor olan ‘g’ değişkeni yani fiyat elastiklik katsayısının 5,5 katı civarında olduğunu gözlemlenmektedir. (‘g1’ = 0,0705; ‘g2’ = 0,0845; ‘g3’ = 0,0858; ‘g4’ = 0,0621) ‘p’, yani enerji kullanımı/tüketimi incelendiğinde ise alakalık skorunun 0 civarında, göz ardı edilebilir olduğu görülmektedir. (‘p1’ = -0,0044; ‘p2’ = -0,00156; ‘p3’ = -0,0035; ‘p4’ = 0,0025) Literatürde, SG’lerde, akıllı grafiklerin üzerinde reaksiyon zamanı ile araştırmaları [9] incelendiğinde, SG için ağ katılımcılarının reaksiyon zamanlarının önemini görülebilmekteydi; bu çalışmada kullanılan veri setimizde, alakalık skorlarının diğer tüm girdilerden fazla etkiliyor olması ise bu bulguyu desteklemektedir. Gorzałczany ve arkadaşlarının 2020 yılında yayımladığı ve bu çalışma ile aynı veri seti üzerinde kural çıkarımı yapan çalışma incelendiğinde, bu çalışma sonucundaki bulgulara benzer sonuçlar bulunduğu ortaya çıkmaktadır. Kurallar için hangi girdilerin en önemli olduğunu sıralandığında; reaksiyon zamanı ve fiyat elastiklik katsayısı sırasıyla en önde yer almaktadır ve p1, p2, p3 ve p4 için 0,001 altında önemlilik değeri bulunmaktadır. Sistemde tüketim, her zaman üretim ile eşit olacağı için tüketim ve üretim değerleri, bizim çalışmamızda, sistemin kararlılığına bir etkide bulunmamaktadır.

5. SONUÇLAR

Çağımızın getirdiği gereksinimler ve teknolojinin hızlı bir şekilde gelişimi, şehir ve altyapı planlamalarında teknolojiyi ön plana çıkarmıştır. IoT gibi, fiziksel ve akıllı, cihazların ICT ile birleşimi, akıllı şehirler konseptini ortaya çıkarmıştır. Yenilenebilir enerjinin yükselişi yeni zorluklar ve değişimler ile birlikte gelmiştir. Akıllı şehir konseptinin uygulamalarından biri olan SG'ler; elektrik şebekesinin arz ve talep bilgisini toplayarak kullanıcılara enerji fiyatı teklifi yapmaktadır. DSGC bunun için, sadece, şebekeden kolayca elde edilebilen frekans bilgisini gerektirmektedir. Önceden araştırılan yöntemler [7,15], elektrik şebekesinin kararlılığını tahmin etmek için bir model sunmaktadır; ancak, bu modeller, yaptıkları büyük basitleştirmelerden dolayı bazı sorunları da beraberinde getirmektedir.

Çalışmada akıllı şehirler; çalışma mekanizmaları, uygulamaları, zorlukları ve bu zorlukların üstesinden nasıl geleceğine dair bilgiler verilmektedir. Daha sonrasında SG'ler, NCSG ve kararlılık tahmini ile ilgili araştırmalar hakkında konuşulmaktadır. DL yöntemine karar verildikten sonra, bu yöntemi nasıl daha anlaşılabilir kılacağımıza karar vermek için yaptığımız araştırmalar ve farklı açıklanabilirlik yöntemlerine de yer verilmektedir.

Bu tez araştırması kapsamında, bu sorunların çözümü için; kararlılık tahmininde, DL modellerinin kullanılması önerilmektedir. Dört düğüme sahip, ortasında bir üretici ile etrafında üç tüketici bulunan, bir yıldız topolojisine sahip şebeke modeli üzerinde yapılmış simülasyonlardan elde edilmiş orijinal veri seti ile bu veri setinin simetrik yapısı sayesinde elde edilmiş artırılmış bir veri seti kullanılmaktadır. İki veri seti üzerinde de birçok DL modeli denenmektedir. En iyi başarı oranını “288-288-24-12-1” modeli sunmaktadır, bu spesifik modelde %99,6'ya varan başarı oranı bulunmaktadır. Ayrıca, modelin mimarisi dışında optimize edici, fold ve epoch sayılarının da başarı oranı üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. En iyi optimize edicinin “Nadam” oldu tespit edilmektedir; nu yöntem, Adam optimize edicisine

Nesterov Momentum'unu tanıtmaktadır. Ayrıca, 20 fold 25 epoch çalıştırmaktansa 10 fold 50 epoch çalıştırmanın daha iyi performans sunduğunu bulunmaktadır.

Önerilen DL modeli, aynı zamanda, kendi problemini de birlikte getirmektedir. Kara kutu olan DL modeli, sistemin tahmin mekanizmasına dair bir bilgi vermemektedir. DL ve benzeri karmaşık yöntemlere özgün olan bu sorun, bu mekanizmaların; sağlık, adalet ve mühendislik gibi alanlarda yaygın adaptasyonu ile arasında durmaktadır. Bir süredir literatürde popüler olan XAI, bu modelleri açıklanabilir ve yorumlanabilir kılmayı ve böylece; sistemin işleyişine dair ön görüşü vermeyi, kullanıcılara güven vermeyi ve güvenlik sağlamayı amaçlamaktadır [10]. XAI yöntemleri arasından, Bach ve arkadaşlarının tanıttığı, LRP teknolojisi bu çalışmada kullanılmaktadır [11].

LRP, ağı yapmış olduğu tahmini ağı üzerinde geri yayarak ve her giriş için alakalık skoru belirleyerek çalışmaktadır. LRP, spesifik model olmak yerine; katmandan katmana alakalık skorlarının korunması ve her nörona gelen alakalık skorunun çıkan alakalık skoru ile eşit olması kısıtlamalarından oluşan bir tanımlamadır. Bu yüzden, literatürde birden fazla kural ve bu kuralların birden fazla kullanım yöntemleri bulunmaktadır Birden fazla kuralın karşılaştırılması, tek kural kullanan bir ağı üzerinde yapılmakta ve literatür araştırmasıyla, tek kural kullanan ağlarda kullanımda en kabul edilen yöntem olması yüzünden LRP-Epsilon kuralını seçilmektedir.

LRP-Epsilon kuralı ile sunulan DL modeli üzerinde LRP kullanıp, girişler için alakalık skorları elde edilmektedir. Şebeke kararlılığı için en önemli değişkenin, ağdaki kullanıcıların ağdaki değişikliklere olan tepki süresi olduğu keşfedilmiştir. Bu değişkenin ardından, fiyat elastiklik katsayısının %15-20 oranında alakalık skoruna sahip olduğunu görülmektedir. Aynı zamanda, düğümlerin tükettiği veya ürettiği nominal gücün ağı tahmini üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığını görülmektedir. Bunun sebebinin, ağda tüketilen ve üretilen enerji miktarının her zaman eşit olması olduğuna karar verilmiştir.

Bu çalışma sonucunda, optimize DL modellerinin SG'lerde kararlılık tahmini için önemli bir yol sunduğu gösterilmektedir ve son teknoloji modellere göre daha yüksek başarı oranı elde edilmektedir. Artırılmış veri seti ile bu başarı oranı daha da yükseltilmiştir. DL'nin en büyük sorunlarından olan kara kutu problemine, XAI ile bir

çözüm sunulmakta ve önerilen modelin kullanılabilirliğinin artırılması amaçlanmaktadır.

5.1. Tez Kısıtları

Tez kapsamında yapılan DL modeli çalışması ve LRP uygulaması literatüre kattığı şeylere rağmen bazı sınırlamalara sahiptir. Çalışmada kullanılan veri seti sentetik bir yapıdadır ve veri setinin elde ediminde kullanılan şebeke yapısı, gerçek bir şebekeye oranla daha basit bir yapıya sahiptir. Bu şebekeden elde edilen veri setinde, değerler; sabit bir aralıktadır, ideal dağılıma sahiptir ve eksikliklere sahip değildir. Gerçek hayatta kullanılacak herhangi bir DSGC sisteminin daha karmaşık ve daha sorunlu veriler ile çalışmayı başarması gerekecektir.

Seçilen DL modeli üzerinde uygulanan açıklanabilirlik yöntemi de kendi kısıtlamalarına sahiptir. LRP, girişlerin alakalık skorunu vermektedir ve bu alakalık skorları üzerinden, girişlerin önemi, literatürdeki diğer çalışmaların yardımıyla da yorumlanmaktadır. Ancak, LRP, girişlerin değerlerinin sonucu nasıl etkilediğini; hangi değer aralıklarının, hangi çıkışa katkı yaptığını söylememektedir. Bu yüzden sistemin açıklanabilirliği kural ağacı gibi modellere oranla hale daha az kalmaktadır.

5.2. İleriki Çalışmalar

İleri araştırmalarda, verilen DL üzerindeki kara kutu sorununun daha da üstesinden gelmek amacıyla, LRP tekniğinin yanı sıra başarı oranını koruyan ama açıklanabilirliği daha da arttıran teknolojiler uygulanabilir. Bu uygulamalar DL modellerine olan güveni artırıp gerçek hayatta kullanılabilirliklerini arttıracaktır.

DL sistemlerinin, SG'lerde kullanımını daha mümkün kılacak başka bir araştırma yönü; DL modellerinin, daha kompleks ve gerçek hayattan uyarlanmış elektrik şebekeleri üzerinde denenmesi ve parametrelerin daha kompleks şartlar altında etkilerinin nasıl değiştiğinin incelenmesidir. Bu tarz araştırmaların yanı sıra, daha kompleks şebekelerden elde edilen veriler, daha kompleks ön işleme gerektirdiğinden dolayı başka bir yönebilecek yol ise ön işlem yollarının araştırılması olacaktır

KAYNAKLAR

- [1] Castro M., Jara J.A., Skarmeta A.F.G., Smart Lighting Solutions for Smart Cities, *27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, Barselona,İspanya 2013.
- [2] Caragliu A., Smart Cities in Europe, *Journal of Urban Technology*, 2011, **18**(2),65-82.
- [3] Su K., Li J., Fu H., Smart city and the applications, *International Conference on Electronics, Communications and Control*, Ningbo, Çin, 2011.
- [4] Eltigani D., Challenges of integrating renewable energy sources to smart grids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **52**(1), 770-780.
- [5] Ayar. M., et al., A Distributed Control Approach for Enhancing Smart Grid Transient Stability and Resilience, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **8**(6), 3035-3044.
- [6] Singh A.K., Singh R., Pal B.C., Stability Analysis of Networked Control in Smart Grids, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, **6**(1), 381-390.
- [7] Schafer B., et.al., Taming instabilities in power grid networks by decentralized control, *The European Physical Journal Special Topics*, 2016, **225**(1), 569-582.
- [8] Sinopoli. B., et al., Optimal Linear LQG Control Over Lossy Networks Without Packet Acknowledgment, *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, A.B.D, 13-15 Aralık 2006.
- [9] Arzamasov V.,Böhm K., Jochem P., Towards Concise Models of Grid Stability, *IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids*, Aalborg, Danimarka, 29-31 Ekim 2018.
- [10] Arrieta A.B., et.al., Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI, *Information Fusion*, 2020, **58**, 82-115.
- [11] Bach S, et.al., On Pixel-Wise Explanations for Non-Linear Classifier Decisions by Layer-Wise Relevance Propagation, *PLOS One*, 2015.
- [12] Schafer B., et.al., Decentral Smart Grid Control, *New Journal of Physics*, 2015, **17**(1).

- [13] Oliveira A., Campolargo M., From Smart Cities to Human Smart Cities, *48th Hawaii International Conference on System Sciences*, Kauai, ABD, 2011.
- [14] Nuaimi E.A.,Neyadi H.A.,Mohamed N., Applications of big data to smart cities, *Journal of Internet Services and Applications*, 2015, **6**(25)
- [15] Gabrielli L., et.al., Smart water grids for smart cities: A sustainable prototype demonstrator, *European Conference on Networks and Communications*, Bolonya, İtalya, 2014.
- [16] Venayagmoorthy G.K., Intelligent sense-making for smart grid stability, *Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, A.B.D, 24-28 Temmuz 2011.
- [17] Ayar. M., et al., A Cyber-Physical Control Framework for Transient Stability in Smart Grids, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, **9**(2), 1205-1215.
- [18] Bejestani. A.K., Annaswamy A., Samad T., A Hierarchical Transactive Control Architecture for Renewables Integration in Smart Grids: Analytical Modeling and Stability, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, **5**(4), 2054-2065.
- [19] Shamisa. A., Majjidi B., Patra J.C., Sliding-Window-Based Real-Time Model Order Reduction for Stability Prediction in Smart Grid: Analytical Modeling and Stability, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, **34**(1), 326-337.
- [20] Abedina O., et.al., Optimal offering and bidding strategies of renewable energy based large consumer using a novel hybrid robust-stochastic approach, *Journal of Cleaner Production*, 2019, **215**(1) 879-889.
- [21] Saeedi M., et.al., Robust optimization based optimal chiller loading under cooling demand uncertainty, *Applied Thermal Engineering*, 2019, **148**(1) 1081-1091.
- [22] Gao W., et.al., Different states of multi-block based forecast engine for price and load prediction, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, **104**(1) 423-435.
- [23] Ghadimi N., et.al., Two stage forecast engine with feature selection technique and improved meta-heuristic algorithm for electricity load forecasting, *Energy*, 2018, **104**(1) 130-142.
- [24] Khodaei H., et.al., Fuzzy-based heat and power hub models for cost-emission operation of an industrial consumer using compromise programming, *Applied Thermal Engineering*, 2018, **137**(1) 395-405.
- [25] Bagal A.B., et.al., Risk-assessment of photovoltaic-wind-battery-grid based large industrial consumer using information gap decision theory, *Solar Energy*, 2018, **169**(1) 343-352.

- [26] Schmitz G.P.J, Aldrich C., Gouws F.S., ANN-DT: an algorithm for extraction of decision trees from artificial neural networks, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, **10**(56), 1392-1401.
- [27] Zilke J.R., Mencia E.L., Janssen F., DeepRED – Rule Extraction from Deep Neural Networks , *International Conference on Discovery Science*, Bari, İtalya, 19-21 Ekim 2016.
- [28] Kovalerchuk B., Neuhaus N., Toward Efficient Automation of Interpretable Machine Learning, *IEEE International Conference on Big Data*, Seattle, ABD, 2020.
- [29] Amarasinghe K., Kenney K., Manic M., Toward Explainable Deep Neural Network Based Anomaly Detection, *IEEE International Conference on Big Data 11th International Conference on Human System Interaction*, Gdansk, Polonya, 2018.
- [30] Marino D.L., Wickramasinghe C.S., Milos M., An Adversarial Approach for Explainable AI in Intrusion Detection Systems , *International Joint Conference on Neural Networks*, Washington D.C, ABD, 21-23 Ekim 2020.
- [31] Kohlbrenner M., et.al., Towards Best Practice in Explaining Neural Network Decisions with LRP, *44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* , Glasgow B.K., 2020.
- [32] Agostinelli. F., et al., Learning Activation Functions to Improve Deep Neural Networks, *International Conference on Learning Representations*, San Diego, A.B.D, 7-9 Mayıs 2015.
- [33] Ho Y.,Wookey S., The Real-World-Weight Cross-Entropy Loss Function: Modeling the Costs of Mislabeling, *IEEE Access*, 2019, **8**(1), 4806-4813.
- [34] Zhang. Z., Improved Adam Optimizer for Deep Neural Networks, *IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service*, Banff, Kanada, 4-5 Haziran 2018.
- [35] Cutkosky. A.,Orabona F., Momentum-Based Variance Reduction in Non-Convex SGD, *Advances in Neural Information Processing Systems 32*, Vancouver, Kanada, 8-14 Aralık 2019.
- [36] Jakovetic D., Xavier J., Moura J.M.F., Fast Distributed Gradient Methods, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, **59**(1) 1131-1146.
- [37] Pedregosa F., et.al., Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 2011, **12**(85) 2825-2830.
- [38] Castelvechi D.,Can we open the black box of AI?, *Nature*, 2016, **538**(7623).

- [39] Chen M., et.al., XGBoost-Based Algorithm Interpretation and Application on Post-Fault Transient Stability Status Prediction of Power System, *IEEE Access*, 2019, **7**(1), 13149-13158.
- [40] Zare H., Alinejad-Beromi Y., Yaghoobi H., Intelligent prediction of out-of-step condition on synchronous generators because of transient instability crisis, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2018, **29**(1)
- [41] Reza M., Aghamohammadi R., Abedi M., DT based intelligent predictor for out of step condition of generator by using PMU data, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, **99**(1)
- [42] Gupta A., Gurralla G., Sastry P.S., An Online Power System Stability Monitoring System Using Convolutional Neural Networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, **34**(2) 964-872
- [43] Yu J.J.Q., et.al., Intelligent Time-Adaptive Transient Stability Assessment System, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, **33**(1) 1049-1058
- [44] Darbandi., et.al., Real-time stability assessment in smart cyber-physical grids: a deep learning approach, *IET Smart Grid*, 2020, **3**(4)
- [45] <http://www.heatmapping.org/> (Ziyaret tarihi: 21 Eylül 2021).
- [46] Alber M., et.al., iNNvestigate Neural Networks!, *Journal of Machine Learning Research*, 2019, **20**(93), 1-8.
- [47] Lapuschkin S., et.al., The LRP Toolbox for Artificial Neural Networks, *Journal of Machine Learning Research*, 2016, **17**(114), 1-5.
- [48] Montavon G., et.al., Layer-Wise Relevance Propagation: An Overview, *Explainable AI: Interpreting, Explaining and Visualizing Deep Learning*, LNCS, online, 193-2019, 2019.
- [49] Samek W., et.al., Interpreting the Predictions of Complex ML Models by Layer-wise Relevance Propagation, *Conference on Neural Information Processing Systems*, Barselona, İspanya, 5-10 Aralık 2016.
- [50] Montavon G., et.al., Explaining nonlinear classification decisions with deep Taylor decomposition, *Pattern Recognition*, 2016, **65**(1), 211-222

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] Bveiglieri P., **Erdem T.**, Eken S., Predicting Smart Grid Stability with Optimized Deep Models, *SN Computer Science*, 2021, **2**(73), 1205-1215
- [2] **Erdem T.**, Eken S., Layer-Wise Relevance Propagation for Smart-Grid Stability Prediction, *The 5th Mediterranean Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (MedPRAI 2021)*, Türkiye, 17-18 Aralık 2021.
- [3] Sevim S., **Erdem T.**, et.al., Multi-Class Document Image Classification using Deep Visual and Textual Features, *Transactions on Management Information Systems*, 2021 (Değerlendirmede).
- [4] Şahin S., **Erdem T.**, et.al., Dijital Dokümanların Anahtar Kelime Tabanlı Doğrulanması, *6. Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Konferansı*, Türkiye, 8-9 Ekim 2020.

ÖZGEÇMİŞ

2014 yılında Kocaeli Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümüne girip, 2020 yılında mezun oldu. Mezuniyet sonrası Çamlıca Barkod şirketinde yazılım geliştiricisi olarak çalışmaya başladı. Aynı yıl içinde Kocaeli Üniversitesi Bilişim Sistemleri Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans yapmaya başladı.

