



**GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI İNDEKSLERİNİN UÇ
ÖĞRENME ALGORİTMASI İLE TAHMİNİ**

İlhami POYRAZ

Yüksek Lisans Tezi

Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Danışman : Doç. Dr. Resul ÇÖTELİ

TEMMUZ-2019

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI İNDEKSLERİNİN UÇ
ÖĞRENME ALGORİTMASI İLE TAHMİNİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlhami POYRAZ
(161135106)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 Haziran 2019

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Temmuz 2019

Danışman : Doç. Dr. Resul ÇÖTELİ (F.Ü)

Üye : Prof. Dr. Sami EKİCİ (F.Ü.)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü.)

TEMMUZ-2019

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında bana destek olan, çalışmalarım sırasında beni yönlendiren ve fikirlerini benimle paylaşan çok saygıdeğer Doç. Dr. Resul ÇÖTELİ hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve desteğini sürekli hissettiğim aileme şükranlarımı sunarım.

İlhami POYRAZ
ELAZIĞ-2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ.....	IX
KISALTMALAR LİSTESİ.....	X
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	2
2. GERİLİM KARARLILIĞI.....	4
2.1 Güç Sistemlerinde Gerilim Çökmesinin Meydana Geldiği Ülkeler.....	7
2.2 Gerilim Kararlılığının Sınıflandırılması.....	8
2.2.1 Rotor Açık Kararlılığı	9
2.2.2 Gerilim Kararlılığı.....	9
2.2.3 Frekans Kararlılığı.....	10
3. GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZ METOTLARININ İNCELENMESİ	12
3.1 Statik Gerilim Kararlılığı Analizi.....	12
3.1.1 Gerilim Kararlılık İndeksleri	13
3.1.1.1 Hat Kararlılık İndeksi	15
3.1.1.2 Hat Kararlılık Faktörü	16
3.1.1.3 Gerilim Çökmesi Yakınlık Göstergesi	17
3.1.1.4 Hızlı Hat Kararlılık İndeksi	18
3.1.1.5 L-İndeks	18
3.2 Dinamik Gerilim Kararlılığı Analizi	19
3.3 Bara Çeşitleri.....	19
3.3.1 Salınım Barası	20
3.3.2 Yük Barası	20
3.3.3 Üretim Barası	20
3.4 Yük Akış Analiz Metotları.....	20
3.4.1 Gauss-Seidel Metodu	21
3.4.2 Newton-Raphson Metodu	22
3.4.3 Hızlı Ayrık Metot.....	25
4. YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA)	26
4.1 Uç Öğrenme Makinesi (UÖM)	27
4.1.1 UÖM’de Uygulanan Değerlendirme Yöntemi ve Ölçütleri.....	32
5. GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIK ANALİZİ	34
5.1 IEEE 14-Baralı Güç Sistemi	34
5.2 IEEE 14-Baralı Güç Sisteminin UÖM Algoritmalarıyla Analizi.....	36
5.3 IEEE 14-Baralı Güç Sisteminin YSA ile Analizi.....	48
6. SONUÇ	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Günümüzde elektrik enerjisi ihtiyacı, teknolojik gelişmeler sonucunda nüfusla orantılı olarak hızla artmaktadır. Artan bu talebi karşılamak için büyük güçlü üretim merkezleri kurulmuştur. Üretim merkezlerinin tüketim merkezlerinden uzakta kurulma gerekliliği, üretilen elektrik enerjisinin çok yüksek gerilimle ve uzun iletim hatlarıyla tüketim merkezlerine iletim zorunluluğu getirmiştir. Güç sistemleri de bu duruma bağlı olarak hızla büyümüş ve karmaşık bir yapı oluşturmuştur. Bu durum önemli işletme ve kontrol sorunlarını da beraberinde getirmiştir. Güç sistemleri daha karmaşık ve yoğun bir şekilde yüklenirken, ekonomik ve çevresel kısıtlamaların yanı sıra, gerilim dengesizliği gittikçe daha ciddi bir problem haline geldiğinden güç sistemleri yüklenme limitlerine yakın çalışmaktadır. Gerilim dengesizliği ile ilgili problemler birçok güç sisteminin güvenli bir şekilde çalışması için büyük bir endişe haline gelmiştir.

Bu çalışmada, IEEE 14-baralı güç sisteminde gerilim kararlılığı Uç Öğrenme Makinesi (UÖM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yardımıyla incelenmiştir. Bu amaçla, IEEE 14-baralı güç sistemi modeli Matlab ortamında oluşturulmuş ve bu model kullanılarak Newton-Raphson yöntemi yardımı ile yük akış analizi yapılmıştır. Bu güç sisteminde gerilim kararlılığı Hat Kararlılık İndeksi (HKİ) hesaplanarak değerlendirilmiştir. Yük akış analizinde tüm baraların aktif ve reaktif güçleri 0.05 birim değer (pu) artırılmış ve her bir baraya ait toplam 1000 adet aktif güç, reaktif güç, ilgili baranın gerilimi ve faz açısı elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak HKİ değerleri hesaplanmıştır. UÖM'ye ve YSA'ya girişler; aktif güç, reaktif güç, ilgili baranın gerilimi ve faz açısı seçilmiştir. UÖM'nin ve YSA'nın çıkışı ise HKİ değerleri olarak belirlenmiştir. UÖM'nin test başarımı 5-kat çapraz doğrulama ile verilmiştir. Ayrıca UÖM'nin başarımı farklı sayıda gizli katman hücre sayısı ve farklı tip aktivasyon fonksiyonları için incelenmiştir. YSA'nın oluşturulması aşamasında belirlenen aktivasyon fonksiyonu hem girişler için hem de ara katmanda tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu seçilmiştir. Eğitim aşamasında ise Levenberg-Marquardt eğitim algoritması tercih edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlardan, IEEE 14-baralı güç sistemlerinde gerilim kararlılığının tespitinde UÖM'nin ve YSA'nın HKİ'yi oldukça yüksek bir başarımla tahmin ettiği görülmüştür. Ancak YSA'nın tahmin süresi ve hata değerleri UÖM'nin değerlerinden daha büyük olmasından dolayı UÖM'nin tercih edilebileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gerilim Kararlılığı, Uç Öğrenme Makinesi, Hat Kararlılık İndeksi

SUMMARY

Estimation with Extreme Learning Algorithm of Power System Voltage Stability Index

Nowadays, electrical energy needs are increasing rapidly as a result of technological developments. In order to meet this growing demand, power plants have been built. The necessity of the building the production centers away from the consumption centers brought the electricity energy to be transmitted to the consumption centers with very high voltage and long transmission lines. Power systems have also grown rapidly and this situation formed a complex structure. Also, this case brought important operational and control problems. In this study, voltage stability in the the IEEE 14-bus power system was investigated by means of Extreme Learning Machine (ELM) and Artificial Neural Networks (ANN). For this purpose, the IEEE 14-bus power system model was built in Matlab environment and load flow analysis for this model was performed by using the Newton-Raphson method. In this power system, the voltage stability was evaluated by calculating the Line Stability Index (LSI). In the load flow analysis, the active and reactive powers of all bus were increased by 0.05 step (pu) and a total of 1000 active power, reactive power, voltage, and phase angle of the respective bus were obtained for each busbar. These values were used to calculate the values of LSI. The inputs of ELM and ANN are selected as active power, reactive power, voltage and phase angle of the respective bus. The output of the ELM and ANN was determined as LSI values. The test performance of the ELM is given by 5-fold cross-validation. In addition, the ELM's performance was investigated for the different number of hidden layer cell numbers and different types of activation functions. The activation function, which was determined during the creation of ANN, was chosen for the tangent sigmoid activation function for both inputs and the intermediate layer. Levenberg-Marquardt training algorithm was preferred in the training stage. From all the results, IEEE 14-bus power systems with the determination of the voltage stability of the ELM and ANN has been found to predict a very high performance in the LSI. However, since the estimated time and error values of the ANN are higher than the values of the ELM, it was evaluated that the ELM could be preferred.

Key Words: Voltage Stability, Extreme Learning Machine, Voltage Stability Index

ŞEKİLLER LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Güç sistem kararlılık problemlerinin sınıflandırılması	8
Şekil 3.1	Gerilim kararlılığı analiz yöntemlerinin sınıflandırılması	13
Şekil 3.2	İki baralı güç sistemi modeli	14
Şekil 4.1	Çok katmanlı ileri beslemeli YSA modeli	27
Şekil 4.2	Tek gizli katmanlı sinir ağı yapısı.....	28
Şekil 4.3	5-Kat çapraz doğrulama yöntemine ait örnek anlatım	33
Şekil 5.1	IEEE 14-baralı güç sisteminin tek hat şeması.....	34
Şekil 5.2	GKHS 20 UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi.....	38
Şekil 5.3	GKHS 20 UÖM'nin regresyon eğrisi	38
Şekil 5.4	GKHS 60 UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi.....	39
Şekil 5.5	GKHS 60 UÖM'nin regresyon eğrisi	39
Şekil 5.6	GKHS 100 UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi.....	40
Şekil 5.7	GKHS 100 UÖM'nin regresyon eğrisi	40
Şekil 5.8	GKHS 20 UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi.....	41
Şekil 5.9	GKHS 20 UÖM'nin regresyon eğrisi	41
Şekil 5.10	GKHS 60 UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi.....	42
Şekil 5.11	GKHS 60 UÖM'nin regresyon eğrisi	42
Şekil 5.12	GKHS 100 UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi.....	43
Şekil 5.13	GKHS 100 UÖM'nin regresyon eğrisi	43
Şekil 5.14	GKHS 20 UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi.....	44
Şekil 5.15	GKHS 20 UÖM'nin regresyon eğrisi	44
Şekil 5.16	GKHS 60 UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi.....	45
Şekil 5.17	GKHS 60 UÖM'nin regresyon eğrisi	45
Şekil 5.18	GKHS 100 UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi.....	46
Şekil 5.19	GKHS 100 UÖM'nin regresyon eğrisi	46

Şekil 5.20	YSA Uygulamasında kullanılan YSA'nın yapısı	49
Şekil 5.21	YSA uygulamasının ortalama karesel hata (MSE) grafiği.....	49
Şekil 5.22	Gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki fark grafiği	50
Şekil 5.23	YSA uygulaması regresyon değerleri grafiği.....	50
Şekil 5.24	Gerçek-Tahmin regresyon eğrisi.....	51
Şekil 5.25	Gerçek-Tahmin HKi değerleri fark grafiği	52
Şekil 5.26	Tüm değerler grafiği	52



TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1 IEEE 14-baralı güç sistemi için pu cinsinden iletim hattı parametreleri ...	35
Tablo 5.2 IEEE 14-baralı güç sistemine ait pu cinsinden bara değerleri	36
Tablo 5.3 İletim hatlarına ait farklı güç artırımlarından elde edilen HKİ değerleri...	37
Tablo 5.4 Farklı aktivasyon fonksiyonu ve GKHS değerlerine göre elde edilen sonuçlar	47
Tablo 5.5 YSA algoritma parametre bilgileri.....	48
Tablo 5.6 R-kare ve hata değerleri	53
Tablo 6.1 YSA ile UÖM'nin karşılaştırılması	56

SEMBOLLER LİSTESİ

β_i	: Çıkış ağırlık vektörü
b_i	: Bias değeri
E	: En küçük kareler çözümleri ifade eden değer fonksiyonu
H^+	: H matrisinin Moore-Penrose ters matris dönüşümü
I	: Hat akımı
N	: Ayrık örnek sayısı
$\tilde{N}$	: Ara katman sayısı
η	: Sinir ağının öğrenme oranı
P_i	: Gönderen uçtaki aktif güç
$P_{kayıp}$	: Hat üzerindeki kayıp aktif güç
$P_{kayıp(max)}$	: Hat üzerindeki maksimum kayıp aktif güç
P_r	: Hat üzerinden aktarılan aktif güç
$P_{r(max)}$	: Hat üzerinden aktarılan maksimum aktif güç
Q_r	: Son alıcı reaktif gücünü
$Q_{kayıp}$	: Hat üzerindeki kayıp reaktif güç
$Q_{kayıp(max)}$	: Hat üzerindeki maksimum kayıp reaktif güç
Q_r	: Hat üzerinden aktarılan reaktif güç
$Q_{r(max)}$	: Hat üzerinden aktarılan maksimum reaktif güç
R	: Hat direnci
θ	: Hat empedans açısı
t_j	: Sinir ağının tahmin değeri
V_i	: İlk gönderici gerilimi
w_i	: Giriş ağırlık vektörü
X	: Hat empedansını
X_N	: Giriş verisi
y_j	: Sinir ağının çıkış değeri
y_N	: Çıkış verisi

KISALTMALAR LİSTESİ

YSA	: Yapay Sinir Ağları
GKİ	: Gerilim Kararlılık İndeksi
HKİ	: Hat Kararlılık İndeksi
HKF	: Hat Kararlılık Faktörü
GÇYG	: Gerilim Çökmesi Yakınlık Göstergesi
HGKİ	: Hızlı Gerilim Kararlılık İndeksi
NLSİ	: Yeni Hat Kararlılık İndeksi
LYSİ	: Lokal Yük Sınır İndeksi
RBF	: Radyal Tabanlı Fonksiyon
GKM	: Gerilim Kararlılık Marjı
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
CIGRE	: Uluslararası Büyük Elektrik Sistemleri Konseyi
MSE	: Ortalama Karesel Hata
RMSE	: Ortalama Hata Kareleri Toplamı Kökü
MAE	: Ortalama Mutlak Hata
UÖM	: Uç Öğrenme Makinesi

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, günümüzde en yaygın olarak kullanılan enerji türüdür. Enerji güç sistem planlayıcıları, minimum maliyet, sarfiyat ve tasarruf için her türlü araştırma ve geliştirmeyi yapmak zorundadır. Güç sistemlerindeki büyüme, enerji üretim yöntemleri ve merkezlerinin çeşitliliği, büyük yüklerin üretim merkezlerine olan uzaklığının yanında enerji piyasasında kalite ve verimliliğin ön plana çıkması ve sektördeki standartların yükselmesi, güç üretimi ve planlamasını doğrudan etkilemektedir. Bir güç sisteminden beklenen temel özellikler:

- Tüketicie sunulan elektrik enerjisinde gerilim ve frekansın belirlenen sınırlar içerisinde olması,
- Piyasa ile rekabet edebilecek maliyete sahip olmanın yanında çevre için minimum tehdit oluşturmaması,
- Tüketicilere kesintisiz enerji sağlaması şeklinde ifade edilebilir [1].

Elektrik enerjisi ihtiyacının artması sonucu güç sistemlerinin hızla büyümesi önemli işletme ve kontrol sorunlarını da beraberinde getirmiştir. Kararlılık problemi bu sorunlardan en önemlisidir [2]. Enerji güç sistemleri, sürekli değişen şartlarda çalışan doğrusal olmayan sistemlerdir. Yükler, generatör çıkışları ve sistem parametreleri sürekli değişir. Buna bağlı olarak da; doğrusal olmayan, zamanla değişen ve dinamik bir olgu olan gerilim kararlılığı analizi, güç sistemlerinin işletiminde önemli bir ölçüttür [3].

Güç sistemlerinde gerilim ve frekans, belirli toleranslar içinde kalmalı ve sürekli olmalıdır. Enerji güç sisteminin, en verimli, kabul edilebilir dengeli çalışma koşulunda bulunması ve bozulmaya maruz kaldıktan sonra da, yeniden kararlı ve dengeli bir duruma gelebilmesi için, sistemin gerilim kararlılığının incelenmesi ve değerlendirilmesi gerekir [4-6]. Gerilim kararlılığı, enerji güç sisteminin yük talebi ile üretilen ve tüketim merkezine iletilen güç arasındaki dengenin korunması yeteneğidir [7-8]. Gerilim kararlılığı esasen bir güç sisteminin belirli bir noktasındaki, gerilim değeri ve reaktif güç dengesi ile ilgilidir. Bir güç sisteminin gerilimi birbirinden farklı çok sayıda faktöre sahip olabilir; örneğin gerilim değeri ve reaktif güç dengesi hem generatörlerde üretilen reaktif güce hem de iletim hatlarına ve kompanseörlere bağlıdır. Ayrıca, yük admitansının artması yükün artmasına neden olacağı için gerilim kararlılığı yük admitansına da bağlıdır [9]. Güç sisteminde talep edilen güç ile tüketilen güç dengeli değilse gerilim dengesizlikleri meydana gelebilir. Sistemdeki bir ya da daha fazla barada meydana gelebilecek yetersiz üretim veya fazla tüketim sistemdeki bazı

noktalarda gerilimin düşmesine ya da gerilimin yükselmesine neden olabilmektedir. Sistemde meydana gelebilecek bir üretim santralinin devreden çıkması, arıza veya ani değişimlerde gerilimi etkilemektedir [10].

Gerilim kararlılık sınırının tahmini doğru ve hızlı bir şekilde sağlanırsa, sistem operatörü de gerekli kontrol eylemlerini o kadar doğru ve hızlı başlatır [11]. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı analizi için Karar Ağacı Tekniği [12] ve Bulanık Ağlar [13], Yapay Sinir Ağları (YSA) [14] gibi yapay zeka tekniklerinin kullandığı yöntemler de önerilmiştir. 1989 yıllarından sonra Yapay Sinir Ağları (YSA) güç sistemlerinin var olan sorunlarını çözmek için kullanılmaya başlanmıştır [15]. İngiliz Enerji İletim Sistemlerinde YSA kullanılarak kararlılık analizlerinin çözümü gerçekleştirmiş ve YSA'nın pratik uygulamalarda da kullanılabileceğini kanıtlanmıştır [16]. Bununla birlikte, YSA'ların öğrenme hızı gerekenden çok daha zaman alıcıdır. YSA'ların bu özelliği, uygulamalarında en önemli sınırlamadır. Bu durumun iki ana nedenden kaynaklandığı belirtilmiştir. Bunlardan biri sinir ağını eğitmek için kullanılan eğitim düşünüm tabanlı öğrenme algoritmasının yavaş olması ve bu öğrenme algoritması ile ağların parametrelerinin tekrarlı ayarlanmasıdır [17]. YSA'ların bu dezavantajlarını gidermek için, Huang vd. (2006) tarafından Uç Öğrenme Makinesi (UÖM) olarak bilinen yeni bir öğrenme algoritması önerilmiştir. Hızlı öğrenme ve genelleme gibi üstün yeteneklere sahip UÖM kullanılarak oluşturulan sınıflandırıcılar günümüzde birçok alanda yer almaktadır [17,18]. Güç sistemleri alanında arıza yeri tespiti, arıza sınıflandırma, rüzgâr gücü ve yük tahmini gibi işlemlerde kullanılmaktadır [19-22]. Sadece doğrusal tek bir denklemi çözerek, yerel minimumlara takılmadan çıkış verebilen UÖM yapısı, YSA tabanlı geleneksel sınıflandırıcılara oranla daha az tasarım parametresi içermektedir.

1.1. Literatür Araştırması

Enerji güç sistemlerinin yapısı son dönemlerde, enerji sektörünün özelleştirilmesi ve daha büyük bir enerji sistemine ihtiyacın getirdiği gerekliliklerden dolayı büyümüş ve kompleks bir yapı haline gelmiştir. Bu sebeple yeni tekniklerin enerji güç sistemlerinin sorunlarını çözmek için geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır [23]. Gerilim kararlılığı çalışmalarında iki önemli nokta vardır. Bunlardan birincisi gerilim kararlılığının değerlendirilmesi, yani gerilim

kararlılığı sınırını doğru olarak ölçmek ve diğeri ise gerilim çöküşüne en duyarlı alanların ve baraların tanımlanması dâhil olmak üzere gerilim kararsızlığı mekanizmalarının analizidir.

Ref. [24]'de gerilim kararlılığının değerlendirmesi için kullanılan geleneksel yöntemler PV-QV eğrileri ve düğüm analizi yöntemleridir. Bununla birlikte son yıllarda, gerilim kararlılığını incelemek için birçok yöntem önerilmiştir. Yapılan bazı çalışmalarda gerilim çökmesinin bir göstergesi olarak gerilim kararlılık indekslerinden Hat Çökme Yakınlık İndeksi (HÇYİ) Ref. [25], Lokal Yük Sınır İndeksi(LYSİ) Ref. [26], Yeni Gerilim Çökme Noktası İndeksi (NIVCP) Ref. [27], Yeni Hat Kararlılık İndeksi (NLSİ) Ref. [28] kullanılmıştır. Ref. [29-31]'te, Kohonen, Elman çok katlı ileri beslemeli ağlarını gerilim kararlılığı problemlerinin çözümünde kullanmıştır. Ref. [32]'te, çok sayıda Hat Gerilim Kararlılık İndeksi (HGKİ) verileri ile IEEE 9-baralı ve IEEE 14-baralı güç sistemleri için YSA kullanılarak tahmin edilen indekslerin, sistemdeki gerilim çökmesinin önceden tahmin etmede başarılı olduğunu göstermiştir. Ref. [33]'te, IEEE 14-baralı güç sisteminde, aktif ve reaktif güç verileri kullanılarak gerilim kararlılık marjının YSA ile kolayca elde edildiği belirtilmiştir. Ref. [34]'da, YSA kullanarak eğitim parametre seçiminin, L-indeksi hesaplamasını etkilediğini göstermiştir. L-indeksi gerilim kararsızlığı için bir yakınlık göstergesidir. L-indeksi verilerinin yapay zeka tekniklerde kullanılmasının, gerilim kararsızlığını etkili bir şekilde tahmin ettiği için YSA'nın kullanılabileceğini göstermektedir. Ref. [35]'de, on-line gerilim kararlılığının incelenmesi için YSA tabanlı bir yaklaşım sunulmuş; bu yaklaşımda, acil durum altında sistemin gerilim kararlılık düzeyini tahmin etmek için radyal tabanlı sinir ağları (RBF) kullanılmıştır. Bu yöntem, gerçek çalışma koşulları için sinir ağının sıkı bir şekilde eğitilmesini gerektirir. Ref. [36]'de, gerilim çöküşünün ve hattaki yüklenme stresi ciddiyetinin ortaya çıkmasını YSA tarafından tahmin etmek için geliştirilmiş bir HÇYİ geliştirilmiştir. IEEE 30-bara sistemi ve IEEE 118-bara sistemi üzerinde önerilen işletme indeksinin farklı çalışma koşulları ve farklı çalışma durumlarında uygulanmış, önerilen indeksin tüm işletim koşullarında güç sistemlerinin gerilim kararlılığını doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermiştir. Ref. [37]'da, IEEE 14-baralı güç sistemi kullanılarak hedeflenen çıkış ile YSA çıkışı arasında iyi bir uyum olduğu gösterilmiş, gerilim kararlılık indeksi (L-indeksi) geleneksel yöntemle (Newton Raphson; yük akışı) ve YSA kullanılarak hesaplanmıştır. L-indeks değerinin, gerilim kararlılık için bir ölçüt olduğu belirtilmiştir. Ref. [38]'da, sınırlı sayıda ölçüm ile büyük bir güç sistemini izlemek için bir yöntem önerilmiş, güç sisteminin birden fazla alandan

oluştuğunu varsayarsak, sistemin tamamı, iç alan olarak adlandırılan alanlardan birinden gelen ölçümlerle belirlenmiştir. Yükleme marjını tahmin etmek için uyarlayıcı olarak eğitilmiş YSA'lar kullanılmıştır. Dış alanlardan alınan ölçümlere ilişkin bilgiler, şebeke küçültme süreci ile iç ölçümlere dâhil edilir. Dış alanların çalışma koşulları ile ilgili bu bilgiler ile YSA'ların tahmin doğruluğu geliştirilmiş, YSA için belirlenen eğitim verilerindeki herhangi bir istenmeyen verinin tespit edilmesi ve işlenmesi için Z-skorumaya dayalı bir yöntem de uygulanmıştır. Önerilen yöntemler IEEE 14-bara ve IEEE 118-bara güç sistemlerinde başarıyla test edilmiştir. Ref [39]'de, çeşitli sistem konfigürasyonları için Gerilim Kararlılık Marjı (GKM)'yi tahmin etmek için tek bir YSA'nın kullanılması olasılığı araştırılmış ve New England 39-bara ve Güney/Doğu Avustralya güç sistemlerinin dinamik modelleri üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı sistem konfigürasyonları ve işletim koşullarını göz önünde bulundurarak, mümkün olan en az giriş özelliğini kullanarak, GKM'yi başarılı ve doğru bir şekilde tahmin edebilen, kompakt ve verimli bir YSA modeli sağladığını göstermiştir.

2. GERİLİM KARARLILIĞI

Modern güç sistemleri ileri seviyede planlanmış, çok değişkenli, dinamik sistemlerdir. Genel olarak, güç sistem parametrelerindeki bozulmalar, sistem elemanlarının farklı karakteristiklerde olmasından kaynaklanmaktadır. Güç sistem kararlılığı genellikle bir güç sisteminin, kabul edilebilir dengeli bir çalışma şartında bulunması ve bozulmaya maruz kaldıktan sonra da, yeniden kararlı ve dengeli bir duruma gelebilmesi ile ilgilidir. Bir güç sisteminin, en verimli, kabul edilebilir dengeli bir çalışma şartında bulunması ve bozulmaya maruz kaldıktan sonra da, yeniden kararlı ve dengeli bir duruma gelebilmesi için, sistemin gerilim kararlılığının incelenmesi ve değerlendirilmesi gerekir. Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin yük talebi ile üretilen ve yük merkezine iletilen güç arasındaki dengenin korunması yeteneğidir [7,40].

Gerilim kararsızlığına sebep olan bazı etkenler şöyledir [41-43]:

- Enerji iletim hatlarının aşırı derecede yüklenmesi ile elektriksel yüklerin yapısı ve özellikleri,
- Enerji üretim kaynaklarının yük merkezlerine olan uzaklıklarının fazla olması,
- Kaynak gerilimlerinin çok düşük olması,
- Çeşitli kontrol ve koruma sistemleri arasındaki koordinasyon bozukluğu
- Reaktif güç kompanzasyon cihazlarının veya kontrolörlerinin yapısı ve özellikleri
- Transformatör kademe değiştiricisi gibi gerilim kontrol cihazlarının çalışma biçimleri.

Aşağıda literatürde yer alan birkaç gerilim kararlılığı tanımlamaları verilmiştir. Bu tanımlamalar, gerilim kararsızlığı süresince meydana gelen olayların durumuna, arızanın yapısına ve zamanına göre ele alınmıştır. Uluslararası Büyük Elektrik Sistemleri Konseyi'ne (CIGRE) göre gerilim kararlılığı tanımları aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [44]:

- Verilen çalışma durumundaki bir güç sisteminde, eğer yük yakınındaki gerilimler herhangi bir küçük bozulmadan önceki değerlere eşit ya da yakın ise bu sistem küçük bozulmalara karşı gerilim kararlıdır.
- Eğer gerilim yaklaşık olarak sonraki bozulma dengesi değerine yakınsa, verilen çalışma düzeninde ve verilen bir bozulmaya bağlı olarak, güç sistemindeki gerilim kararlıdır.

- Eğer sonraki gerilim bozulmaları kabul edilebilir sınırların altında ise, güç sistemi gerilim çökmesi ile karşılaşmamaktadır.

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü'ne (IEEE) göre gerilim kararlılığı tanımları ise aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [45]:

- Gerilim kararlılığı bir sistemin gerilimini koruyabilme yeteneğidir. Yük admitansı yükseldiği zaman, yük gücü de artacak ve böylece hem yük hem de gerilim kontrol edilebilecektir.
- Gerilim çökmesi bir süreçtir ve gerilim kararsızlığı sistemin önemli bir parçası olan gerilimin azalmasına yol açmaktadır.
- Gerilimin güvenliği, sistemin kararlı çalışmasına bağlı olmakla beraber, aynı zamanda sistem değişimlerine karşı veya kaynağı belli olmayan bozucu olaylarda kararlı kalabilme yeteneğidir.
- Bir sistemde; bozulmalar, yükteki artışlardan veya sistem değişmelerinden kaynaklanan hızlı gerilim düşümleri, operatör veya otomatik sistem kontrolörü tarafından engellenemezse gerilim kararsızlığına gider. Gerilim zayıflaması birkaç saniyeden onlarca dakikaya kadar sürebilir. Eğer zayıflama devam ederse, kararlı hal açısı kararsız hale gelir veya gerilim çökmesi meydana gelmektedir.

IEEE ve CIGRE ortak tanımlamaları aşağıda verilmiştir [40]:

- Gerilim kararlılığı, bir güç iletim sisteminin, verilen bir önceki işletme durumundan farklı bir durumda bozulmaya maruz kaldığında, bütün baralarda kararlı gerilimi koruyabilme yeteneğidir.
- Gerilim çökmesi, güç sistemlerinin işletim şartlarının belirlenmesinde önemli bir rolü olan gerilim kararsızlığı, aşırı gerilim düşümü veya kesintilere sebep olan olayların, oluşturmuş olduğu bir süreçtir.

CIGRE tanımı diğer dinamik sistem kararlılık problemlerine benzemektedir. IEEE tanımı daha çok, güç sistem şebekesinin gerçek işletme sürecini vurgulamaktadır. Bu tanımlamalar arasındaki ortak noktalar aşağıda verilmiştir:

- ❖ Gerilim kararlılığı dinamik bir olaydır.
- ❖ Sistemin gerilimi kabul edilebilir bir seviyede kontrol edildiğinden, güç sistemi sistem bozulmalarından kurtulabilir.

- ❖ Gerilim çökmesi veya gerilim kararsızlığı birbirinin yerini tutabilir ve her ikisi de gerilim kararlılığının azalmasıyla ilgilidir.

2.1. Güç Sistemlerinde Gerilim Çökmesinin Meydana Geldiği Ülkeler

- Fransa'da 1978 yılında meydana gelen gerilim çökmesinde, öğleden önce saat 7-8 saatleri arasında bir önceki gün talep edilen yükten 1600 MW daha fazla güç talebi oldu. 400 kV'luk yüksek gerilim şebekesinde gerilim seviyesi 342 kV'a düştü bu durum 20 dk sürdü. Gerilim normal haline ancak saat 12.30'da getirilebildi. Bu süre zarfında ise 100 GWh enerji kesintiye uğramıştı.
- Belçika'da ise 1982 yılında, test çalışması sırasında 700 MW güç sisteme bağlanamadığından dolayı yaklaşık 4 dakika boyunca gerilim çökmesi meydana geldi.
- Amerika'nın Florida eyaletinde 1985 yılında, generatör fırçalarının yanmasından kaynaklanan arıza nedeniyle 500 kV'luk iletim hattında gerilim düşmesi meydana geldi ve bunun sonucunda sistemde birkaç saniye içinde gerilim çökmesi oldu.
- Batı Fransa'da 1987 yılında, aşırı uyartım koruma sistemindeki hatadan kaynaklanan arıza nedeniyle gerilim çökmesi meydana geldi.
- Güney Finlandiya'da 1992 yılında, 400 kV'luk iletim hattında bakım esnasında 735 MW'lık yükün etkilediği sistemde gerilim seviyesi 344 kV seviyelerine düştü. Sistem gerilimi gaz türbinlerinin yük koruyucuları ile çalıştırılmaya başlanması sonucunda reaktif güç üretiminin artırılması ile tekrardan normal seviyesine getirilebildi [46].
- Amerika'da 1996 yılında, 345 kV'luk hatta bir kısa devre arızası meydana geldi ve kuzey Batı Amerika sistemi kesintiye uğradı ve bunun sonucu olarak sistemde hızlı gerilim ve açı kararsızlığı oluştu [47].
- 14 Ağustos 2003 tarihinde ise, Amerika Kanada arasında meydana gelen gerilim çökmesinde bu iki ülkede yaşayan toplam 50 milyon insan etkilendi. 400 iletim hattı ve 531 üretim birimi zarar gördü. Amerika ve Kanada da meydana gelen olaylar enerji sistemlerinde gerilim kararlılığı düzeltme yöntemlerinin araştırılması ve geliştirilmesinin önemini göstermiştir [48].

Kayıtlara geçen diğer gerilim çökmeleri şu şekilde sıralanabilir:

2.2. Gerilim Kararlılığının Sınıflandırılması

```

graph LR
    A[Güç Sistemi Kararlılığı] --> B[İşletme Dengesinde Kalabilme Yeteneği]
    A --> C[Rotor Açısı Kararlılığı]
    A --> D[Frekans Kararlılığı]
    A --> E[Gerilim Kararlılığı]
    C --> C1[Kısa Sinyal Kararlılığı]
    C --> C2[Geçici Hal Kararlılığı]
    D --> D1[Ara Süre Kararlılığı]
    D --> D2[Uzun Süre Kararlılığı]
    E --> E1[Büyük Bozulma Gerilim Kararlılığı]
    E --> E2[Küçük Bozulma Gerilim Kararlılığı]
  
```

Güç Sistemi Kararlılığı

- İşletme Dengesinde Kalabilme Yeteneği**
- Rotor Açısı Kararlılığı**
 - Senkronizasyon Koruma Yeteneği
 - Senkron Makinenin Moment Dengesi
- Frekans Kararlılığı**
- Gerilim Kararlılığı**
 - Kararlı Kabul Edilebilecek Gerilimi Koruma Yeteneği
 - Reaktif Güç Dengesi

Kısa Sinyal Kararlılığı: Yetersiz Senkrolama Momenti, Yetersiz Moment Azaltma

Geçici Hal Kararlılığı: Büyük Bozulma İlk Salınım, 10 saniyeden Fazla

Ara Süre Kararlılığı: Büyük Gerilim ve Frekans Süreci Hızlı ve Yavaş Dinamikler, Birkaç Dakika

Uzun Süre Kararlılığı: Tek Tip Sistemlerde Frekans Aralığı, Yavaş Dinamikler, Onlarca Dakika

Büyük Bozulma Gerilim Kararlılığı: Büyük Bozulma Anahtarlama Olayları, ULTC Dinamikleri, Yük Kontrol ve Koruma Koordinasyonu

Küçük Bozulma Gerilim Kararlılığı: Kararlı Hal P/Q-V İlişkisi, Kararlılık Sınırlı, Q Yedek

8

2.2.1. Rotor Açı Kararlılığı

Rotor aç ı kararlılığı, elektrik şebeke yapısında eş zamanlı çalışan makinelerin bir sorun ile karşılaştıktan sonra eş zamanlı çalışabilirliğini temsil eder. Bu sistemdeki her eş zamanlı makinenin mekanik moment ve elektromanyetik momentin arasındaki dengenin oluşturulabilirliğine dayanır. Kararsızlık, bazı generatörlerin aç ısal salınımlarındaki artış nedeniyle, diğ er generatörler ile olan eş zamanlılığını kaybetmesine neden olabilir [50]. Bozulmanın büyüklüğüne ve içeriğine bağlı olarak, rotor aç ı kararlılığı genellikle, küçük işaret kararlılığı ve geçici hal kararlılığı olmak üzere, iki sınıfta incelenebilir.

Küçük işaret kararlılığı, güç sistemlerinin küçük bozulmalar altında generatörün senkronizasyonunu koruyabilme yeteneği iken (yük ve üretimdeki küçük değişiklikler) geçici hal kararlılığı ise, güç sistemlerinin büyük geçici bozulmalardan sonraki senkronizasyonunun koruma yeteneğidir (iletim hatlarındaki hatalar ve generatör birimindeki salınımlar).

Rotor aç ı kararlılığı, enterkonnekte güç sistemlerinin oluşmasından itibaren, güç sisteminin kararlı çalışabilmesinin temel noktasını meydana getirmiştir. Sonuç olarak, hızlı çalışan kesiciler, hızlı generatör kontrol sistemleri ve değişik özel güç sistem kararlılık kontrolörleri gibi teknolojiler ile bu durum oldukça hafifletilmiştir.

2.2.2 Gerilim Kararlılığı

Gerilim kararlılığı, bozulmanın büyüklüğüne bağlı olarak aşağıda tanımlanan iki kategoride sınıflandırılabilir [40,44]:

1. Büyük bozulmalı gerilim kararlılığı, sistem hatası, üretim kaybı veya hat salınımları gibi büyük bozulmalarda, kabul edilebilir gerilim dengesini koruyan güç sisteminin yeteneği ile ilgilidir. Kesintili ve kesintisiz kontrol ve koruma cihazları arasındaki etkileşimi kapsayan güç sisteminin doğrusal olmayan cevabı, büyük bozulmalı gerilim kararlılığını belirlemek için incelenmelidir. Sistemde oluşan büyük bozulmalar altında çalışan cihazın, bu şart altında çalışma periyodunun süresi bir kaç saniyeden onlarca dakikaya kadar varabilir.
2. Küçük bozulmalı gerilim kararlılığı, sistem yükündeki değişimlerin artmasından dolayı oluşan küçük salınımlara maruz kaldığında kabul edilebilir gerilim dengesini

koruyan, güç sistemlerinin yeteneği ile ilgilidir. Küçük bozulmalı gerilim kararlılığı analizi için, işletme noktası çevresinde doğrusallaştırılmış sistem modelini göz önünde tutmak en uygun olanıdır. Transformatörlerin sargılarının akımlar sabit kalacak şekilde değişmesi ve diğer donanım için sürekli olmayan modeller, yaklaşık sürekli modeller ile yer değiştirilebilir. Küçük bozulmalı gerilim kararlılığının çalışma periyodu dakikalar ile saatler aralığında değişebilir.

2.2.3 Frekans Kararlılığı

Frekans kararlılığı, bir güç sisteminin başlangıçta tanımlanan koşullar altında normal çalışma şartlarında ve sistemde oluşacak herhangi bir bozunum sonrasında kararlı frekansını sürdürebilme yeteneğidir [51]. Sistemin frekans yönüyle kararlılığını sürdürebilmesi ve/veya yeniden kararlılığı yakalaması sisteme verilen ve sistemden çekilen aktif güç arasındaki dengeye bağlıdır. Kararsızlık sonucunda sürekli frekans salınımları oluşur ve nihayetinde generatör birimlerinin ve/veya yüklerin ardışıl şekilde sistemden çıkmasına neden olur.

Kısa süreli frekans kararsızlığının bir örneği, düşük üretim adalarının oluşumu ile yetersiz düşük frekans yük dağıtımı ile oluşan frekans çöküşlerinin hızla neden olduğu birkaç saniyelik üretim duraksamalarıdır [52]. Öte yandan buhar türbini aşırı hız [53] ya da reaktör koruyucu ve kontrollerinin neden olduğu frekans kararsızlıkları gibi daha karmaşık durumlarda ilgilenilen zaman aralığı saniyelerden dakikalara değişebilir [54-56].

Şiddetli sistem bozulmaları genellikle frekansta, güç akışında, gerilimde ve diğer sistem değerlerinde büyük salınımlara yol açar, bu yüzden süreçteki aksiyonlarda, kontrollerde ve korumalarda geleneksel geçici kararlılık veya gerilim kararlılığı çalışma modellerinde rastlanmayan etkiler görülebilir. Bu süreç kaynama enerjisi gibi yavaş olabilir veya Volt/Hertz koruyucu röle generatörleri gibi sadece uç sistem koşullarında tetiklenebilir. Bu tür durumlar en çok sistemin adalara ayrılmasının ardından gerçekleşir. Bu durumda da kararlılık, her adanın minimum istenmeyen yük kaybıyla tekrar dengeli çalışma haline dönüp dönemeyeceği problemidir. Makinelerin ilgili hareketlerinden çok, tüm adanın bir tepkisi olan frekansla belirlenir. Genellikle frekans kararlılığı problemi, teçhizat tepkilerindeki yetersizlikler, zayıf kontrol ve koruyucu koordinasyonu veya yetersiz generatör rezervi ile

ilgilidir. İzole edilmiş ada sisteminde frekans kararlılığı göreceli olarak büyük yük ve üretim kaybına neden olan bir kararsızlıkla ilgili olabilir [57].

Bazı güç sistemlerinde elektrik kesintisi olayları, kararsızlık olayının farklı basamaklarında, sistem çökmesi olarak geliştiğini gösterir. Genel örnekleri ile güç sistem elektrik kesintilerinin önemli analizleri aşağıda verilmiştir:

- Çoğu olaylar, güç sistemi aşırı yüklü olduğunda meydana gelmektedir.
- İletim hatları veya generatörlerdeki açmaların, güç sistemini daha da zayıflattığı görülmüştür.
- Güç sistemlerinde salınımlar başladığında, sistem frekansı normal çalışma frekansından farklı değerlerde olup gerilim bozulmaya başlamaktadır.
- Daha fazla generatör ve iletim hattı problemi yaşandığı durumlarda, sistem küçük parçalara bölünebilmektedir.

3. GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZ METOTLARININ İNCELENMESİ

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığının incelenmesi, sistemdeki bütün baraların gerilim yönüyle işletme limitleri içerisinde kalıp kalmadığını tespit etmek ve nominal çalışma noktasının çökme noktası olarak da bilinen kritik noktaya olan uzaklığının hesap etmek amacıyla yapılmaktadır [58].

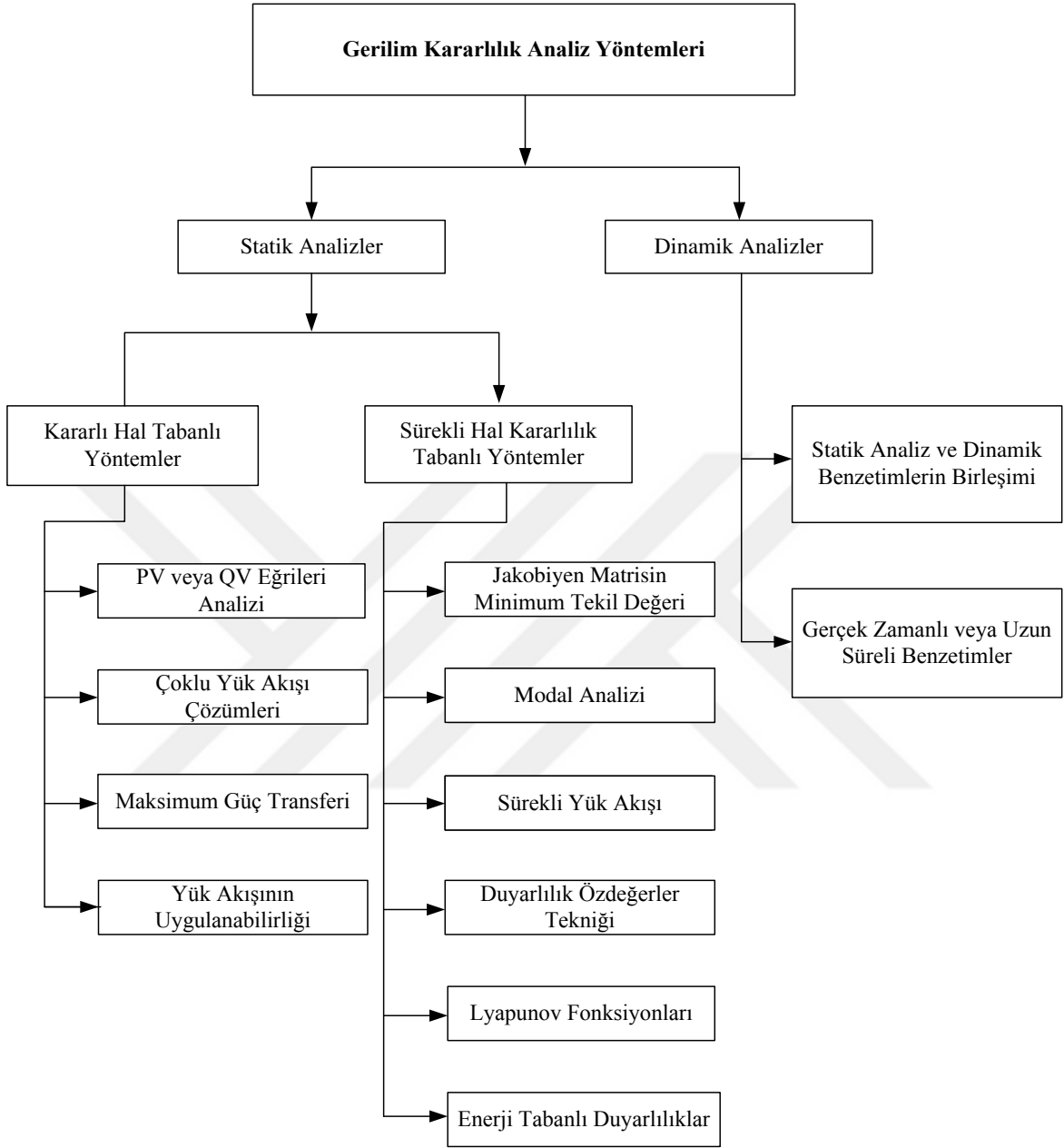
Güç sistemlerinde, gerilim kararlılığının incelenmesinde yaygın olarak statik ve dinamik gerilim kararlılığı analizleri mevcuttur [59]. Güç akışı çözümlerini temel alan statik gerilim kararlılığı analizleri, güç sisteminde farklı büyüklüklerde güç iletimi için aktif ve reaktif güç bakımından zayıf bölgeleri, sistemdeki her bir baranın maksimum yüklenebilirlik limitlerini ve sistemde gerekli kompanzasyon elemanlarının boyutunu belirlemek için kullanılmakta olup; bu analizler sonucunda genel sonuçlar elde edilmektedir. Diğer taraftan, zaman eksenli simülasyonlar temelinde yapılan dinamik gerilim kararlılığı analizleri, sistemde oluşacak bozunumlar sonrasında sistemin uygun bir şekilde işletilmesi yönünden sistemin yeteneğini analiz etmek için kullanılmaktadır [60].

3.1. Statik Gerilim Kararlılığı Analizi

Kararlı durum gerilim kararlılığı analizi olarak da bilinen statik gerilim kararlılığı analizlerinde güç akışı uygulamaları temel alınır. Bu analiz ile bir güç sisteminin iletebileceği maksimum gücün belirlendiği sistemin yüklenebilirlik kapasitesi incelenir.

Sistemin gerilim kararlılık sınırlarını belirlemek için hat kapasiteleri, generatör kapasiteleri ve gerilime bağlı yük karakteristikleri dikkate alınmalıdır. Bu amaç için gerilim kararlılığı analizleri yapılacak sistem, uygun güç sistemleri analiz programlarıyla uygun bir şekilde modellenir ve ardışık güç akışı hesaplamalar yapılır. Her bir adım için adım aralıkları belirlenerek güç akış hesaplamaları yenilenir. Bu durum gerilimin çökme noktası olan kritik noktaya ulaşmasına kadar devam eder. Sonuç olarak sistemin gerilim yönüyle sınırları belirlenmiş olur [62]. Güç sistemi sürekli hal modelini temel alan gerilim kararlılığının güvenirliliğini tahmin etmesi için Gerilim Kararlılığı İndeksi (GKİ) içermektedir.

Gerilim kararlılığı analiz yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 3.1’de gösterilmiştir [61]:



Şekil 3.1: Gerilim kararlılığı analiz yöntemlerinin sınıflandırılması [61]

3.1.1. Gerilim Kararlılık İndeksleri

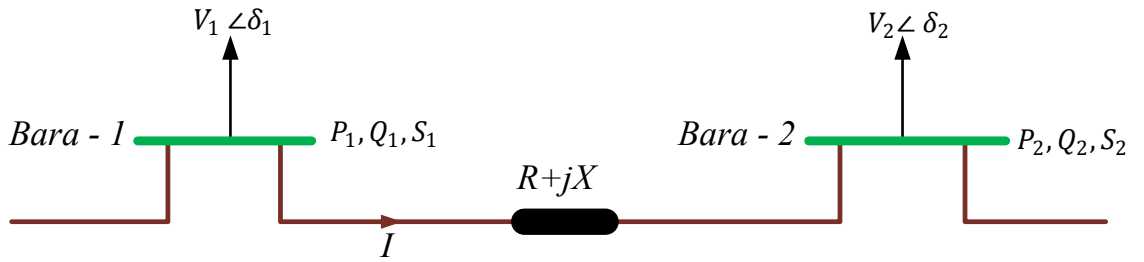
Bir enerji iletim sisteminde, aşırı bir şekilde yüklendiğinde veya gerilimde ani bir düşüş ya da sistemin geriliminde geniş kapsamlı bir çökme ile gözlenen üretim ve iletimini sürdüremediğinde gerilim çökmesi meydana gelir. Gerilimdeki bu değişiklik o kadar hızlıdır ki gerilim kontrol cihazları kademeli elektrik kesintilerini önleyecek kadar hızlı bir şekilde düzeltici eylemlerde bulunamayabilir. Operatörlerin ve planlayıcıların gerilim

dengeşizliğinin sınır noktasını bulması önemlidir. Bu nedenle, gerilim kararlılık indeksini bulmak gerilim kararlılık çalışmaları için önemli bir durum haline gelmiştir. Araştırmacılar, güç sistemlerinde enerji sisteminin yklenebilirliğini tespit etmek için gerilim kararlılık indekslerini önermişlerdir. Bu indeksler, bir güç sistemindeki gerilim dengeşizliğinin yakınlığı hakkında güvenilir bilgi sağlar. Genellikle değerleri 0'dan (yüksüz) 1'e (gerilim çökmesi) değerir. Gerilim kararlılık koşulu, gerilim kararlılığı indeksi kullanılarak belirlenebilir. Belirli bir g sistemi için gerilim kararlılığının analizi iki hususla ilgilidir:

1. Uygun bir gerilim kararlılık indeksi, sistemin gerilim dengeşizliğine yakınlığının göstergesidir.
2. Kararlı bir sistemde kritik baraların hangileri olduğu ve hangi alanları kapsadığını açıklar.

Gerilim kararlılık indeksleri, Hat Kararlılık İndeksi (HKİ) , Hat Kararlılık Faktörü (HKF), Gerilim kmesi Yakınlık Göstergesi (GYVG), Hızlı Hat Kararlılık İndeksi (HHKİ) ve L-İndeks olmak üzere beş başlık altında geliştirilmiştir.

GKİ bulunurken şekil 3.2'de olduğu gibi tüm sistem iki baraya indirgenir. Baralardan biri salınım barası, diğerı yük barası olarak seçilir [63].



şekil 3.2. İki baralı güç sistemi modeli

şekil 3.2'de;

V_1, V_2 : Salınım barasından gönderilen gerilim, yk barasından alınan gerilim,

P_1, Q_1 : Salınım barasından gönderilen aktif ve reaktif gler,

P_2, Q_2 : Yük barasından çekilen aktif ve reaktif gler,

S_1, S_2 : Salınım barasından gönderilen görünür güç ve yk barasından alınan görünür güç,

δ : Baralar arasındaki gerilim aı farkı ($\delta_1 - \delta_2$),

- I : Hat akımı,
 Z : Hat empedansı,
 R : Hat direnci,
 X : Hat reaktansı,
 θ : Hat empedans açısını ifade etmektedir.

3.1.1.1. Hat Kararlılık İndeksi

M. Moghavammi vd. [64], bir güç sisteminin her iletim hattının gerilim kararsızlığına olan yakınlığını gösteren bir kararlılık kriteri oluşturdular. Bu indeks, güç aktarım kavramına dayanır ve burada gerilim ikinci dereceden denkleminin ayırt edici özelliği, kararlılık elde etmek için sıfırdan büyük veya sıfır olarak ayarlanmalıdır. HKİ, aşağıdaki denklemlere göre formüle edilir [65-67].

$$S_2 = \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{Z} \angle(\theta - \delta_1 + \delta_2) - \frac{|V_2|^2}{Z} \angle(\theta) \quad (3.1)$$

$$S_1 = \frac{|V_1|^2}{Z} \angle(\theta) - \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{Z} \angle(\theta + \delta_1 - \delta_2) \quad (3.2)$$

Görünür güç, aktif güç (P) ve reaktif güç (Q) cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_2 = \frac{V_1 \cdot V_2}{Z} \cos(\theta - \delta_1 + \delta_2) - \frac{V_2^2}{Z} \cos\theta \quad (3.3)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 \cdot V_2}{Z} \sin(\theta - \delta_1 + \delta_2) - \frac{V_2^2}{Z} \sin\theta \quad (3.4)$$

V_2' 'nin çözümü için denklem (3.4)'teki $\delta_1 - \delta_2$ yerine δ alınırsa;

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot \sin(\theta - \delta) \pm \sqrt{[V_1 \cdot \sin(\theta - \delta)]^2 - 4 \cdot Z \cdot Q_2 \cdot \sin\theta}}{2 \cdot \sin\theta} \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'te $Z \cdot \sin\theta$ yerine X (hat reaktansı) konursa:

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot \sin(\theta - \delta) \pm \sqrt{[V_1 \cdot \sin(\theta - \delta)]^2 - 4 \cdot Z \cdot Q_2 \cdot \sin\theta}}{2 \cdot \sin\theta} \quad (3.6)$$

elde edilir.

Reaktif güç (Q) cinsinden V_2 'nin gerçek değerlerini elde etmek için denklemin gerçek kökleri olmalıdır. Dolayısıyla, bir kararlılık kriteri olarak kullanılabilecek aşağıdaki şartların yerine getirilmesi gerekir:

$$\{[V_1 \cdot \sin(\theta - \delta)]^2 - 4 \cdot Z \cdot Q_2 \cdot \sin\theta\} \geq 0 \quad (3.7)$$

HKİ;

$$HKİ = \frac{4 \cdot X \cdot Q_2}{[V_1 \cdot \sin(\theta - \delta)]^2} \leq 1 \text{ olmalıdır.} \quad (3.8)$$

HKİ, hat kararlılık indeksi olarak adlandırılır. Kararlılık kriteri, birbirine bağlı bir ağdaki iki bara arasında bağlanan her bir iletim hattı için kararlılık indeksini bulmak için kullanılır. İletim hatlarının kararlılık göstergelerine bağlı olarak, gerilim çökmesi doğru bir şekilde tahmin edilebilir. Kararlılık indeksi HKİ, 1'den küçük olduğu sürece, sistem kararludur ve bu indeks değeri 1 değerini aştığında, tüm güç sistemi kararlılığını kaybeder ve gerilim çökmesi meydana gelir. 1'e yakın HKİ değerlerini veren iletim hatları, bu hatların kararsızlık noktalarına daha yakın olduğunu gösterir. Kararlı durumu korumak için, HKİ indeksi 1'den küçük olmalıdır [68].

3.1.1.2. Hat Kararlılık Faktörü

A. Mohamed vd. [69] tarafından önerilen HKF, reaktif güç değişimine duyarlıdır ve reaktif güçteki değişikliklere göre hat gerilim kararlılığını gösterir ve (3.9)'daki eşitlik ile hesaplanır:

$$HKF = 4 \cdot \left[\frac{X}{V_i^2} \right] \cdot \left[\frac{X}{V_i^2} \cdot P_i^2 + Q_j \right] \quad (3.9)$$

Burada;

X : Hat reaktansı,

Q_j : Son alıcı reaktif gücünü,

V_i : İlk gönderici gerilimi,

P_i : Gönderen uçtaki aktif güçtür.

HKF değeri, gerilimi kararlı olan sistemi korumak için 1'den küçük olmalıdır.

3.1.1.3. Gerilim Çökmesi Yakınlık Göstergesi

M. Moghavvemi vd. [70] tarafından önerilen GÇYG, bir güç hattı üzerinden aktarılan maksimum güç kavramına dayanmaktadır. Bir hat boyunca aktarılan gücün aşırı olması veya hattın aşırı güç çekmesi gerilim çökmesinin ana nedenlerinden biridir. Aktarılan güce ve kayıp güce göre GÇYG indeksi eşitlik (3.10) ve (3.11)'deki gibi bulunabilir:

$$GÇYG(Güç) = \left[\frac{P_r}{P_{rmax}} \right] = \left[\frac{Q_r}{Q_{rmax}} \right] \quad (3.10)$$

$$GÇYG(Kayıp) = \left[\frac{P_{kayıp}}{P_{kayıp(max)}} \right] = \left[\frac{Q_{kayıp}}{Q_{kayıp(max)}} \right] \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.10) ve (3.11)'te;

P_r, Q_r : Hat üzerinden aktarılan aktif ve reaktif gücü;

P_{rmax}, Q_{rmax} : Hat üzerinden aktarılan maksimum aktif ve reaktif gücü;

$P_{kayıp}, Q_{kayıp}$: Hat üzerindeki kayıp aktif ve reaktif gücü;

$P_{kayıp(max)}, Q_{kayıp(max)}$: Hat üzerindeki maksimum kayıp aktif ve reaktif gücü gösterir.

İletim hatları tarafından aktarılan artan güç akışı ile GÇYG(Güç) ve GÇYG(Kayıp) değerleri kademeli olarak artar ve 1'e ulaştığında gerilim çökmesi meydana gelir. Dolayısıyla, herhangi bir güç sistemi iletim hattı bu değere ulaşırsa, gerilimin çökmesini

tahmin etmek mümkündür. Bu nedenle, GÇYG indeksi 0 (yük koşulu yok) ile 1 (gerilim çökmesi) arasında değişir.

3.1.1.4. Hızlı Hat Kararlılık İndeksi

I. Musirin vd. [71] tarafından önerilen HHKİ, tek bir hat boyunca güç akışı kavramına dayanmaktadır. HHKİ, güç sisteminin herhangi bir iletim hattı için hesaplanabilir ve reaktif güce bağlı bir indekstir. I'e en yakın indeks değerini veren hat, iletim hattının en kritik hattı olacak ve tüm güç sistemi gerilim kararsızlığına girecektir. Hesaplanan HHKİ, sistemdeki en zayıf barayı belirlemek için de kullanılabilir [72]. Güç sistemindeki en kritik bara, hesaplanan en küçük maksimum yüke sahip baraya karşılık gelir. HHKİ eşitlik (3.12) yardımıyla elde edilir:

$$HHKİ_{ij} = \frac{4 \cdot Z^2 \cdot Q_j}{V_i^2 \cdot X} \quad (3.12)$$

Burada; i ; gönderici bara, j ; alıcı bara olarak kabul edilir.

Ayrıca;

Z : Hat empedansını,

X : Hat reaktansını,

Q_j : Son alıcı reaktif gücünü,

V_i : İlk gönderici gerilimini göstermektedir.

3.1.1.5. L-İndeks

Kessel ve arkadaşları [73], güç akış denklemlerinin çözümüne dayanan bir gerilim kararlılık indeksi geliştirdiler. L-indeksi olarak bilinen bu kararlılık indeksi, sistemin gerçek durumunun kararlılık sınırına olan uzaklığının kestirimi için nicel bir ölçüdür. Her yük için j bara tanımlanmıştır.

$$L_j = \left| 1 - \frac{\sum_{i \in \alpha_G} F_{ji} \cdot V_i}{V_j} \right| \quad (3.13)$$

L_j indeksi, bir güç sisteminin gerilim çökmesinin yakınlığını gösterir. j . bara için hesaplanan L -indeksi değerinin 1 veya 1'e yakın olması j . baradaki gerilimin çöktüğü anlamına gelir. Bu nedenle tüm sistem için eşitlik 3.7'de verilen bir global L indeksi verilir:

$$L = \max_{j \in \alpha_L} \{L_j\} \quad (3.14)$$

α_L ve α_G sırasıyla, yük ve generatör bara kümesidir. V_i ve V_j gerilim fazörleridir ve F_{ji} 'nin elemanları şebeke için $[Y_{BARA}]$ matrisinden hesaplanır. L -indeksi 0 (yüksüz) ve 1 (gerilim çökmesi) arasında değişir.

3.2. Dinamik Gerilim Kararlılığı Analizi

Dinamik gerilim kararlılığı analizleri, kısıtlılık analizi olarak da bilinmekte olup, sistemde oluşacak herhangi bir bozunumda, geçici durumunda sistemin cevabını belirlemek için kullanılmaktadır. Bu analizde temel amaç, sistemi gerilim kararlılığı yönünden kararsızlığa sebep olacak dinamik etkileri belirlemektir [74]. Güç sistemleri yükler, generatörler ve kompanzasyon sistemleri gibi birçok dinamik elemandan oluşmakta olup, dinamik analiz için bu dinamik yapının matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir. Gerilim kararlılığı doğası gereği dinamik bir problem olup, dinamik gerilim kararlılığı analizi sistem tam olarak modellendiğinde gerilim kararsızlığına neden olan sebepleri doğru tespit için kullanılır. İdeal dinamik bir benzetim sistemde arıza sonrasında sistemin gidişatını, yönünü ortaya koyar. Bundan dolayı arıza sonrası analizler ve koruma-kontrol sistemlerinin koordinasyonu için dinamik analizler çok önemlidir. Dinamik gerilim kararlılığı analizi gerilim kararsızlığına neden olan olaylar ve olayların sıralamasının benzetimi ile gerçekleştirilir. [75].

3.3. Bara Çeşitleri

Güç sistemi analizlerinde, sistemdeki baraların her biri P , Q , V , δ değişkenlerine göre tanımlanmaktadır. Genel olarak üç tip bara vardır. Bunlar;

1. Salınım barası,
2. Yük barası (PQ barası),
3. Üretim barasıdır (PV barası).

3.3.1. Salınım Barası

Salınım barası referans barası olarak da bilinir. Bu tip baralarda gerilim genliği (V) ve gerilim açısı (δ) biliniyorken, güç akış analizleri ile aktif güç (P) ve reaktif güç (Q) bulunması gereken değişkenlerdir. Salınım barasının yük akış analizlerinde;

- ✓ Sistemin referansı,
- ✓ Sistemin aktif güç ve reaktif güç açısından dengeleyicisi olarak iki temel fonksiyonu vardır.

Güç sistemlerinde genellikle açısal referans olarak kabul edilen bara salınım barası olup, 1 numaralı bara olarak adlandırılabilir. Bu baranın açısı 0° 'dir.

3.3.2. Yük Barası

Yük barası PQ barası olarak da bilinir. Bu baralarda aktif güç (P) ve reaktif güç (Q) değerleri biliniyorken, gerilim genliği (V) ve gerilim açısı (δ) bulunması gereken değişkenlerdir. Güç sistemleri yük akış analizlerinde modellemelerde genel olarak yük baraları PQ barası olarak tanımlanır.

3.3.3. Üretim Barası

Generatör barası PV barası olarak da bilinir. Bu tip baralarda aktif güç (P) ve gerilim genliği (V) biliniyorken, güç akış analizleri ile reaktif güç (Q) ve gerilim açısı (δ) bulunması gereken değişkenlerdir. Güç sistemleri analizlerinde modellemelerde genel olarak generatör baraları PV barası olarak tanımlanırken senkron bir kondenserin bağlı olduğu baralar da PV barası olarak tanımlanır. Bu bara tipinde gerilimin sabit veya kontrol edilebilmesinde bu baradaki reaktif güç limitleri kullanılır.

3.4. Yük Akış Analiz Metotları

Yük akış analiz metotları, bir güç sistemine uygulanan sayısal analizi içeren önemli metotlardır. Bir elektrik güç sisteminin sürekli hal çalışmasını belirlemek için yük akış analizleri yapılır. Her besleyicideki gerilim düşmesini, her baradaki gerilimi ve tüm bara ve besleyici devrelerindeki güç akışını hesaplar. Çeşitli gerilim koşullarında sistem gerilimlerinin belirtilen sınırlar dâhilinde kalıp kalmayacağını ve transformatör ve iletim hatları gibi ekipmanların aşırı yüklenip yüklenmediğini belirler. Sistem gerilimlerini belirtilen sınırlar içinde tutmak için ek üretim, kapasitif veya endüktif destek ihtiyacını veya kapasitörlerin veya reaktörlerin yerleştirilmesinin belirlenmesi için kullanılır. Her baradaki kayıpları ve toplam sistem güç kayıplarını da hesaplamaktadır. Yük akış analizleri gelecekteki güç sistemlerinin planlanmasının yanı sıra, mevcut bir sistemin planlanması, ekonomik zamanlaması ve kontrolü için de gereklidir.

Güç-akış denklemlerini çözmek için çeşitli sayısal metotlar vardır. Bunlardan en yaygın kullanılanlar;

- Gauss-Seidel (G-S) metodu,
- Newton-Raphson (N-R) metodu,
- Hızlı Ayrık metodudur [76,77].

3.4.1. Gauss-Seidel Metodu

Gauss-Seidel yöntemi, bir dizi doğrusal olmayan cebirsel denklem çözmek için kullanılır. Bu tekrarlamalı bir yöntemdir ve bir çözüm vektörünün varsayımıyla başlar. Varsayım, pratik hususlar göz önüne alınarak yapılır. Bir değişkenin revize edilmiş değeri, eşitlik (3.15)'te bulunan çözüm vektörünün mevcut değişkenlerindeki denklemlerden birinin yerine bırakılarak elde edilir.

$$P_i = |V_i| \sum_{k=1}^n |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (3.15)$$

Ardından, çözüm vektörü yeni revize edilmiş P_i, V_i, V_k, Y_{ik} değişkenleri güncellenir. Bu işlem bir vektörde çözüm vektöründeki tüm değişkenler için yapılır. Tekrarlamalar, çözüm vektörünün belirli bir doğruluk derecesi elde edilene kadar devam eder.

Gauss-Seidel yöntemi, doğrusal olmayan denklemleri çözmek için kullanımı açısından oldukça basittir, ayrıca bir sonraki yinelemeye gitmek için önceki yinelemelerden veri depolamak gerekli değildir. Diğer taraftan, bu yöntem, çözüm vektörünün ilk varsayımına karşı çok hassastır, bu nedenle yakınsama hızı, çözüm vektörünün gerçek çözümü ile olan yakınlığına bağlıdır. Varsayımın yanlış olduğu bazı durumlarda, yöntem yakınsak kalmayabilir [78-80].

Bu yöntemin güç sistemine uygulanması aşağıdaki gibidir:

1. Öncelikle tüm baralarda yük talebi (P_{di} ve Q_{di}) elde edilir, daha sonra ilgili kısıtlamaları göz önünde bulundurarak aktif ve reaktif güç üretimi (P_{gi} ve Q_{gi}) tüm üretim baralarından elde edilir ve en büyük üretim barası referans olarak seçilir. Bu referans barası, bu baralardaki aktif ve reaktif güç üretiminin tekrarlamalar sırasında değişmesine izin verilir.
2. Bara giriş matrisi Y_{bara} , mevcut hat ve şönt giriş baralarıyla birleştirilir.

3. Tekrarlamalı işleme başlamak için sabit bir gerilim başlangıcı varsayılır ve tüm baralar, $1\angle 0^\circ$ gerilim büyüklüğüne ve açısına ayarlanır. Daha sonra, her baradaki gerilim değerleri, denklem 1'in yeniden düzenlenmiş bir versiyonuyla yeniden hesaplanır ve tekrarlamalar kabul edilebilir bir doğruluk elde edilene kadar devam eder.

$$V_i^{p+1} - V_i^p < \varepsilon \quad (3.16)$$

ε : Tahmini olarak verilmiş minimum değerdir.

4. Tüm baralardaki gerilim değerleri bilindikten sonra, salınım barasının aktif ve reaktif güç değerleri elde edilir.
5. İşlemin son basamağı, bilinen gerilim değerleri ile birlikte hat ve şönt giriş verilerini kullanarak sistemin kayıplarının hesaplanmasını içerir.

Bu adımlar, her baranın aktif ve reaktif güç talebi ve tüketimi varsayımıyla başladığı için, yük barası (PQ) için tüm parametreleri elde etme yöntemini açıklar.

3.4.2. Newton-Raphson Metodu

Yük akış sistemlerinin incelenmesi ve tasarımı için bir bilgisayar programına ihtiyaç duyulur (üretim, yük, MVAR, MW, kayıplar). Newton-Raphson yöntemi, temel durum yük akışını azaltmak için benimsenmiştir. Newton- Raphson yöntemi yük akış denklemlerinin çözümüne uygulamak için, bara gerilimlerini ve hat girişi kutupsal biçimde ifade edilir. Newton-Raphson yük akışında, güç dengesini sağlayan sistemdeki her baradaki gerilim büyüklüğünü ve açısını hesaplamak için Newton-Raphson metodu kullanılır. Tüm baralarda ΔP ve ΔQ uyumsuzlukları belirtilen toleranslar içine girinceye kadar güç akışı denklemlerinin kutupsal şeklini çözer. [81,82].

Newton-Raphson metodunun avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- İlk tahmin, bir çözüme yakın olduğu sürece hızlı yakınsama,
- Geniş bir yakınsama bölgesi,

- Çözümeye yaklaştığında hatanın oldukça hızlı bir şekilde azalmasıdır.

Newton-Raphson metodunun dezavantajları ise:

- Her yineleme, bir Gauss-Seidel yinelemesinden çok daha uzun sürmesi,
- Özellikle seyrek matris algoritmaları kullanırken daha karmaşık kodların uygulanması sayılabilir.

Newton-Raphson metodu, iki veya daha fazla değişkenli fonksiyonların Taylor serisine açılımına ve Taylor serisi açılımında 1. dereceden büyük olan kısmi türevlerin ihmal edilmesine dayanır. n baralı bir güç sisteminde yük baralarına ait aktif ve reaktif güç değerleri aşağıdaki gibi olacaktır [83].

$$P_i = |V_i| \sum_{k=1}^n |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (3.17)$$

$$Q_i = -|V_i| \sum_{k=1}^n |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (3.18)$$

Eşitlik (3.17) ve (3.18)'in Taylor serisine açılımı yapılır ve yüksek mertebeden kısmi türevler ihmal edilirse eşitlik (3.19) ve (3.20) bulunur. Bu eşitliklerde, Jacobian matrisi aktif ve reaktif güç değerlerindeki küçük değişimler ile gerilim-açı arasındaki değişimleri göstermektedir. $\Delta\delta_{i(k)}$ ve $\Delta|V_{i(k)}|$ 'deki değişimlerin kısmi türevi ise aktif ve reaktif güçteki değişimleri ifade eder. Ayrıca, 1 numaralı bara salınım barası olarak varsayılır ve salınım barasının gerilim ve açısı dâhil edilmez.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2|^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(k)} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Gerilim kontrollü baralar için gerilimin büyüklüğü bilinmektedir. Dolayısıyla, n baralı bir güç sisteminde gerilim kontrollü bara sayısı m ise, $n-1$ adet aktif güç ve $n-1-m$ adet reaktif güç eşitliği yazılabilir. Bu durumda, Jacobian matrisi $(2*n-2-m) \times (2*n-2-m)$ boyutundadır. Eşitlik (3.21) ve (3.22)'deki $\Delta P_{i(k)}$ ve $\Delta Q_{i(k)}$ terimleri hesaplanan değerler ile tahmin değerleri arasındaki farktır. Baralardaki gerilimlerin yeni değerleri ise Eşitlik (3.23) ve (3.24)'te verilmiştir [84]:

$$\Delta P_{i(k)} = P_i^{(tahmin)} - P_i^{(k)} \quad (3.21)$$

$$\Delta Q_{i(k)} = Q_i^{(tahmin)} - Q_i^{(k)} \quad (3.22)$$

$$|\delta_i^{(k+1)}| = |\delta_i^{(k)}| - \Delta |\delta_i^{(k)}| \quad (3.23)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| - \Delta |V_i^{(k)}| \quad (3.24)$$

3.4.3. Hızlı Ayrık Metot

İletim güç sistemlerinde, gerilim faz açısı ve aktif güç ($\delta-P$) ile gerilim büyüklüğü ve reaktif güç ($V-Q$) arasında daima karşılıklı bir ilişki vardır. Bu nedenle, $\delta-P$ ve $V-Q$ arasındaki bağlantı zayıftır ve yük akış problemini daha basit hale getirmek, işlem yazılımı üzerindeki hesaplama yükünü azaltmak için kullanılabilir.

Bu metotta, $\delta-P$ ve $V-Q$ problemlerini ayrı ayrı çözerek yapılabilir, yani değişkenler için iki küçük alt matematiği vardır ve bu ayrıştırılmış yük akış yöntemlerinin temelidir. Newton-Raphson yönteminde formüle edilen Jacobian elemanlarının elimine edilmesiyle basitleştirilmiştir ve genellikle bu şekilde elimine edilen elemanların yarısı kadardır. Bu, çözümün gerçek yakınsamasını etkileyebilir ancak çözüm doğruluğu ile azaltılmış hesaplama yükü arasında kabul edilebilir olan bir denge vardır [78, 79].

4. YAPAY SİNİR AĞLARI

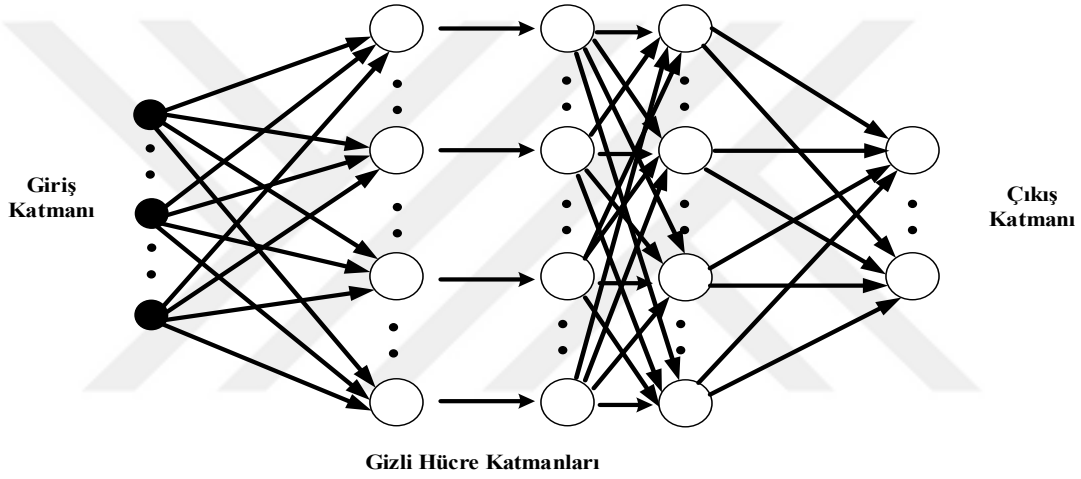
YSA, insan beyninin öğrenme, çözümleme, regresyon analizi gibi yeteneklerinin, matematiksel yapıya aktarılmasını amaçlayan sistemlerdir. YSA ile insan beyninin matematiksel olarak modellenmesi amaçlanmıştır. İnsan beyninin temel birimi olan hücrelerin kavramsal bir yapı halinde modellenmesiyle YSA çalışmaları başlamıştır. Bilgisayar teknolojisindeki işlemcilerin hızı, insan beyninden yaklaşık 10^6 kat daha hızlı olmasına rağmen YSA'lar insan beyninin işlevselliğinin çok altındadır. YSA; kendi kendini geliştirebilme, sabit kaynak tüketimi, işlevsellik ve karar hızı bakımından verimli olması yönüyle karmaşık problemleri çözebilme yeteneği sonucu, sınıflandırma, tahmin, kontrol sistemleri, optimizasyon ve karar verme, şablon tanıma, gruplama, regresyon ve genelleme gibi birçok alanda uygulama alanı bulmaktadır [85]. YSA, güç sistemlerinde de uygulanmaktadır. Yük tahmini [86], arıza analizi [87], sistem tanımlama [88], işletme, koruma ve gözlemlleme [89], YSA' nın kullanıldığı bazı uygulamalarıdır. YSA enerji iletim hatlarında meydana gelen arızaların analizinde de kullanılmaktadır. Bu arıza konularından bazıları ise; arıza konumlandırma, yüksek empedanslı arızalar, seri kompanzasyonlu iletim hatlarında koruma, arıza tipi sınıflandırma vs. olarak sınıflandırılabilir.

YSA ağ topolojilerine göre ileri ve geri beslemeli olmak üzere iki grupta incelenmektedir [91]. İleri beslemeli ağ topolojisinde giriş ve çıkış değerleri arasında bir döngü olmazken, geri beslemeli ağ yapısında çıkış değerleri ikinci döngüde ağın eğitime tekrar sunulur. Bu şekilde başlangıçta rastgele belirlenen ağırlık değerleri geri besleme sayesinde istenen en yakın ağırlık katsayısına en kısa zamanda ve en az iterasyon işlemiyle ulaşılmış olur. YSA eğitimi aşamasında değişik öğrenme algoritmaları kullanılmaktadır. 1986 yılında Rumelhart ve McClelland, çok katmanlı algılayıcı ağların eğitimi için geri yayılım algoritmasını geliştirmişlerdir [90]. Geri yayılım algoritmasının temelinde ağdan beklenen çıkış değeri ile hesaplanan çıkış değeri arasındaki hata değeri ağırlıklara eşit oranda yansıtılarak yeniden eğitilmesi prensibi yatmaktadır.

YSA'nın eğitim süreci içinde bahsedilmesi gereken diğer konu başlıkları ise veri kümelerinin normalizasyonu ve ağırlık değerlerinin optimizasyonudur. Ayrık değerlere sahip veri kümelerinin belirli bir değer aralığında normalizasyonu sayesinde YSA' nın veriler arasında daha mantıklı bağlantılar kurması sağlanmış olur. Ağırlık değerlerinin optimizasyonu ise eğitim sürecinin başlangıcında rastgele seçilen ağırlık katsayı değerlerinin

geri yayılım sonunda yerel minimumlara takılmasını engellemek için kullanılmaktadır. Uygulamada ağırlık değerlerinin optimizasyonu için kullanılan dört farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlar; eğim düşümü, eşlenik gradyan, quasinewton ve Levenberg-Marquardt' dır [92].

Çok katmanlı ileri beslemeli geri yayılımlı sinir ağının şematik gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1'den görüleceği gibi bu sinir ağı; giriş katmanı, gizli hücre katmanlar (ara katman) ve çıkış katmanı olarak üç katmandan oluşur. Sinir ağının girişine verilen girdiler kullanılarak ağı çıkışı ileriye doğru hesaplanır.

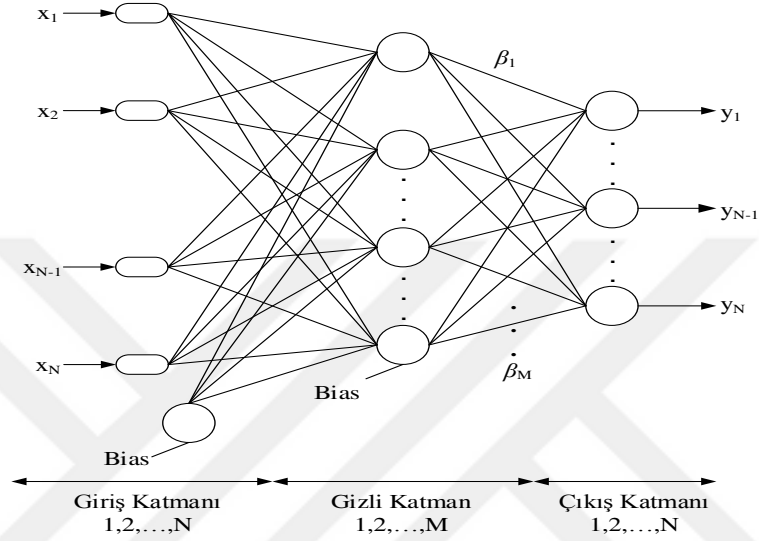


Şekil 4.1: Çok katmanlı ileri beslemeli YSA modeli

4.1. Uç Öğrenme Makinesi

UÖM, tek gizli katmanlı ileri beslemeli YSA'lar için geliştirilmiş bir öğrenme algoritmasıdır [17-96]. UÖM sisteminde, gradyan tabanlı öğrenme algoritmalarından farklı olarak giriş ağırlıkları ve eşik değerleri rastgele atanır ve çıkış ağırlıkları matematiksel olarak hesaplanır [96]. İleri beslemeli normal bir YSA'da sinir ağının eğitilmesi tekrarlamayı gerektirirken, bu tekrarlı durum UÖM'de matematiksel bir denkleme dönüştürülmüştür. Bu nedenle, UÖM hızlı öğrenebilme kabiliyetinin yanında geleneksel geri yayılım algoritması ile öğrenen ileri beslemeli sinir ağlarına göre daha iyi genelleme başarımına sahiptir [93, 100]. Ayrıca, UÖM'de çıkış ağırlıkları genelleştirilmiş ters Moore-Penrose matrisi ile hesaplandığından, yerel minimuma takılma veya optimum öğrenme parametre belirlenmesi gibi performansı direk etkileyen problemleri yoktur [97-98]. Fakat UÖM sinir ağı dataların dağılımına göre transfer fonksiyonu, gradyan tabanlı öğrenme algoritmalarında olduğu gibi

belirlenmesi için birçok deneme gerektirmektedir. UÖM gradyan tabanlı işlem kümelerinden farklı bir şekilde sürekli olmayan veya kesikli aktivasyon fonksiyonlarını da kullanabilmektedir [99]. Şekil 4.2’de UÖM ile eğitilen tek gizli katmanlı ağ yapısı gösterilmiştir:



Şekil 4.2: Tek gizli katmanlı sinir ağı yapısı [17].

Burada, x_N ve y_N sırası ile giriş ve çıkışları göstermektedir. Girişler $x_N = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \in \mathbb{R}^N$ matrisi, çıkışlar ise $y_N = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T \in \mathbb{R}^N$ matrisleri ile ifade edilir. Ara katmanda M tane sinir hücresi içeren standart bir ağın çıkışı matematiksel olarak eşitlik (4.1)’deki gibi yazılabilir [100].

$$\sum_{i=1}^M \beta_i g(w_i \cdot x_j + b_i) = t_j \quad j = 1, \dots, N \quad (4.1)$$

Burada $w_i = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$; i. gizli sinir hücresine ve giriş sinir hücresine bağlı olan giriş ağırlık vektörünü, $\beta_i = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M]^T$; i. gizli sinir hücresine ve çıkış sinir hücrelerine bağlı olan çıkış ağırlık vektörünü, $g(\cdot)$; gizli katmanda kullanılan aktivasyon fonksiyonunu, b_j ise i. gizli sinir hücresinin bias değerini gösterir. $w_i \cdot x_j$ ise w_i ve x_j ’nin noktasal çarpımını belirtir.

$t_j = [t_1, t_2, \dots, t_j]^T$ ise UÖM ağının beklenen ya da olması istenen çıkışı olmak üzere, N tane gizli sinir hücresine ve $g(\cdot)$ aktivasyon fonksiyonuna sahip standart tek gizli katmanlı ileri beslemeli ağ yapısında hedef değer t_j ile ağın çıkış değeri y_j birbirine eşit olursa hata sıfır olur. Yani, $\sum_{j=1}^N \|t_j - y_j\| = 0$ 'ı sağlayacak çıkış ağırlıkları vardır. Bu durumda t_j hedefler değeri y_j ağın gerçek çıkışına eşitlenirse:

$$\sum_{i=1}^M \beta_i g(w_i \cdot x_j + b_i) = y_j \quad j = 1, \dots, N \quad (4.2)$$

elde edilir [17]. Eğer eşitlik (4.2)'de $H = g(w_i \cdot x_j + b_i)$ olarak ifade edilirse eşitlik (4.3) yazılabilir.

$$y = H \cdot \beta \quad (4.3)$$

Eşitlik (4.3)'teki H matrisi eşitlik (4.4) verilmiştir.

$$H = \begin{bmatrix} g(w_1 \cdot x_1 + b_1) & \cdots & g(w_N \cdot x_1 + b_N) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ g(w_1 \cdot x_M + b_1) & \cdots & g(w_N \cdot x_M + b_N) \end{bmatrix}_{N \times M} \quad (4.4)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_M \end{bmatrix}_{M \times 1} ; y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (4.5)$$

Bu durumda, w_i giriş katmanı ağırlıkları ve b_i gizli katman bias değerleri rastgele seçilerek H analitik olarak hesaplanır. Geleneksel tek gizli katmanlı ileri beslemeli ağlarda ağın eğitilmesi gerekirken UÖM'de eşitlik (4.3)'te belirtilen doğrusal bir denklemin tek seferde çözülmesiyle eğitim tamamlanır. Çıkış ağırlıkları olan β değerleri eşitlik (4.6)'de çözülerek elde edilir:

$$\beta = H^+ \cdot y \quad (4.6)$$

Burada β , eşitlik (4.6) çözülerek elde edilir. Yukarıdaki denklemde; H^+ , H çıkış matrisinin genelleştirilmiş tersi "Moore-Penrose matrisi olarak tanımlanmıştır [17].

Tek katmanlı ileri beslemeli bir ağı eğitebilmek için spesifik $\hat{w}_i, \hat{b}_i, \hat{\beta}_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, \tilde{N}$) değerlerini belirlemek gerekmektedir [17]. UÖM yönteminde gizli katman ile çıkış katmanı arasında elde edilen H matrisinin giriş ağırlıkları (w_i) ve eşik değerleri (b_i) başlangıçta

rastgele seçilmektedir. Burada seçilen sabit w_i ve b_i değerleri kullanılarak tek katmanlı sinir ağının eğitimi aynı zamanda $y = H.\beta$ doğrusal denklemindeki $\hat{\beta}$ değerinin en küçük kareler çözümlerini bulmakla aynı anlama gelmektedir. Ağın eğitiminde kullanılan bu en küçük karesel çözümler aynı zamanda eğim düşümü ve geri yayılım algoritmasını kullanan klasik tek katmanlı ileri beslemeli ağların öğrenme oranlarını (η) elde etmekte kullanılmaktadır.

En küçük kareler çözümleri ifade eden değer fonksiyonu (E)'nin matematiksel gösterimi eşitlik (4.7)'de verilmiştir.

$$E = \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^{\tilde{N}} \beta_i g(w_i x_j + b_i) - t_j \right)^2 \quad (4.7)$$

Eğim düşümü yöntemini kullanan sinir ağlarında H bilinmeyenini genellikle $\|H\beta - y\|$ denkleminin minimum değerinin bulunmasıyla elde edilebilmektedir. En küçük değere indirgeme işlem basamakları ise ağırlık vektörlerinin (w_i, β_i) ve eşik değeri (b_i) kümesini ifade eden W vektörünün iteratif olarak hesaplanmasıyla sağlanmaktadır. W vektörünün matematiksel gösterimi eşitlik (4.8)'de verilmiştir:

$$W_k = W_{k-1} - \eta \frac{\partial E(W)}{\partial E} \quad (4.8)$$

Bu denklemde yer alan η değeri öğrenme oranını ifade etmektedir. UÖM yönteminde klasik ileri beslemeli ağ yapılarından farklı olarak başlangıçta belirlenen w_i ve b_i değerleri rastgele seçildikten sonra gizli ara katman ile çıkış katmanı arasında elde edilen H matrisi elde edilmektedir [101, 102]. UÖM yönteminde de tıpkı klasik ileri beslemeli geri yayımlı ağlarda olduğu gibi $\hat{\beta}_i$ 'nin en küçük kareler çözümü ağın eğitimi için geçerlidir. En küçük değere indirgeme işlem basamağı matematiksel olarak eşitlik (4.9)'da gösterildiği şekilde yazılabilir:

$$\|H(w_1, \dots, w_{\tilde{N}}, b_1, \dots, b_{\tilde{N}})\tilde{\beta} - y\| = \min_{\beta} \|H(w_1, \dots, w_{\tilde{N}}, b_1, \dots, b_{\tilde{N}})\tilde{\beta} - y\| \quad (4.9)$$

Ara katman sayısının ($\tilde{N}$) eğitim için kullanılan ayırık örnek sayısı (N)'e eşit olması durumunda ($N = \tilde{N}$), H matrisi kare matristir ve tersi alınabilir. Böylelikle giriş ağırlık vektörleri (w_i) ve eşik değerler (b_i) rastgele seçilebilir ve eğitilen ileri beslemeli ağ örnekleri sıfır hatayla belirleyebilmektedir [17].

Ancak çoğu durumda ara katman sayısı ayırık örnek sayısından oldukça küçük ($\tilde{N} \ll N$), olduğu için H kare matris olmaz ve $y = H \cdot \beta$ gibi bir eşitlikten yararlanılarak $\hat{w}_i, \hat{b}_i, \hat{\beta}_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, \tilde{N}$) değerleri elde edilemez. Bu problemi aşmak için Huang, UÖM yönteminde genelleştirilmiş Moore-Penrose ters matris dönüşümünü kullanarak $y = H \cdot \beta$ denklemini yeniden düzenlemiştir. Doğrusal olmayan $y = H \cdot \beta$ matrisinin ters dönüşüm işlem basamağı eşitlik (4.10)'da verilmiştir:

$$\hat{\beta} = H^+ \cdot y \quad (4.10)$$

Eşitlik (4.10)'da ifade edilen $\hat{\beta} = H^+ \cdot y$ ifadesi aynı zamanda genelleştirilmiş $y = H \cdot \beta$ doğrusal sistemin en küçük kareler çözümünün bir tanesidir. Diğer bir ifadeyle en düşük öğrenme hatası bu özel çözüm sayesinde elde edilebilmektedir. Minimum eğitim hatası formülü matematiksel olarak eşitlik (4.11)'de verilmiştir.

$$\|H\hat{\beta} - y\| = \|HH^+ \cdot y - y\| = \min_{\beta} \|H\beta - y\| \quad (4.11)$$

Böylelikle tek katmanlı ileri beslemeli ağı gelişmiş bir versiyonu olan UÖM yöntemi 3 işlem basamağı kullanılarak uygulanmaktadır [17].

Verilen herhangi bir eğitim seti $\mathfrak{K} = ((x_i, t_i) | x_i \in R^n, t_i \in R^m, i = 1, 2, 3, \dots, N)$, aktivasyon fonksiyonu $g(x)$ ve gizli katman sayısı $\tilde{N}$ kabulleri yapılarak aşağıdaki maddelerde bu işlem basamakları sırasıyla açıklanmıştır.

- w_i ağırlık katsayılarının ve b_i ($i = 1, 2, 3, \dots, \tilde{N}$) eşik değerlerinin rastgele belirlenmesi.
- Gizli katman çıkış matrisi H 'ın hesaplanması.

- Çıkış ağırlıkları β değerleri belirlenerek ve $\beta = H^+.y$ denkleminde yerine yazılarak $y = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ değerlerinin hesaplanması.

4.1.1 UÖM’de Uygulanan Değerlendirme Yöntemi ve Ölçütleri

Yapay zeka algoritmalarının performans değerlerinin ölçülebilir bir ifade ile tanımlanması başarımlarının karşılaştırılması açısından önemlidir. UÖM algoritması değerlendirme yöntemi iki farklı şekilde yapılabilir. Bunlar, kullanılan algoritmanın performansına etki eden birinci ölçüt olan veri setinin eğitim ve test verisi olarak bölünmesi, ikincisi ise başarımlı ölçümleyen ifadelerin tanımlanmasıdır.

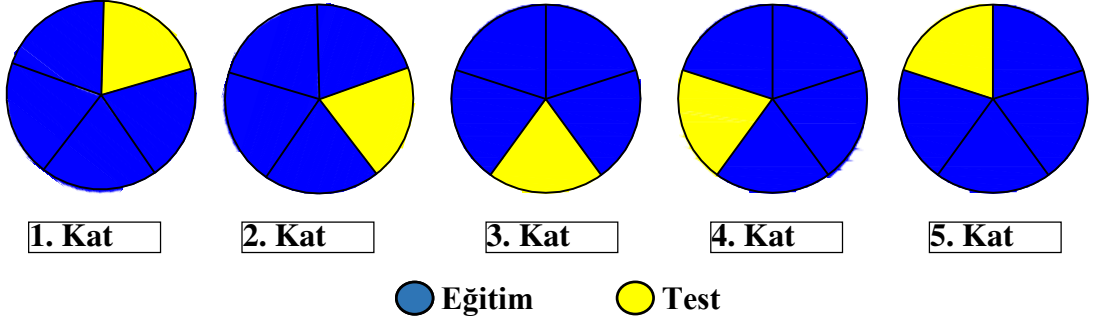
Birinci ölçüt: literatürde hold-out ve k-kat çapraz doğrulama gibi çeşitli veri bölme, performans değerlendirme yöntemleri bulunmaktadır [103,104]. Veri setini eğitim ve test olarak ayırırken aşağıdaki maddeler dikkate alınmalıdır:

- Eğitim veri setindeki örnekler, sayıca test veri setindeki örneklerden fazla olmalıdır.
- Eğitim ve test veri seti ayrımında örneklerin rastgele dağılmaktadır.
- Veri setinin eğitim ve test veri seti olarak bölünmesi sırasında hedef niteliğine ait sınıfın eğitim ve test veri setlerindeki dağılımında hedefe ait verileri içermelidir.

Hold-out yönteminde veri seti eğitim ve test verisi olarak, iki eş olmayan parçaya ayrılır. Bu yöntemin bir diğer çalışma şekli ise tekrarlı kullanımdır.

K-kat çapraz doğrulama yöntemi, çok parametrelili bir modelin parametre değişimine göre başarımlı ölçmek ve kıyaslamak amacıyla kullanılabilen etkili bir yöntemdir [105]. Burada kullanılan k–kat çapraz doğrulama işleminde, tüm veri seti k eşit parçaya ayrılır. Eşit sayıda veri içeren her k parçası döngüye alınır ve her döngüde bir k parçası test verisi olarak, geriye kalan $(k-1)$ tanesi de eğitim verisi olarak işleme alınır. k adet döngü sonunda her döngü için birer adet olmak üzere k kadar başarımlı değeri ya da hata değeri elde edilmiş olur. Modelin genel başarımlı yorumlamak için bu değerlerin ortalaması alınır ve tek bir başarımlı ya da hata değeri elde edilir. Farklı öğrenme algoritmalarının değerlendirilmesinde, k kat işlem sonucunda elde edilen başarımlı dizisinin standart sapma değeri incelenerek de yorumlamalar yapılmaktadır [106].

Şekil 4.3’te 5–kat çapraz doğrulama örneğine ait bir gösterim verilmiştir. k değeri sayısı 5 olduğu için bu sayıda döngü ile tekrarlı olarak çalıştırılır. Bu yöntemin tek dezavantajı da k sayısı kadar döngü ile tekrar eden işleme ihtiyaç duyuyor olunmasıdır.



Şekil 4.3: 5-Kat çapraz doğrulama yöntemine ait örnek anlatım

Şekil 5.1: IEEE 14-baralı güç sisteminin tek hat şeması

Tablo 5.1’de IEEE 14-baralı güç sistemine ait birim değer (pu) cinsinden iletim hattı parametreleri; Tablo 5.2’de IEEE 14-baralı güç sisteminin baralarına ait parametre değerleri pu cinsinden verilmiştir.

Tablo 5.1. IEEE 14-baralı güç sistemi için pu cinsinden iletim hattı parametreleri

Baradan	Baraya	Hattın Direnci Ohms/km	Hattın Reaktansı H/km	Hattın Suspektansı H/km
1	2	0.01938	0.05917	0.0264
1	5	0.05403	0.22304	0.0246
2	3	0.04699	0.19797	0.0219
2	4	0.05811	0.17632	0.0170
2	5	0.05695	0.17388	0.0173
3	4	0.06701	0.17103	0.0064
4	5	0.01335	0.04211	0.0
4	7	0.0	0.20912	0.0
4	9	0.0	0.55618	0.0
5	6	0.0	0.25202	0.0
6	11	0.09498	0.19890	0.0
6	12	0.12291	0.25581	0.0
6	13	0.06615	0.13027	0.0
7	8	0.0	0.17615	0.0
7	9	0.0	0.11001	0.0
9	10	0.03181	0.08450	0.0
9	14	0.12711	0.27038	0.0
10	11	0.08205	0.19207	0.0
12	13	0.22092	0.19988	0.0
13	14	0.17093	0.34802	0.0

Tablo 5.2’de yer alan; bara tipi 1 salınım barasını, bara tipi 2 üretim barasını ve bara tipi 3 ise yük barasını ifade etmektedir.

Tablo 5.2. IEEE 14-baralı güç sistemine ait pu cinsinden bara değerleri

Bara	Bara Tipi	Gerilim Genliği	Gerilim Faz Açısı	Üretim Barası Aktif Güç	Üretim Barası Reaktif Güç	Yük Barası Aktif Güç	Yük Barası Reaktif Güç
1	1	1.060	0	0	0	0	0
2	2	1.045	0	40	42.4	21.7	12.7
3	2	1.010	0	0	23.4	94.2	19.0
4	3	1.0	0	0	0	47.8	-3.9
5	3	1.0	0	0	0	7.6	1.6
6	2	1.070	0	0	12.2	11.2	7.5
7	3	1.0	0	0	0	0.0	0.0
8	2	1.090	0	0	17.4	0.0	0.0
9	3	1.0	0	0	0	29.5	16.6
10	3	1.0	0	0	0	9.0	5.8
11	3	1.0	0	0	0	3.5	1.8
12	3	1.0	0	0	0	6.1	1.6
13	3	1.0	0	0	0	13.5	5.8
14	3	1.0	0	0	0	14.9	5.0

5.2. IEEE 14-Baralı Güç Sisteminin UÖM Algoritmalarıyla Analizi

IEEE 14-baralı güç sisteminde gerilim kararlılığının farklı yük şartları için oluşturulan HKİ değerleri kullanılarak UÖM algoritmasının 5-kat çapraz doğrulama yöntemi ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla IEEE 14-baralı güç sistemi modeli Matlab'ta oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin yük akış analizi Newton-Raphson yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yük akış analizi yapılırken tüm baraların aktif ve reaktif güç değerleri 0.05 pu artırılarak her bir bara için 1000 adet aktif güç, reaktif güç, gerilim genliği ve gerilimin faz açısı elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan HKİ değerleri ile IEEE 14-baralı güç sisteminin en kritik hattı belirlenmiştir. Tablo 5.3'te baralar arası iletim hatlarına ait farklı güç artırımlarından elde edilen HKİ değerleri verilmiştir:

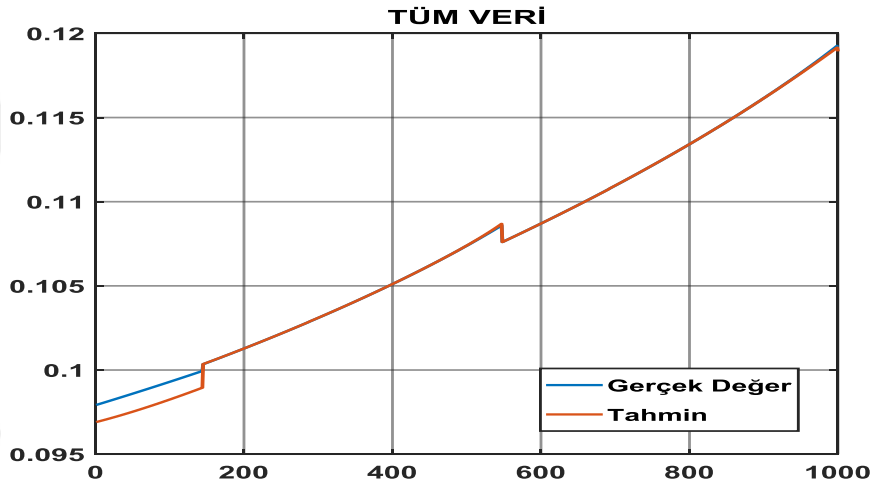
Tablo 5.3. İletim hatlarına ait farklı güç artırımlarından elde edilen HKİ değerleri

Baralar	1	2	3	4	5	6	7
1-2	0.0874	0.0884	0.2004	0.7605	0.8621	1.0154	1.2988
1-5	0.0149	0.0156	0.0253	0.0350	0.0447	0.0544	0.0641
2-3	0.0737	0.0738	0.1967	0.3196	0.4425	0.5654	0.1006
2-4	0.0299	0.0326	0.1536	0.2746	0.3956	0.5166	0.6376
2-5	0.0117	0.0122	0.1342	0.2562	0.3782	0.5002	0.6222
3-4	0.0291	0.0323	0.1518	0.2713	0.3908	0.5103	0.6298
4-5	0.0284	0.0316	0.1498	0.2680	0.3862	0.5044	0.6226
4-7	0.0010	0.0011	0.1634	0.7074	0.8205	1.001	1.3102
4-9	0.0348	0.0393	0.1245	0.6453	0.7604	1.0207	1.1233
5-6	0.0337	0.0344	0.1561	0.7653	0.8603	1.0074	1.2049
6-11	0.0154	0.0162	0.1387	0.2612	0.3837	0.5062	0.6287
6-12	0.0179	0.0217	0.1421	0.2625	0.3829	0.5033	0.6237
6-12	0.0335	0.0340	0.1547	0.2754	0.3961	0.5168	0.6375
7-8	0.0248	0.0293	0.1114	0.6757	0.5677	1.0177	1.1133
7-9	0.0437	0.0544	0.1676	0.7653	0.4604	1.0074	1.0144
9-10	0.0215	0.0216	0.1418	0.2620	0.3822	0.5024	0.6226
9-14	0.0634	0.0647	0.1941	0.3235	0.4529	0.5823	0.9917
10-11	0.0333	0.0601	0.1894	0.3187	0.4480	0.5773	0.9961
12-13	0.0929	0.0943	0.2175	0.7814	0.8846	1.1051	1.4159
13-14	0.0804	0.0807	0.2036	0.7653	0.8686	1.0275	1.3049

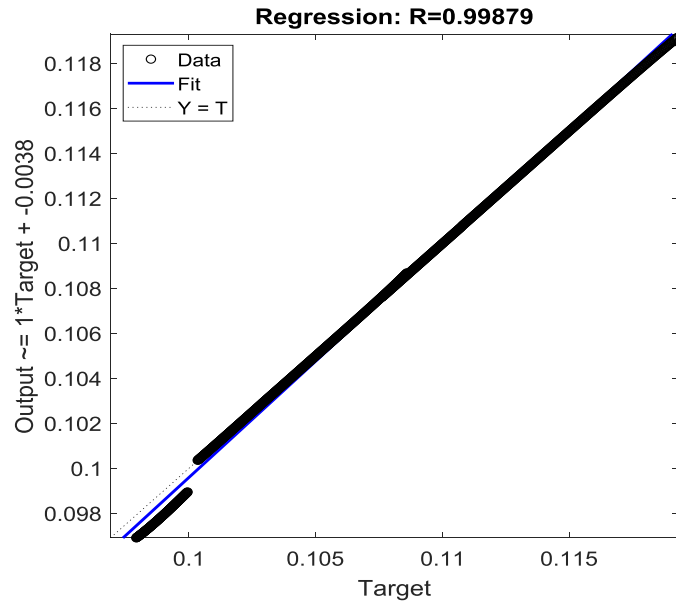
Tablo 5.3'ten, 12-13 nolu baralara ait iletim hattın güç artırımı yapıldıkça HKİ değeri diğer iletim hatlarından daha büyük ve 1'e en yakın olduğu için bu hat en kritik hat olarak belirlenmiştir. 12-13 nolu baralar ve bu baralara bağlı iletim hattı verileri UÖM algoritmasında giriş ve çıkış verileri olarak kullanılmıştır. UÖM algoritması için giriş parametreleri; ilk gönderici baranın gerilim genliği ve gerilim faz açısı; son alıcı baranın reaktif gücü ve gerilimin faz açısı ve çıkış parametresi olarak HKİ değerleri alındı. UÖM'nin tahmin edeceği hedef HKİ değerleridir. UÖM'nin başarımını etkileyen en önemli faktörler gizli katman hücre sayısı (GKHS) ve gizli katmanda kullanılan aktivasyon fonksiyon tipidir. Bu nedenle, UÖM algoritması farklı GKHS değerleri (20, 60 ve 100) ve gizli katmanda farklı tip aktivasyon fonksiyonları (radyal tabanlı, logaritmik sigmoid ve tanjant sigmoid) için test

edilerek bu parametrelerin en uygun değeri ve tipi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu parametreler kullanılarak UÖM'den elde edilen eğitim - test süreleri ve test doğruluğu (TD) ve hatanın kareleri ortalamasının karekökü (RMSE) parametreleri farklı tip aktivasyon fonksiyonu ve GKHS sayıları için verilmiştir.

UÖM algoritması, aktivasyon fonksiyonu için logaritmik sigmoid fonksiyonu ve GKHS için 20 seçildiğinde elde edilen tüm verilere ait gerçek değer ile tahmin değer eğrisi Şekil 5.2'de ve regresyon eğrisi Şekil 5.3'te verilmiştir:



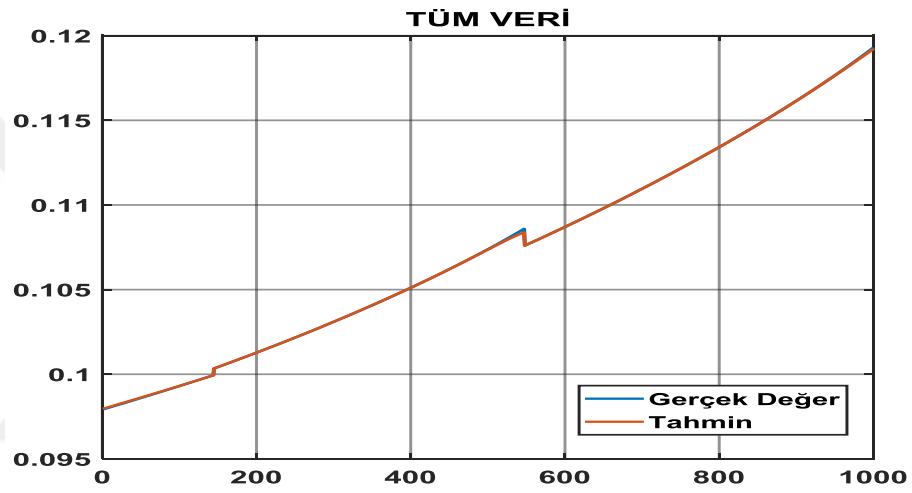
Şekil 5.2: GKHS 20 için UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi



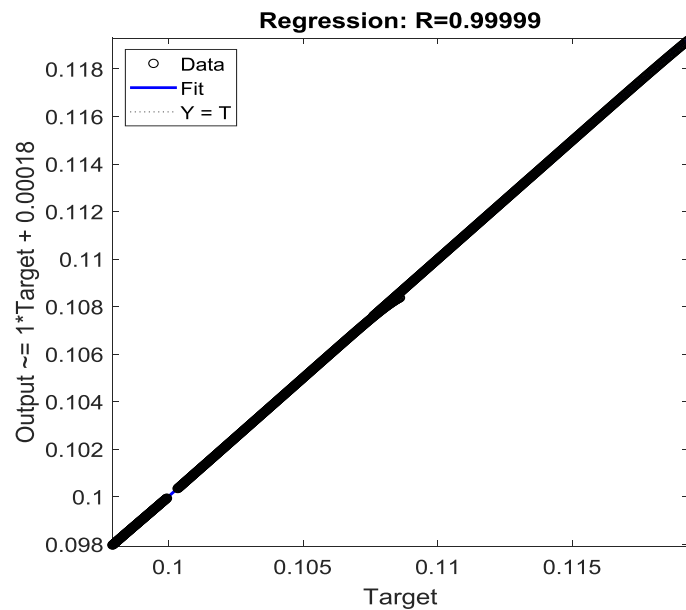
Şekil 5.3: GKHS 20 için UÖM'nin regresyon eğrisi

UÖM için seçilen logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonu ve GKHS 20 hücre sayısı algoritmasından; eğitim süresi 0.4836 sn'ye karşılık eğitim doğrulama yüzdesi %1.66 ve test süresi ise 0.0132 sn'ye karşılık test doğrulama yüzdesi %78.46 elde edilmiştir. RMSE değeri ise 0.37746'dır.

UÖM algoritması, aktivasyon fonksiyonu için logaritmik sigmoid fonksiyonu ve GKHS 60 seçildiğinde elde edilen tüm verilere ait gerçek değer ile tahmin değer eğrisi Şekil 5.4'te ve regresyon eğrisi Şekil 5.5'te verilmiştir:



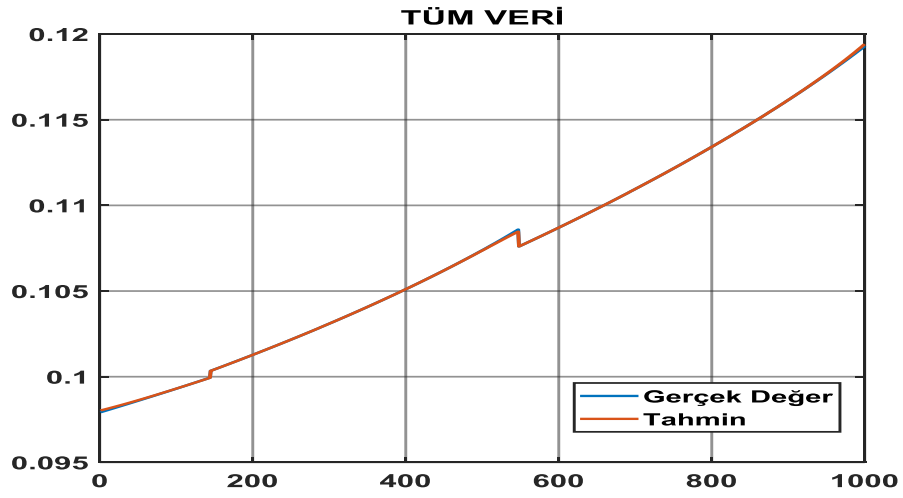
Şekil 5.4: GKHS 60 olan UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi



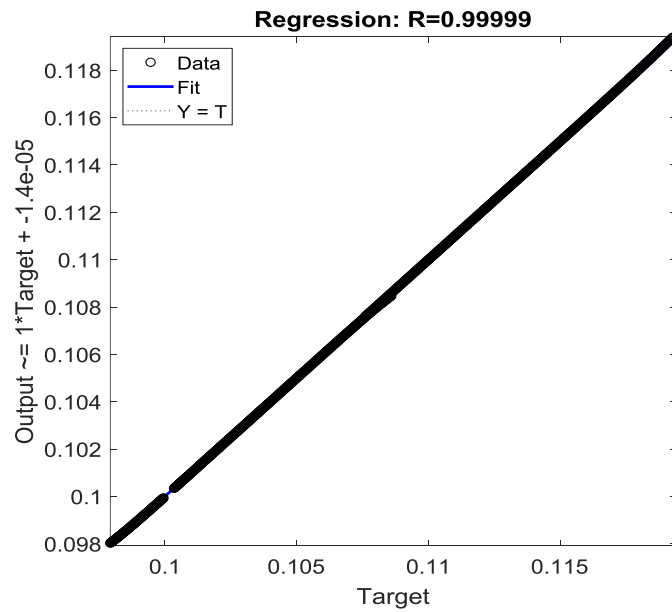
Şekil 5.5: GKHS 60 için UÖM'nin regresyon eğrisi

UÖM için seçilen logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonu ve 60 hücre sayısı algoritmasından; eğitim süresi 0.0468 sn'ye karşılık eğitim doğrulama yüzdesi %5.24 ve test süresi ise 0.0156 sn'ye karşılık test doğrulama yüzdesi %83.47 elde edilmiştir. RMSE değeri ise 0.22147'dir.

UÖM algoritması, aktivasyon fonksiyonu için logaritmik sigmoid fonksiyonu ve GKHS 100 seçildiğinde elde edilen tüm verilere ait gerçek değer ile tahmin değer eğrisi Şekil 5.6'da ve regresyon eğrisi Şekil 5.7'de verilmiştir:



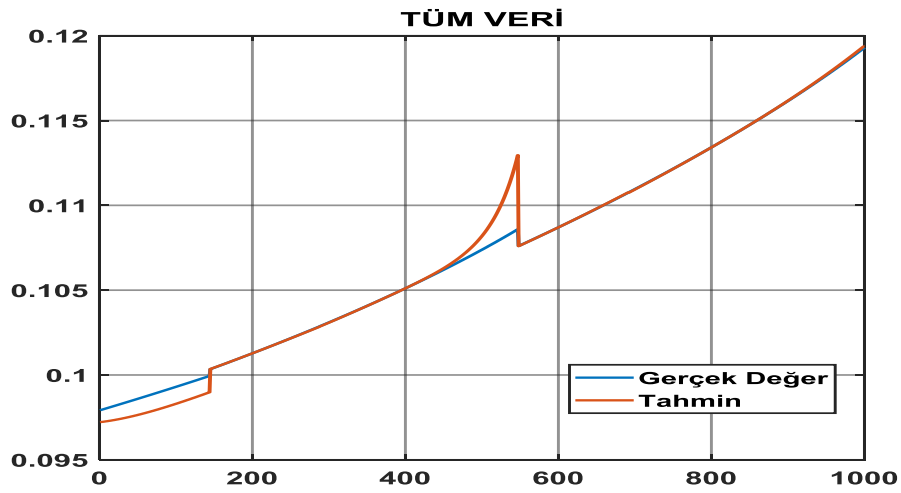
Şekil 5.6: GKHS 100 için UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi



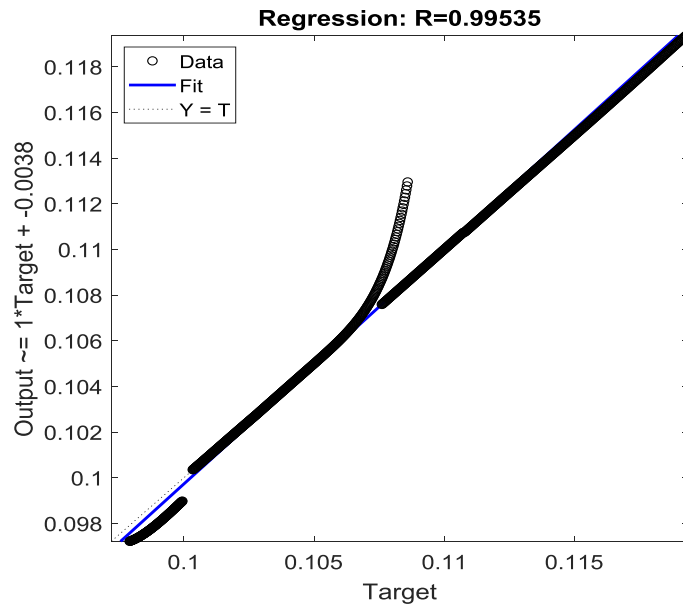
Şekil 5.7: GKHS 100 için UÖM'nin regresyon eğrisi

UÖM için seçilen logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonu ve 100 hücre sayısı algoritmasından; eğitim süresi 0.1248 sn'ye karşılık eğitim doğrulama yüzdesi %7.36 ve test süresi ise 0.1092 sn'ye karşılık test doğrulama yüzdesi %88.04 elde edilmiştir. RMSE değeri ise 0.19986'dır.

UÖM algoritması, aktivasyon fonksiyonu için radyal tabanlı fonksiyon ve GKHS 20 seçildiğinde elde edilen tüm verilere ait gerçek değer ile tahmin değer eğrisi Şekil 5.8'de ve regresyon eğrisi Şekil 5.9'da verilmiştir:



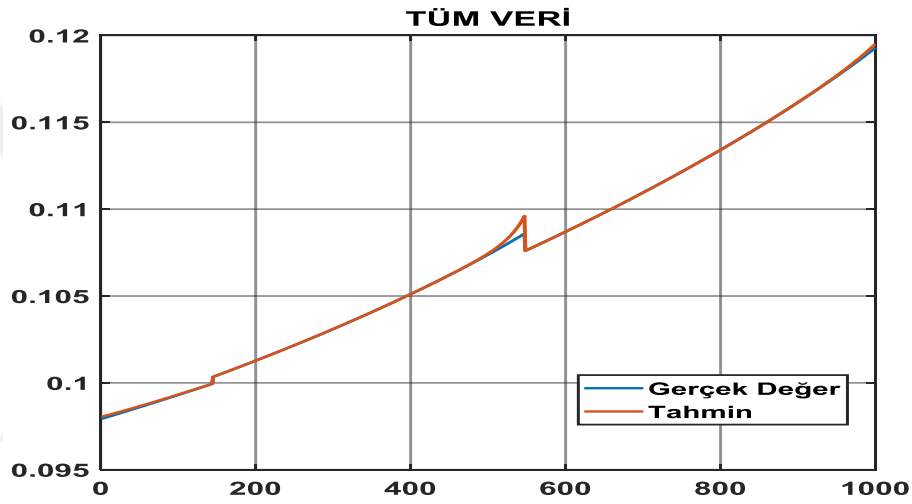
Şekil 5.8: GKHS 20 için UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi



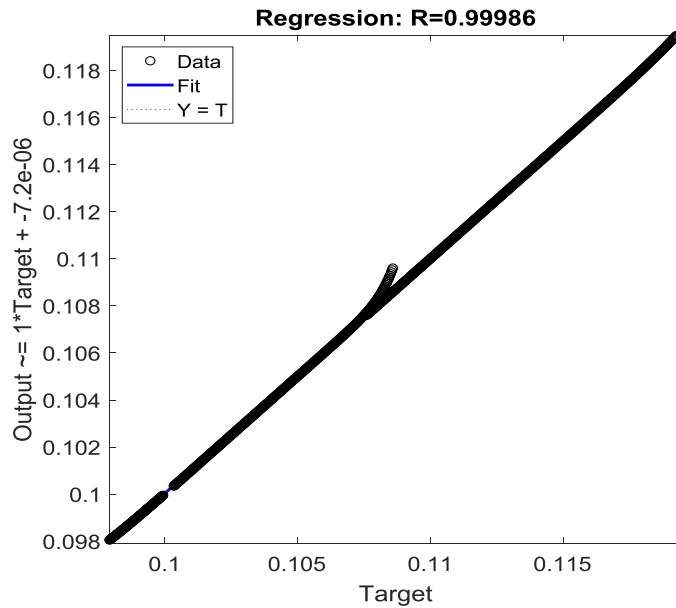
Şekil 5.9: GKHS 20 için UÖM'nin regresyon eğrisi

UÖM için seçilen radyal tabanlı aktivasyon fonksiyonu ve 20 hücre sayısı algoritmasından; eğitim süresi 0.0468 sn'ye karşılık eğitim doğrulama yüzdesi %1.4 ve test süresi ise 0.0312 sn'ye test karşılık doğrulama yüzdesi %48.89 elde edilmiştir. RMSE değeri ise 0.44044'tür.

UÖM algoritması, aktivasyon fonksiyonu için radyal tabanlı fonksiyon ve GKHS 60 seçildiğinde elde edilen tüm verilere ait gerçek değer ile tahmin değer eğrisi Şekil 5.10'da ve regresyon eğrisi Şekil 5.11'de verilmiştir:



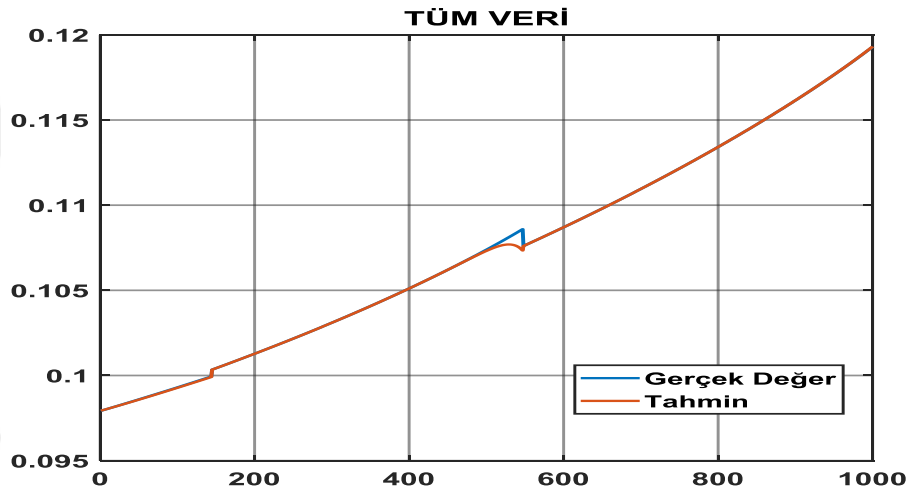
Şekil 5.10: GKHS 60 için UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi



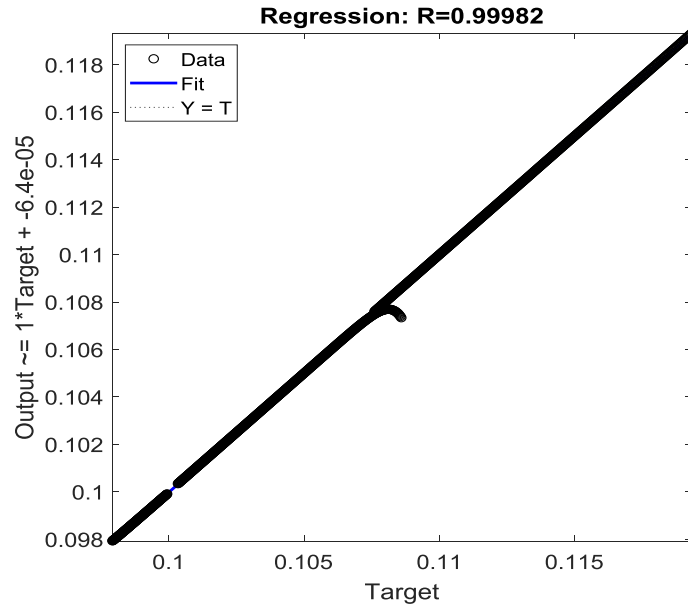
Şekil 5.11: GKHS 20 için UÖM'nin regresyon eğrisi

UÖM için seçilen radyal tabanlı aktivasyon fonksiyonu ve 60 hücre sayısı algoritmasından; eğitim süresi 0.1092 sn'ye karşılık eğitim doğrulama yüzdesi %3.07 ve test süresi ise 0.078 sn'ye karşılık test doğrulama yüzdesi %53.75 elde edilmiştir. RMSE değeri ise 0.32179'dur.

UÖM algoritması, aktivasyon fonksiyonu için radyal tabanlı fonksiyon ve GKHS 100 seçildiğinde elde edilen tüm verilere ait gerçek değer ile tahmin değer eğrisi Şekil 5.12'de ve regresyon eğrisi Şekil 5.13'te verilmiştir:



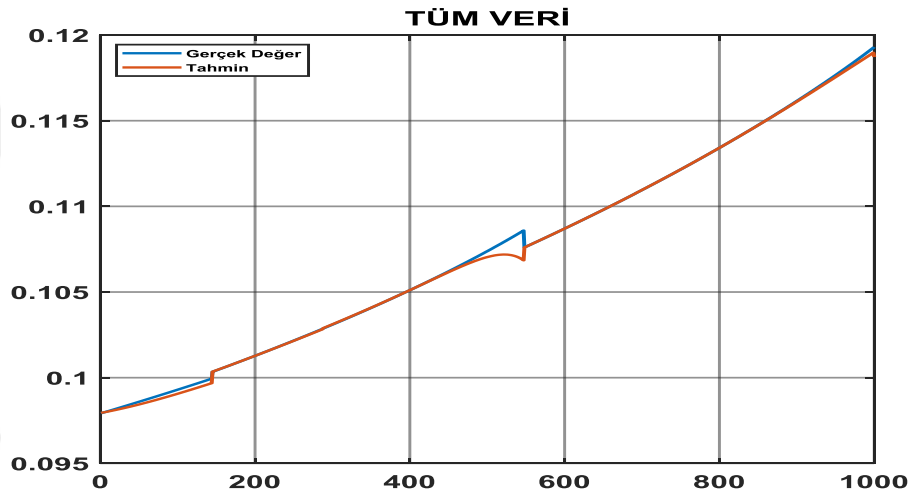
Şekil 5.12: GKHS 100 için UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi



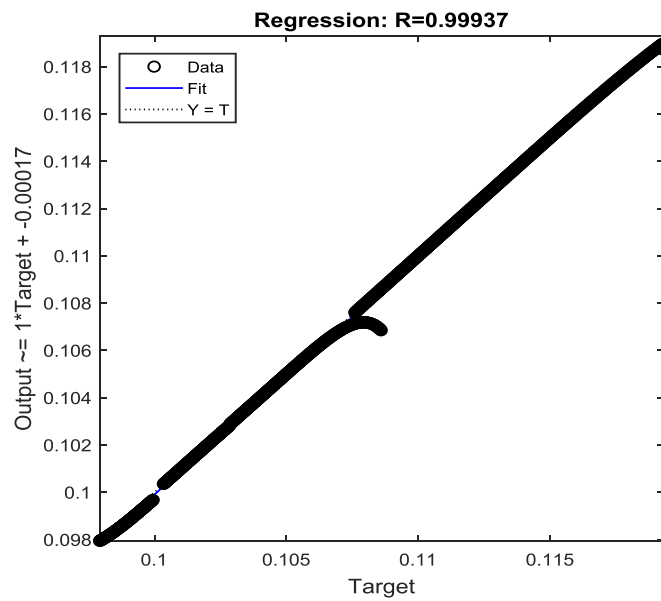
Şekil 5.13: GKHS 100 için UÖM'nin regresyon eğrisi

UÖM için seçilen radyal tabanlı aktivasyon fonksiyonu ve 100 hücre sayısı algoritmasından; eğitim süresi 0.1404 sn'ye karşılık eğitim doğrulama yüzdesi %5.92 ve test süresi ise 0.1392 sn'ye karşılık test doğrulama yüzdesi %57.77 elde edilmiştir. RMSE değeri ise 0.28748'dir.

UÖM algoritması, aktivasyon fonksiyonu için tanjant sigmoid fonksiyon ve GKHS 20 seçildiğinde elde edilen tüm verilere ait gerçek değer ile tahmin değer eğrisi Şekil 5.14'te ve regresyon eğrisi Şekil 5.15'te verilmiştir:



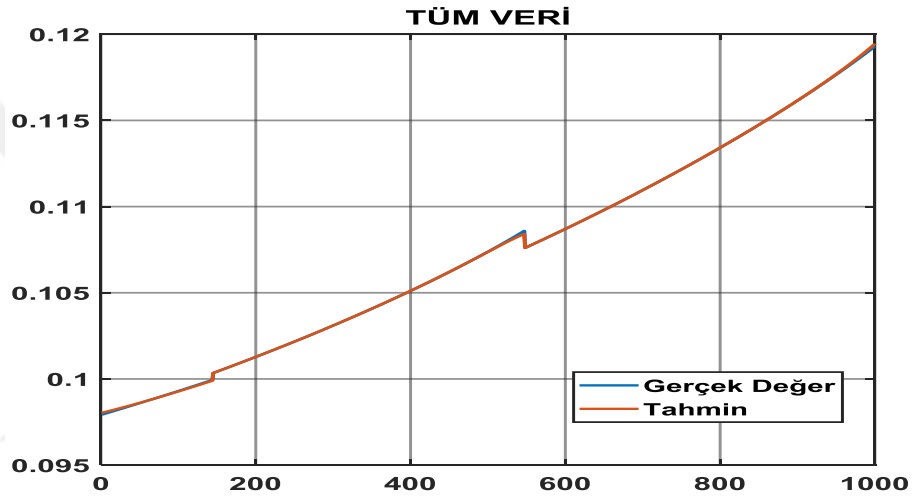
Şekil 5.14: GKHS 20 için UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi



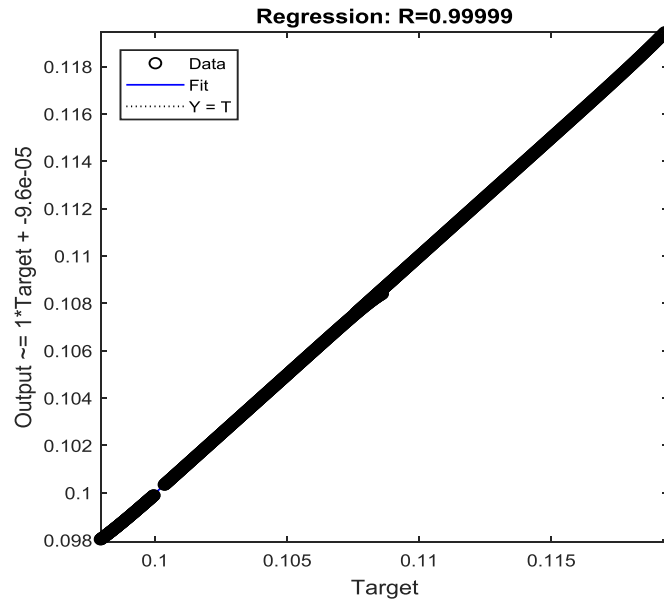
Şekil 5.15: GKHS 20 için UÖM'nin regresyon eğrisi

UÖM için seçilen tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu ve 20 hücre sayısı algoritmasından; eğitim süresi 0.1872 sn'ye karşılık eğitim doğrulama yüzdesi %1.55 ve test süresi ise 0.0156 sn'ye karşılık test doğrulama yüzdesi %80.03 elde edilmiştir. RMSE değeri ise 0.29127'dir.

UÖM algoritması, aktivasyon fonksiyonu için tanjant sigmoid fonksiyon ve GKHS 60 seçildiğinde elde edilen tüm verilere ait gerçek değer ile tahmin değer eğrisi Şekil 5.16'da ve regresyon eğrisi Şekil 5.17'de verilmiştir



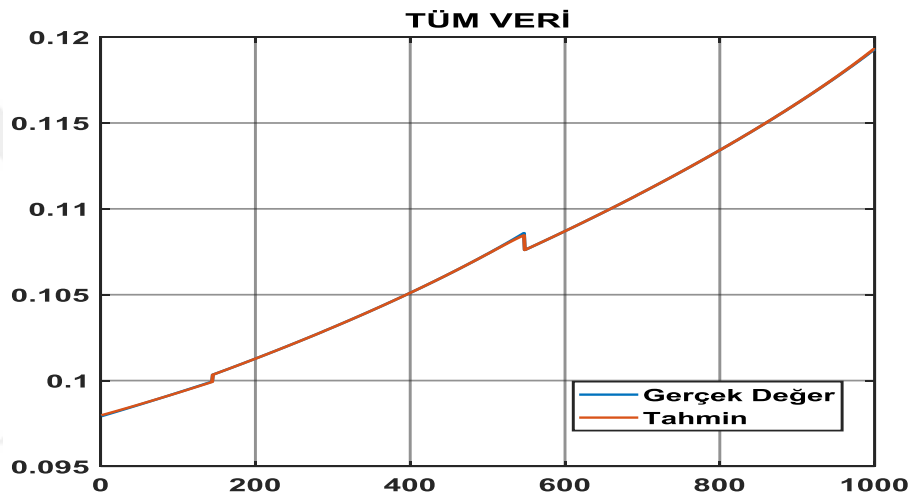
Şekil 5.16: GKHS 60 için UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi



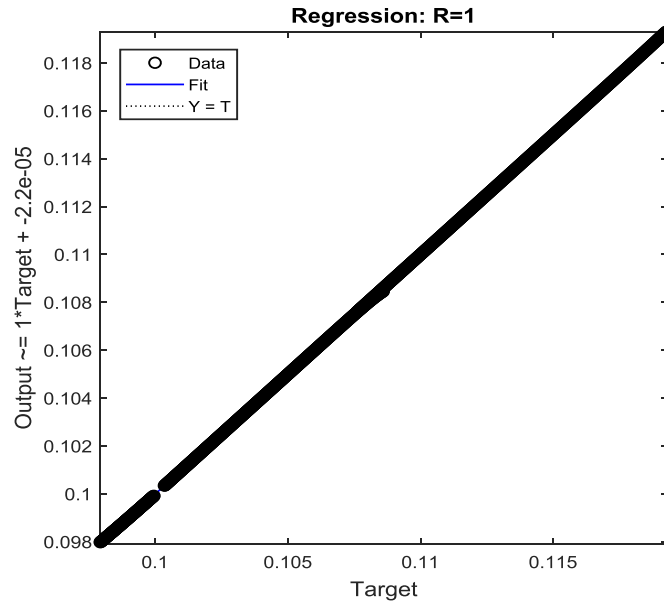
Şekil 5.17: GKHS 60 için UÖM'nin regresyon eğrisi

UÖM için seçilen tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu ve 60 hücre sayısı algoritmasından; eğitim süresi 0.1248 sn'ye karşılık eğitim doğrulama yüzdesi %4.02 ve test süresi ise 0.0568 sn'ye karşılık test doğrulama yüzdesi %84.09 elde edilmiştir. RMSE değeri ise 0.21147'dir.

UÖM algoritması, aktivasyon fonksiyonu için tanjant sigmoid fonksiyon ve GKHS 100 seçildiğinde elde edilen tüm verilere ait gerçek değer ile tahmin değer eğrisi Şekil 5.18'de ve regresyon eğrisi Şekil 5.19'da verilmiştir:



Şekil 5.18: GKHS 100 için UÖM'nin gerçek ve tahmin eğrisi



Şekil 5.19: GKHS 100 için UÖM'nin regresyon eğrisi

UÖM için seçilen tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu ve 100 hücre sayısı algoritmasından eğitim süresi 0.3276 sn'ye karşılık eğitim doğrulama yüzdesi %7.06 ve test süresi ise 0.1248 sn'ye karşılık test doğrulama yüzdesi %98.98 elde edilmiştir. RMSE değeri ise 0.17371'dir.

Tablo 5.4'te yukarıda verilen aktivasyon fonksiyonlarına (logaritmik sigmoid, radyal tabanlı, tanjant sigmoid) göre farklı GKHS'lerin (20,60 ve 100) eğitim-test süreleri ile test doğrulama yüzdeliği ve RMSE değerleri verilmiştir:

Tablo 5.4. Farklı aktivasyon fonksiyonu ve GKHS değerlerine göre elde edilen sonuçlar

Aktivasyon Fonksiyonu	GKHS	Süre (sn)		TD (%)	RMSE
		Test	Eğitim		
Radyal tabanlı	20	0.0312	0.0468	48.89	0.44044
	60	0.0781	0.1092	53.75	0.32179
	100	0.1392	0.1404	57.77	0.28748
Logaritmik sigmoid	20	0.0132	0.4836	78.46	0.37746
	60	0.0468	0.0468	83.47	0.22147
	100	0.1092	0.1248	88.04	0.19986
Tanjant sigmoid	20	0.0156	0.1872	80.03	0.29127
	60	0.0568	0.1248	84.09	0.21147
	100	0.1248	0.3276	98.98	0.17371

Tablo 5.4'te verilen tüm sonuçlar incelendiğinde, tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanan UÖM'den elde edilen RMSE değerlerinin radyal tabanlı ve logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanan UÖM'ye göre daha düşük değerde olduğu görülmektedir.

Ayrıca GKHS artıkça UÖM'nin başarımının iyileştiği, bunun yanında eğitim-test sürelerinin arttığı görülmektedir.

5.3. IEEE 14-Baralı Güç Sisteminin YSA ile Analizi

IEEE 14-baralı güç sisteminde gerilim kararlılığının farklı yük şartları için oluşturulan HKİ değerleri kullanılarak, Matlab yapay sinir ağları araç kutularından yararlanılarak oluşturulan sinir ağının eğitilmesi yöntemi ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla IEEE 14-baralı güç sistemi modeli Matlab'ta oluşturulmuştur.

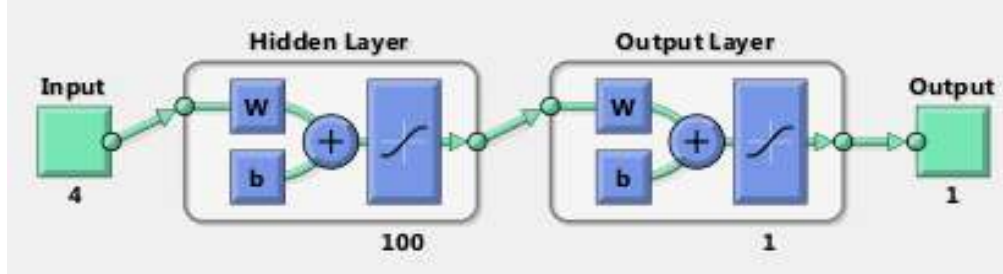
Oluşturulan modelin yük akış analizi Newton-Raphson yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yük akış analizi yapılırken tüm baraların aktif ve reaktif güç değerleri 0.05 pu artırılarak her bir bara için 1000 adet aktif güç, reaktif güç, gerilim genliği ve gerilimin faz açısı elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan HKİ değerleri ile IEEE 14-baralı güç sisteminin en kritik hattı belirlenmiştir. IEEE 14-baralı güç sisteminin UÖM algoritmaları ile analizi başlığı altında verilen Tablo 5.3'deki baralar arası iletim hatlarına ait farklı güç artırımlarından elde edilen HKİ değerlerine göre 12-13 nolu baraların iletim hattı en kritik hat olduğu belirlenmiştir.

12-13 nolu baralar ve bu baralara bağlı iletim hattı verileri YSA algoritmasında giriş ve çıkış verileri olarak kullanılmıştır. YSA algoritması için giriş parametreleri; ilk gönderici baranın gerilim genliği ve gerilim faz açısı; son alıcı baranın reaktif gücü ve gerilimin faz açısı ve çıkış parametresi olarak HKİ değerleri alındı. YSA'nın tahmin edeceği hedef HKİ değerleridir.

Bu çalışmada kullanılan YSA algoritması parametre bilgileri Tablo 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.20'de ise YSA uygulamasında kullanılan YSA'nın yapısı gösterilmiştir:

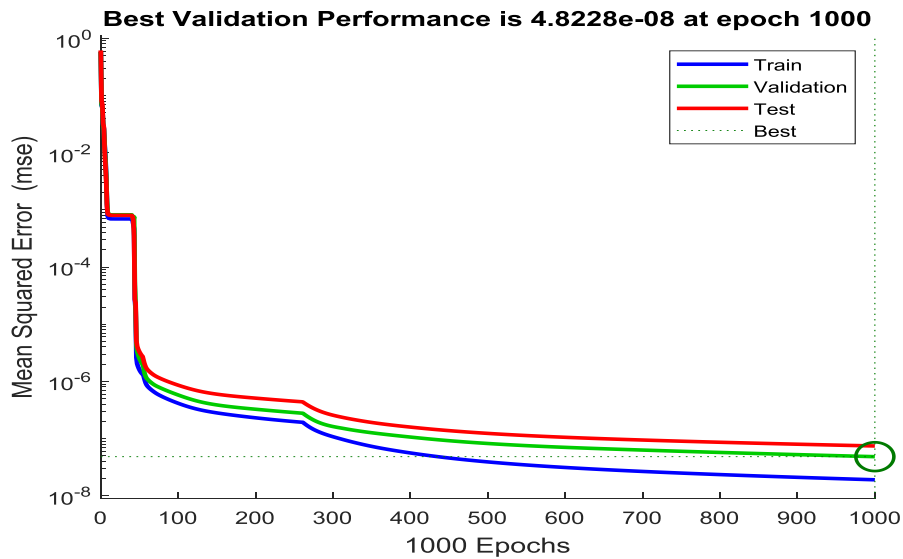
Tablo 5.5. YSA algoritma parametre bilgileri

Ağ Tipi	İleri Beslemeli Geri Yayılımlı YSA
Öğrenme Algoritması	Levenberg-Marquardt
Aktivasyon Fonksiyonu	Tanjant Sigmoid
Öğrenme Katsayısı	0.15
Momentum Katsayısı	0.25
Katman Sayısı	3
Ara Katman Hücre Sayısı	100
Hata Fonksiyonu	Ortalama Karesel Hata (MSE)

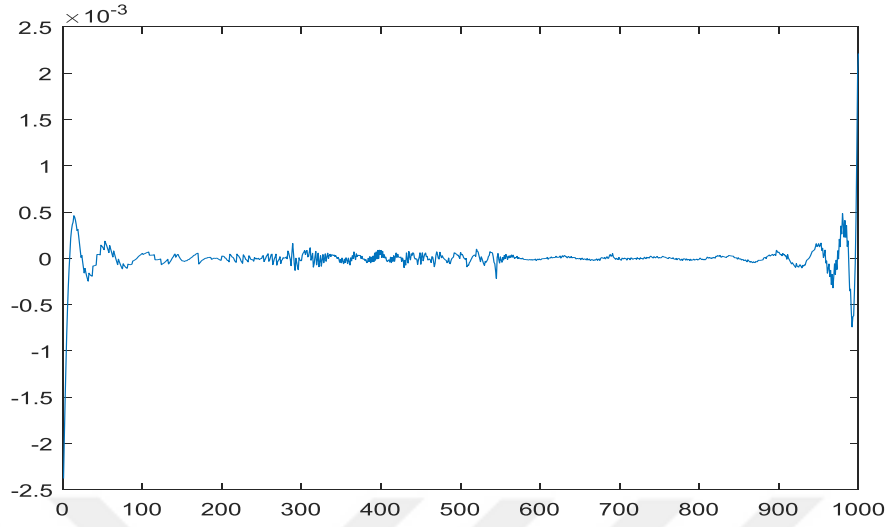


Şekil 5.20: YSA Uygulamasında kullanılan YSA'nın yapısı

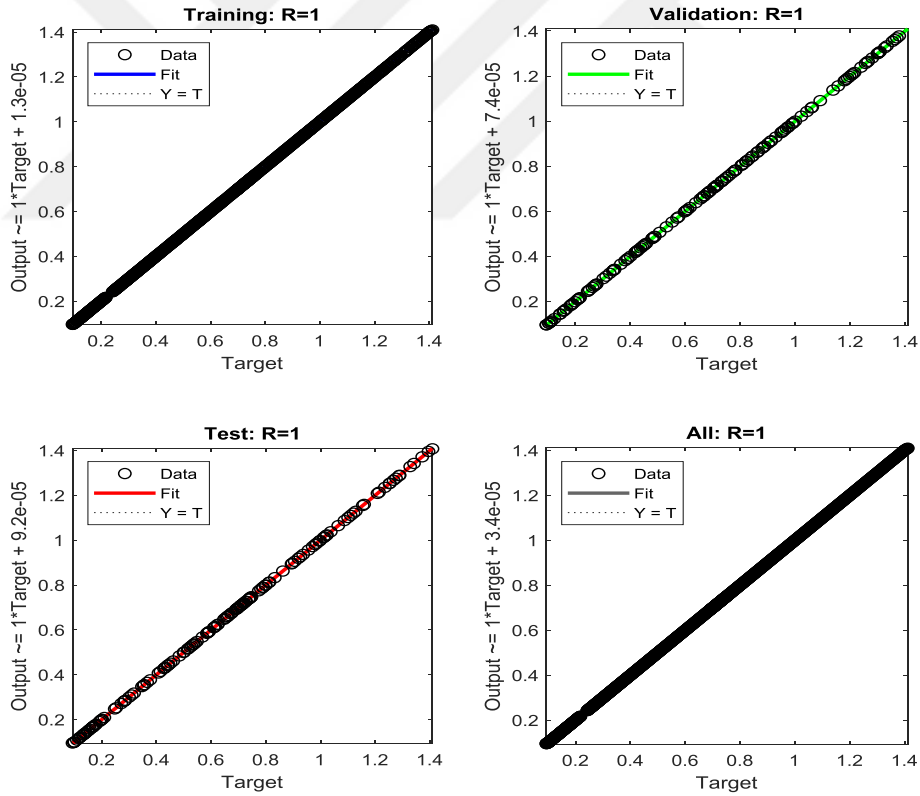
Eğitilen YSA'nın ara katmanda en uygun katsayıları bulabilmesi için ayarlanan diğer parametrelerden bazıları; iterasyon sayısı, maksimum hata değeri, minimum eğim düşümdür. YSA uygulamasında iterasyon sayısı 1000, maksimum hata değeri 100, minimum eğim düşümü 10^{-7} ise olarak belirlenmiştir. Eğitim aşamasında belirlenen bu sınır değerler göz önünde bulundurularak YSA'nın eğitimi gerçekleştirilmiştir. YSA'nın belirlenen sınır değerlerden herhangi bir tanesine ulaşması durumunda ise eğitim sonlandırılmıştır. Şekil 5.21, 5.22 ve 5.23'te YSA uygulamasının eğitimi sonrasında elde edilen ortalama karesel hata grafiği, gerçek değerler ile tahmin değerler arasındaki farkı veren hata grafiği ve regresyon grafiği verilmiştir:



Şekil 5.21: YSA uygulamasının ortalama karesel hata grafiği



Şekil 5.22: Gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki fark grafiği

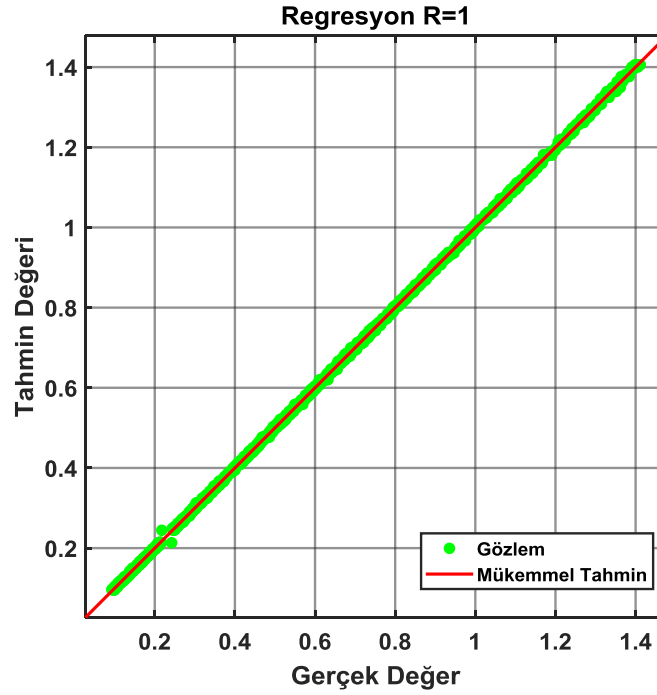


Şekil 5.23: YSA uygulaması regresyon değerleri grafiği

Şekil 5.21'de YSA, 1000 iterasyonda sonunda eğitim ve test aşamasını 89 sn'de tamamlamıştır. Ortalama karesel hata (mse) değeri 0.1277'dir. Şekil 5.22'deki hata grafiğinde farkın çok az olduğu görülmektedir. Şekil 5.23'te tahmin değerlerinin eğitim, test

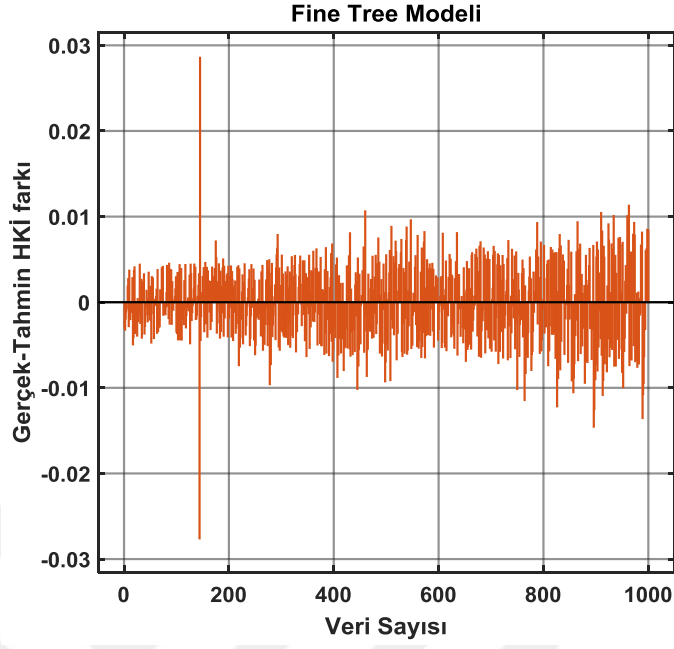
ve validasyon (doğrulama) regresyon grafiklerinde gerçek değerler ile tahmin değerlerinin aynı eğri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir.

12-13 nolu baralar ve bu baralara bağlı iletim hattı verileriyle Matlab uygulamalarından Regression Learning (R-L) araç kutusu kullanılarak regresyon analizi gerçekleştirildi. R-L algoritması için giriş parametreleri; ilk gönderici baranın gerilim genliği ve gerilim faz açısı; son alıcı baranın reaktif gücü ve gerilimin faz açısı ve çıkış parametresi olarak HKİ değerleri alındı. Tahmin başarımını artırmak için 5-kat çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. R-L araç kutusunda yer alan tüm yöntemler (Lineer Regresyon, Regresyon Trees, Destek Vektör Makineleri (SVM), Gauss Regresyon) denenmiş; neticede HKİ verilerine en uygun çıkışı veren yöntemin Regresyon Trees yöntemi olduğu görülmüştür. Şekil 5.24’de gerçek HKİ değerleri ile tahmin edilen HKİ değerleri regresyon eğrisi verilmiştir:



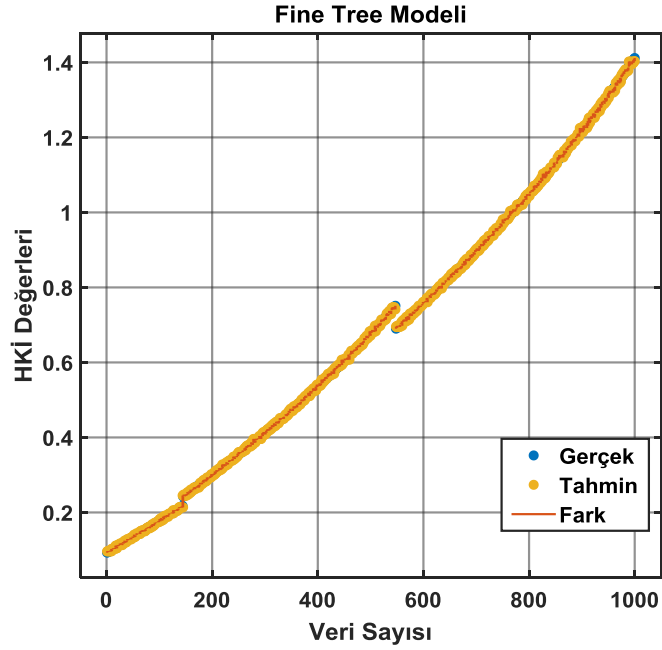
Şekil 5.24: Gerçek-tahmin regresyon eğrisi

Şekil 5.25’te gerçek HKİ değerleri ile tahmin edilen HKİ değerleri arasındaki farkı gösteren grafik verilmiştir:



Şekil 5.25: Gerçek-tahmin HKİ değerleri fark grafiği

Şekil 5.26’te gerçek HKİ değerleri ile tahmin edilen HKİ değerleri ve aralarındaki farkı gösteren grafik verilmiştir:



Şekil 5.26: Tüm değerler grafiği

Gerçekleştirilen regresyon analizinin eğitim-test süresi 7.1881 sn sürmüştür. Tablo 5.6’da regresyon analizi sonunda elde edilen R^2 , ortalama karesel hata (MSE), ortalama karekök hata (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) değerleri verilmiştir:

Tablo 5.6. R^2 ve hata değerleri

R^2	1.00
MSE	0.0021046
RMSE	0.45876
MAE	0.37477

R^2 , verilerin uygun regresyon doğrusuna ne kadar yakın olduğuna dair istatistiksel bir ölçüdür. R^2 formülü, ilk hataların toplamının, ikinci hataların toplamına bölünmesi ve türevlenmenin 1’den çıkarılmasıyla hesaplanır.

MSE, bir regresyon eğrisinin bir dizi noktaya ne kadar yakın olduğunu gösterir. MSE, bir makine öğrenmesi modelinin, tahminleyicinin performansını ölçer, her zaman pozitif değerlidir ve MSE değeri sıfıra yakın olan tahminleyicilerin daha iyi bir performans gösterdiği söylenebilir. MSE, eşitlik (5.2)’e göre hesaplanmaktadır:

$$MSE = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{N} \quad (5.2)$$

Eşitlik (5.1)’de verilen;

y_i = Gerçek değeri,

$\hat{y}_i$ = Tahmin değerini,

N = Tahmin sayısı göstermektedir.

RMSE, iki veri kümesi arasında ne kadar hata olduğunu ölçer. Başka bir deyişle, öngörülen bir değer ile gözlenen veya bilinen bir değeri karşılaştırır. Bir RMSE değeri ne kadar küçükse, öngörülen ve gözlenen değerler birbirine o kadar yakındır ve ağırlık tahmin başarımları o kadar yüksektir. RMSE, eşitlik (5.3)’e göre hesaplanmaktadır:

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (5.3)$$

MAE, iki sürekli değişken arasındaki farkın ölçüsüdür. MAE, her gerçek değer ile veriye en iyi uyan çizgi arasındaki ortalama dikey mesafedir. MAE aynı zamanda her veri noktası ile en iyi uyan çizgi arasındaki ortalama yatay mesafedir. MAE değeri 0'dan ∞ 'a kadar değişebilir. Negatif yönelimli puanlar yani daha düşük değerlere sahip tahminleyiciler daha iyi performans gösterir. MAE, eşitlik (5.4)'e göre hesaplanmaktadır:

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{N} \quad (5.4)$$

6.SONUÇ

Güç sistem kararlılığı genellikle bir güç sisteminin, kabul edilebilir dengeli bir çalışma şartında bulunması ve bozulmaya maruz kaldıktan sonra da, yeniden kararlı ve dengeli bir duruma gelebilmesi ile ilgilidir. Bir güç sisteminin, en verimli, kabul edilebilir dengeli bir çalışma şartında bulunması ve bozulmaya maruz kaldıktan sonra da, yeniden kararlı ve dengeli bir duruma gelebilmesi için, sistemin gerilim kararlılığının incelenmesi ve değerlendirilmesi gerekir [7,40]. Gerilim kararlılık sınırının tahmini doğru ve hızlı bir şekilde sağlanırsa, sistem operatörü de gerekli kontrol eylemlerini o kadar doğru ve hızlı başlatır [11].

Bu tez çalışmasında, IEEE 14-baralı güç sistemlerinde gerilim kararlılığının bir ölçütü olan HKİ, UÖM algoritması ve YSA yardımıyla tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla öncelikle IEEE 14-baralı güç sistemi modeli Newton Raphson metoduyla yük akışı Matlab ortamında oluşturuldu. Yük akış analizinde tüm baraların aktif ve reaktif güçleri 0.05 pu artırılmış ve her bir bara ait toplam 1000 adet; aktif güç, reaktif güç, gerilim genliği ve gerilimin faz açısı hesaplanmıştır. IEEE 14-baralı güç sistemi modeli parametre değerlerinden elde edilen 1000 adet HKİ değeri, yine Matlab ortamında oluşturulan UÖM algoritması, YSA ve Regression Learning kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır.

UÖM'nin test başarımı 5-kat çapraz doğrulama kullanılarak verilmiştir. Ayrıca UÖM'nin başarımı, GKHS 20, 60 ve 100 olacak şekilde ve radyal tabanlı fonksiyon, logaritmik sigmoid ve tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonları kullanılarak sunulmuştur. Regresyon ve gerçek değer ile tahmin değerleri eğrilerinden GKHS 100, aktivasyon fonksiyonu tanjant sigmoid olan UÖM algoritmasının daha iyi sonuç verdiği ve buna bağlı olarak bu algoritmanın tahmin başarımı diğer algoritmalarından çok yüksek olduğu söylenebilir.

Tablo 6.1'de, bu tez çalışmasında Matlab'ta oluşturulan YSA yapısı ve R-L ile UÖM algoritmalarından en iyi tahmin başarımını gösteren tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonlu GKHS'si 100 olan algoritmanın eğitim ve test aşamasında geçen süre ve R-kare, MSE, RMSE ve MAE hata değerleri verilmiştir:

Tablo 6.1. UÖM, YSA ve R-L eğitim-test süreleri ile hata değerleri

	UÖM	YSA	R-L
Eğitim-Test Süresi (sn)	0.4524	89	7.1881
R	0,9848	1	1
MSE	0.03017	0.1277	0.0021
RMSE	0.17371	0.3574	0.4587
MAE	0.1407	0.2919	0.3747

Tablo 6.1’de verilen değerlere göre UÖM algoritmasının eğitim-test süresinin ve hata değerlerinin YSA ve R-L ile oluşturulan algoritma değerlerinden daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, IEEE 14-baralı güç sistemlerinde gerilim kararlılığının tespitinde UÖM’nin YSA’ya ve R-L’ye göre daha kısa zamanda daha az hatayla sonuçlar verdiği görülmüş ve bunlara bağlı olarak UÖM’nin HKİ’yi oldukça yüksek bir başarımla tahmin edebildiği değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Öztürk, A. (2007). Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Genetik Algoritma İle İncelenmesi (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [2] Kınalı, E. (1999). Enerji sistemlerinde kararlılık sorununun incelenmesi.
- [3] Stevenson Jr, W. D. (1982). Elements of Power System Analysis (Mcgraw Hill Series in Electrical and Computer Engineering). McGraw Hill, New York, USA.
- [4] ANDERSON, P.M, FOUND, A.A. “Power System Control and Stability”, IEEE Press, Newyork, 1994.
- [5] Kothari, D. P., & Nagrath, I. J. (2011). Modern power system analysis. Tata McGraw-Hill Education.
- [6] TACER, M.E., “Enerji Sistemlerinde Kararlılık”, İ.T.Ü., 1990.
- [7] Kundur, P., Balu, N. J., & Lauby, M. G. (1994). Power system stability and control (Vol. 7). New York: McGraw-hill.
- [8] Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., ... & Van Cutsem, T. (2004). IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, Definition and Classification of Power System Stability. IEEE Transactions on Power Systems, 19(2), 1387-1401.
- [9] B. Brusilowicz and J. Szafran, “Estimation, control and prediction of voltage level and stability at receiving node”, IEEE Eindhoven PowerTech, pp 1-6, 29 June-2 July 2015, Netherlands.
- [10] M.M. Aly and M. Abdel-Akher, “Voltage stability assessment for radial distribution power system with wind power penetration”, IEEE IET Conference on Renewable Power Generation, pp. 1-6, 6-8 September 2011, Edinburgh.
- [11] V.Balamourougan, T.S. Sidhu and M.S. Sachdev, “Technique for online prediction of voltage collapse”, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. July 2004, vol.151, pp. 454-460.
- [12] B. C. Bernardes, W. D. Oliveira, J. P. A. Vieira, “Decision Tree-Based On-line Power System Static and Dynamic Security Assessment Tool Using PMU Measurements” Member, IEEE, I. Ohana and U. H. Bezerra
- [13] Ramaswamy, M., & Nayar, K. R. (2004). On-line estimation of bus voltages based on fuzzy logic. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 26(9), 681-684.

- [14] Rahi, O. P., Yadav, A. K., Malik, H., Azeem, A., & Kr, B. (2012). Power system voltage stability assessment through artificial neural network. *Procedia Engineering*, 30, 53-60.
- [15] Vankayala, V.S., Rao N.D., Artificial neural networks and their applications to power systems-a bibliographical survey, *ELECTR.POWER SYST. RES.* Vol. 27 pp. 67–79, 1993.
- [16] Short M.J., Hui K.C., Macqueen J.F., Ekwue A.O.R., Application of artificial neural networks for NGC voltage collapse monitoring, *INTER. CONF. ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS*, CIGRE , Paris, 28 Aug.- 3 Sep., paper 38-205, 1994.
- [17] Huang, G.-B., Zhu, Q.-Y. and Siew, C.-K., 2006. Extreme learning machine: theory and applications, *Neurocomputing*, 70(1), 489–501.
- [18] Guang-Bin Huang G. B., Zhu Q. Y. ve Siew C. K., “Extreme Learning Machine: A New Learning Scheme of Feedforward Neural Networks”, *IEEE Int. Joint Conf. on Neural Networks*, 985 990, 2004.
- [19] Erişti, H., Yıldırım, Ö., Erişti, B., Demir, Y., “Automatic recognition system of underlying causes of power quality disturbances based on S-Transform and Extreme Learning Machine”, *Electrical Power and Energy Sys.*, 61:553-562, 2014.
- [20] Ertuğrul, Ö. F., Tağluk, M. E., Kaya, Y., “Fault Detection at Power Transmission Lines by Extreme Learning Machine”, *Signal Process. and Comm. Appl. Conf. (SIU’13)*, Girne-KKTC, 2013.
- [21] Wan, C., Xu ,Z., Pinson, P., Dong, Z. Y., Wong, K. P., “Optimal Prediction Intervals of Wind Power Generation”, *IEE Trans. On Power Systems*, 29: 1166-1174, 2014.
- [22] Zhang, R., Dong, Z. Y., Xu ,Y., Meng, K., Wong, K. P., “Shortterm load forecasting of Australian National Electricity Market by an ensemble model of extreme learning machine”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7 (4): 391-397, 2013.
- [23] Vankayala, V.S., Rao N.D., Artificial neural networks and their applications to power systems-a bibliographical survey, *ELECTR. POWER SYST. RES.* Vol. 27 pp. 67–79, 1993.
- [24] Gao, B., Morison, G. K., & Kundur, P. (1992). Voltage stability evaluation using modal analysis. *IEEE transactions on power systems*, 7(4), 1529-1542.
- [25] Claudia Reis¹, Antonio Andrade², and F. P. Maciel Barbosa³” Methods for Preventing Voltage Collapse” Telecommunications Institute of Aveiro University, University Campus of Aveiro, Portugal

- [26] M. Ramaswamy*, K.R. Nayar , “On-line estimation of bus voltages based on fuzzy logic”Department of Electrical Engineering, Annamalai University, Annamalainagar
- [27] António C. Andrade and F. P. Maciel Barbosa, “Voltage Collapse Preventive Control – A New Method”, Melecon 2004 – The 12th Mediterranean Electro. Conf., Dubrovnik, Croatia, May 2004.
- [28] A. Yazdanpanah-Goharrizi, A Novel Line Stability Index (NLSI) for Voltage Stability Assessment of Power Systems
- [29] Salama, M. M., Saied, E. M., Abou-Elsaad, M. M., & Ghariany, E. F. (2001). Estimating the voltage collapse proximity indicator using artificial neural network. *Energy Conversion and Management*, 42(1), 69-79.
- [30] Y.H. Song, H.B. Wan, A.T. Johns, Kohonen neural network based approach to voltage weak buses:areas identification, *PROC. IEE C*, Vol. 144, No. 3, pp. 340–344, 1997.
- [31] El-Keib AA, Ma X., Application of artificial neural networks in voltage stability assessment, *IEEE TRANS. POWER SYST.* Vol. 10, No. 4, pp. 1890–1896, 1995.
- [32] H.H. Goh, Q.S. Chua, S.W. Lee, B.C. Kok, K.C. Goh, K.T.K. Teo, “Evaluation for Voltage Stability Indices in Power System Using Artificial Neural Network ”, *International Conference on Sustainable Desing, Engineering and Construction*, 2015 IEEE.
- [33] V. Puppala, P. Chandrarao, “Analysis of continuous power flow method, Model analysis, Linear Regression and ANN for voltage stability assessment for different Loading conditions”, *Procedia Computer Science* 47 (2015) 168 – 178.
- [34] T. Peter, Sajith R P, “Voltage Stability Assessment in Power Systems using Artificial Neural Networks” , *International Conference on Magnetics, Machines & Drives (AICERA-2014 iCMMD)*
- [35] D. Devaraj, J.P. Roselyn, “On-line voltage stability assessment using radial basis function network model with reduced input features,” *Int J Electr Power Energy Syst*, 33 (2011), pp. 1550-1555
- [36] Tiwari, R., Niazi, K. R., & Gupta, V. (2012). Line collapse proximity index for prediction of voltage collapse in power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 41(1), 105-111.
- [37] O.P. Rahi, A. K. Yadav, H. Malik, A. Azeem, Bhupesh Kr, “Power System Voltage Stability Assessment through Artificial Neural Network,” *International Conference on*

Communication Technology and System Design 2011Procedia Engineering 30 (2012) 53 – 60

[38] S. M. Ashraf, A. Gupta, D. K. Choudhary, S. Chakrabarti, “Voltage stability monitoring of power systems using reduced networkband artificial neural network,” *Electrical Power and Energy Systems* 87 (2017) 43–51

[39] A.R. Bahmanyar, A. Karami, “Power system voltage stability monitoring using artificial neural networks with a reduced set of inputs,” *Electrical Power and Energy Systems* 58 (2014) 246–256

[40] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and Classification of Power System Stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, pp.1387-1401, May 2004.

[41] YALÇIN, MA., Enerji sistemlerinde gerilim kararlılığının yeni bir yaklaşımla incelenmesi. Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1995.

[42] ANDERSON, PM., FOUAD, AA., Power system control and stability. John Wiley & Sons, Inc., 2003.

[43] ALSHAMLI, Y., HOSSEINZADEH, N., YOUSEF, H., AL-HINAI, A., A Review of concepts in power system stability. In *Proc. 8th IEEE GCC Conference and Exhibition*, Muscat, Oman, February 1–4, 2015.

[44] CIGRE Task Force 38-02-12, Criteria and Countermeasures for Voltage Collapse, CIGRE Publication, 1994.

[45] IEEE Working Group on Voltage Stability, Voltage Stability of Power System: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience, IEEE Special Publication 90TH0358-PWR, 1990.

[46] Öztürk A., Güç Sistemlerindeki Gerilim Kararlılığının Genetik Algoritma ile İncelenmesi, Doktora Tezi, Ocak 2007.

[47] Repo, S., 2001. On-Line Voltage Stability Assessment of Power System an Approach of Black –Box Modelling, Phd. Thesis, Tampere University of Technology, Publication 344, Tampere, 2001.

[48] Baek, Y.S., Gu, M.Y., 2004. Optimal Placement for Facts to Improve Static Voltage Stability, *KIEE International Transactions on Power System*, Vol.4- A No.3, pp.141-145.

[49] Johansson, S. (1998). Long-term Voltage Stability in Power Systems-Alleviating the Impact of Generator Current Limiters. Chalmers University of Technology.

- [50] IEEE Transactions On Power Systems, 2004. Definition and Classification of Power System Stability, VOL. 19, NO. 2, MAY 2004.
- [51] Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., ... & Van Cutsem, T. (2004). Definition and classification of power system stability. IEEE transactions on Power Systems, 19(2), 1387-1401.
- [52] CIGRE Task Force 38.02.14 Rep., 1999. Analysis and Modeling Needs of Power Systems Under Major Frequency Disturbances, Jan. 1999.
- [53] Kundur P., Lee, D.C., Bayne, J. P., and Dandeno, P. L., 1985. Impact of turbine generator controls on unit performance under system disturbance conditions, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, pp. 1262–1267, June 1985.
- [54] Chow, Q.B., Kundur, P., Acchione, P.N., and Latsch, B., 1989. Improving nuclear generating station response for electrical grid islanding, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. EC-4, pp. 406–413, Sept. 1989.
- [55] Kundur P., 1981. A survey of utility experiences with power plant response during partial load rejections and system disturbances, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp. 2471–2475, May 1981.
- [56] IEEE Committee Report, 1983. Guidelines for enhancing power plant response to partial load rejections, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, pp. 1501–1504, June 1983.
- [57] Hatziaargyriou, N., Karapidakis, E., & Hatzifotis, D. (1998, August). Frequency stability of power systems in large islands with high wind power penetration. In Bulk Power Syst. Dynamics Control Symp.—IV Restructuring (Vol. 102, p. 4).
- [58] Zerva, M. (2012). Voltage Stability Assesment of the Swiss Power Transmission System. Master Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 18-26.
- [59] Ayasun, S. Kwatany, H. U. (2006). Voltage Stability Toolbox for Power System Education and Research. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Education, 90(4), 48-56.
- [60] Al Dessi, S. A., Ibrahim, A. I., Osman, A. H. (2011). A Comprehensive Methodology for Voltage Stability Assessment of Power Systems Using Modern Analytical Tools. International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Sharjah.
- [61] NGUYEN, DT., Contributions to analysis and prevention of powersystem blackouts. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008.

- [62] Gao, B., Morison, G.K., Kundur, P. (1993). Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Systems, 8(3), 222-231.
- [63] C. Subramani, S. S. Dasch, M. Arun Bhaskar, M. Jagdeshkumar International Journal of Recent Trends in Engineering 2(5) (2009) 263.
- [64] A. Testa, S. De Caro, R. La Torre, T. Scimone, "Optimal size selection of step-up transformers in PV plants", Electrical Machines (ICEM) 2010 XIX International Conference on, pp. 1-6, 2010.
- [65] I.Musirin, T.K.A.Rahman, "Estimating Maximum Loadability for Weak Bus Identification Using FVSI," IEEE Power Engineering Review, pp. 50-52, November 2002.
- [66] M. Moghavvemi, F.M. Omar, "Technique for Contingency Monitoring and Voltage Collapse Prediction," IEEE Proceeding on Generation,
- [67] Musirin, I., & Rahman, T. A. (2002). Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system. In Student Conference on Research and Development (pp. 265-268). IEEE.
- [68] C. Reis ; F.P. Maciel Barbosa "Line indices for voltage stability assessment", IEEE Bucharest PowerTech 2009, June 28th-July 2nd Bucharest, Romania,
- [69] A. Mohamed, G. B. Jasmon, S. Yusoff, "A Static Voltage Collapse Indicator using Line Stability Factors", Journal of Industrial Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 73-85, 1989.
- [70] M. Moghavvemi, O.Faruque, "Real-Time Contingency Evaluation and Ranking Technique," IEEE Proceeding on Generation, Transmission and Distribution, Vol.145, N0.5, pp. 517-524, September 1998.
- [71] Musirin, I., & Rahman, T. A. (2002). Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system. In Student Conference on Research and Development (pp. 265-268). IEEE.
- [72] Musirin, I., & Rahman, T. A. (2002). Estimating maximum loadability for weak bus identification using FVSI. IEEE Power Engineering Review, 22(11), 50-52.
- [73] P.Kessel, H.Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-1, no. 3, pp. 346-354, July 1986.
- [74] Zerva, M. (2012). Voltage Stability Assesment of the Swiss Power Transmission System. Master Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 18-26.

- [75] Pai, M.A., Stankovic, A.M. (2006). Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control. New York: Springer.
- [76] L.L. Grigsby, "Power Systems", Electric Power Engineering Handbook, 2nd Ed., BocaRaton, United Kingdom: CRC Press, 2007, pp. 46-56.
- [77] R. Anand and V. Balaji, "Power flow analysis of Simulink IEEE 57 bus test system model using PSAT", Indian Journal of Science and Technology, vol 8, no.23, September 2015.
- [78] Stott, B. (1974). Review of Load-Flow Calculation Methods. Proceedings of the IEEE, 62(7), 916–929. <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9544G>. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics," in Plastics, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64.
- [79] D. P. Kothari and I. J. Nagrath, "Power System Engineering," 2nd Edition, Tata McGraw Hill, New Delhi, 2007.
- [80] Afolabi, O. A., Ali, W. H., Cofie, P., Fuller, J., Obiomon, P., & Kolawole, E. S. (2015). Analysis of the load flow problem in power system planning studies. Energy and Power Engineering, 7(10), 509.
- [81] John J. Grainger, William D. Stevenson, JR. (1994). Power System Analysis. McGraw Hill.
- [82] Annakkage.U.D. (2010). Risk-Based Dynamic Security Assessment, IEEE Transactions on power systems.
- [83] M. Mohammadi, A. Shayegani and H. Adaminejad, "A new approach of point estimate method for probabilistic load flow", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 51, pp. 54-60, March 2013.
- [84] Kusekwa, M. A. (2014). Load flow solution of the Tanzanian power network using Newton-Raphson method and MATLAB software. International Journal of Energy and Power Engineering, 3(6), 277-286.
- [85] Müller, B., & Reinhardt, J. (1990). Neural Network: An Introduction, Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg.
- [86] Routray, P., Mishra, M., & Rout, P. K. (2015, October). High impedance fault detection in radial distribution system using S-transform and neural network. In 2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC) (pp. 545-551). IEEE.

- [87] Etemadi, H., Sood, V. K., Khorasani, K., & Patel, R. V. (2000). Neural network based fault diagnosis in an HVDC system. In DRPT2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Proceedings (Cat. No. 00EX382) (pp. 209-214). IEEE.
- [88] Zhang, N., 2006. Advanced Fault Diagnosis Techniques and Their Role in Preventing Cascading Blackouts, PhD Thesis, Texas A&M University, Texas, USA.
- [89] Mahanty, R. N. and Gupta, P. B. D., 2004. Application of RBF neural network to fault classification and location in transmission lines, IEE Proceedings-Generation, Transmission, vol. 151, pp. 201–212.
- [90] Fyfe, C., 2000. Artificial Neural Networks and Information Theory, Department of Computing and Information Systems, The University of Paisley, Scotland.
<http://www.ece.rice.edu/~erzsebet/ANNcourse/handouts502/course-cf-1.pdf> , Son Erişim Tarihi: 24 Ağustos 2016.
- [91] Kröse, B, Van Der Smagt, P., 1996. An introduction to neural networks, Eighth Edition. The University of Amsterdam. 134 p.
- [92] Demuth, H., Beale, M., 2002. Neural Network Toolbox For Use with MATLAB, The Mathworks Inc., http://www.image.ece.ntua.gr/courses_static/nn/matlab/nnet.pdf. Son Erişim Tarihi: 24 Ağustos 2016.
- [93] Ertuğrul, Ö. F., Tağluk, M. E., Kaya, Y., “Fault Detection at Power Transmission Lines by Extreme Learning Machine”, Signal Process. and Comm. Appl. Conf. (SIU’13), Girne-KKTC, 2013.
- [94] Guang-Bin Huang G. B., Zhu Q. Y. ve Siew C. K., “Extreme learning machine: Theory and applications”, Neurocomputing 70 (2006) 489–501
- [95] Guang-Bin Huang G. B., Zhu Q. Y. ve Siew C. K., “Extreme Learning Machine: A New Learning Scheme of Feedforward Neural Networks”, IEEE, 2004, 985-990
- [96] Huang G. B., Wang D. H. ve Lan Y., “Extreme learning machines: a survey”, Int. J. Mach. Learn. & Cyber. (2011) 2:107–122
- [97] Ben-Israel A. ve Greville T. N. E., “Generalized Inverses”, Springer-Verlag. ISBN 0-387-00293-6, 2003
- [98] Ethem Alpaydın, “Yapay Öğrenme”, Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, 2. ed, 2011, pp.278 281

- [99] Magnago, F. H., & Abur, A. (1998). Fault location using wavelets. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 13(4), 1475-1480.
- [100] Uçar, Ferhat, Beşir Dandıl, and Fikret Ata. "Classification of power quality events using extreme learning machine." *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2015 23th. IEEE, 2015.
- [101] Huang, G. B., Zhou, H., Ding, X., and Zhang, R., 2012. Extreme learning machine for regression and multiclass classification, *IEEE Trans. Syst. man, Cybern. Part B, Cybern.*, vol. 42, pp. 513–29.
- [102] Yang, G., Bin Sun, X., Zhang, M. X., Li, X. L. And Liu, X. R., 2014. Study on ways to restrain end effect of hilbert-huang transform, *Journal of Computers*, vol. 25, pp. 22–31.
- [103] Ertam., F., 2016. Kurumsal bilgisayar ağlarındaki trafik bilgisinin akıllı sistemler ile sınıflandırılması, Doktora Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [104] Kartal E., Özen Z., Gezer M., Saylan S., 2017 Mühendislikte yapay zekâ ve uygulamaları Sakarya Üniversitesi Kütüphanesi Yayınevi-Sakarya
- [105] Kartal, E., 2015. Sınıflandırmaya Dayalı Makine Öğrenmesi Teknikleri ve Kardiyolojik Risk Degerlendirmesine İlişkin bir Uygulama, Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi.
- [106] Luo, J., Vong, C.M. and Wong, P.K., 2014. Sparse Bayesian extreme learning machine for multi-classification, *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, 25(4), 836–43.

ÖZGEÇMİŞ

İlhami POYRAZ, 18.09.1983 yılında Diyarbakır'da doğdu. İlk ve ortaöğrenimini Diyarbakır'da tamamladı. Dicle Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden 2008 yılında mezun oldu. 2016 yılında Fırat Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Şubat 2015 den beri Dicle Üniversitesi Diyarbakır Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu'nda Elektrik ve Enerji Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.

İletişim Bilgileri:

Dicle Üniversitesi Diyarbakır Teknik Bilimler MYO
Elektrik ve Enerji Bölümü/ DİYARBAKIR
E-mail: ilhami.poyraz@dicle.edu.tr